

M.-T Gil
E.T.S. ENGINYERS DE CAMINS C.P.

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CATALUNYA

ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
DE CAMINOS CANALES Y PUERTOS



**MODELO MICROESTRUCTURAL
PARA MEDIOS GRANULARES
NO SATURADOS**

Tesis doctoral presentada por:

JOSE ANTONIO GILI RIPOLL

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Director:

EDUARDO ALONSO PEREZ DE AGREDA

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Barcelona, Junio de 1988

L. 7513

DEDICATORIA

*A aquellos que inspiraron mi cerebro:
Mis Profesores y Compañeros.*

*A aquellos que han inspirado mi corazón:
Mamen, Oriol y Albert.*



**“...En algunas ocasiones
lo más cercano a un sí es un no,
como una foto es lo más parecido a su negativo,
o como las dos caras de una misma moneda son lo más próximo,
a pesar de ser distintas...”**

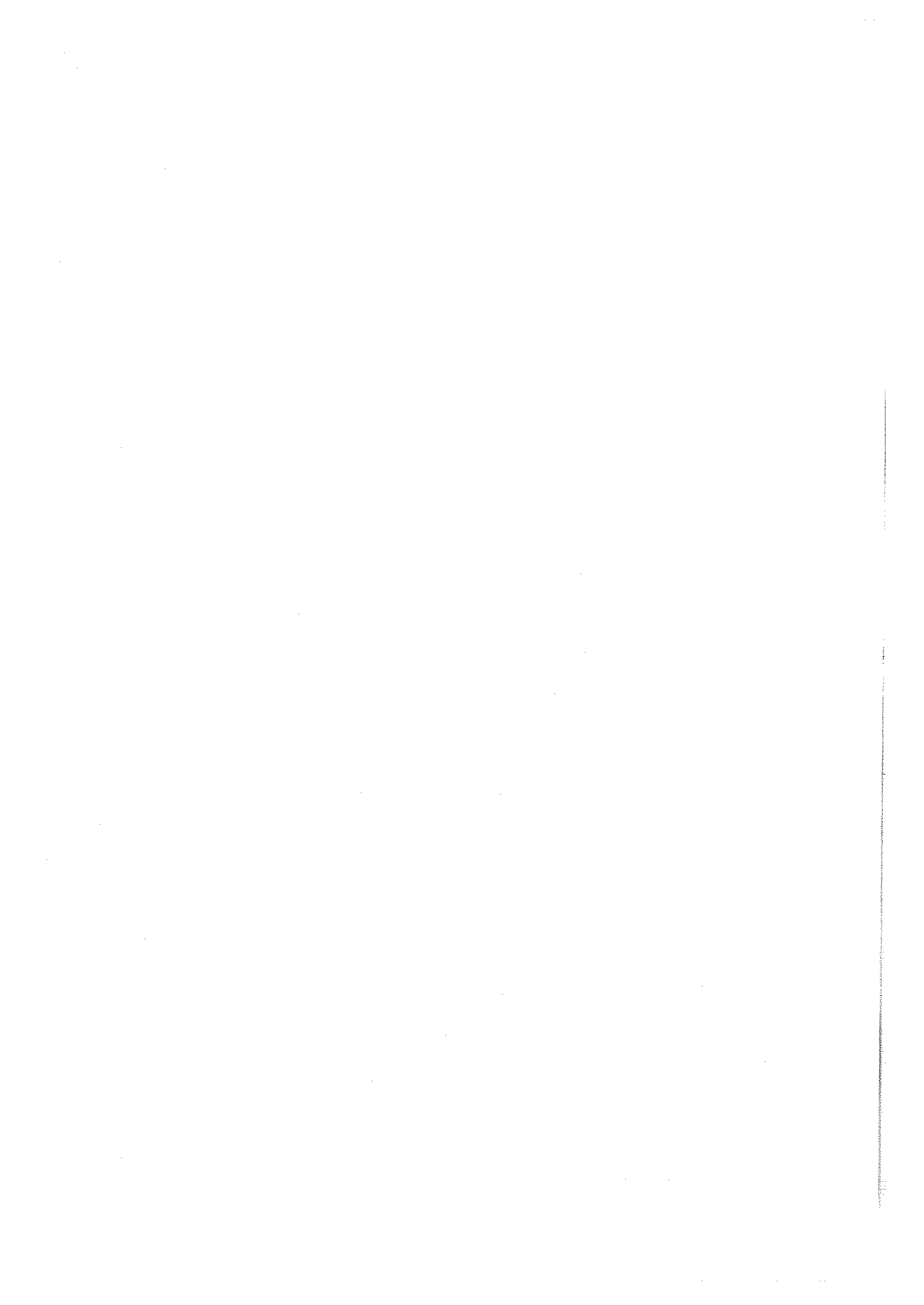
**...A veces, en Geotecnia, de manera inesperada,
surgen resultados que no son ni sí ni no.”**

José Antonio Jiménez Salas.



**“Strive for perfection in everything you do.
Take the best that exists and make it better.
When it does not exist, design it.
Accept nothing nearly right
or good enough.”**

Henry Royce.



I N D I C E G E N E R A L

CAPITULO 1. INTRODUCCION Y OBJETIVOS

1.1 INTRODUCCION	1.1
1.2 OBJETIVOS	1.4
1.3 CONTENIDO	1.6

CAPITULO 2. MEDIOS GRANULARES NO SATURADOS

2.1 INTRODUCCION	2.1
2.2 ASPECTOS RELEVANTES CONSTITUTIVOS DEL COMPORTAMIENTO DEL SUELO NO SATURADO	2.2
2.2.1 FASES PRESENTES EN EL SUELO NO SATURADO	2.2
2.2.2 NIVELES E IMPORTANCIA DE LA ESTRUCTURA EN LOS SUELOS NO SATURADOS	2.3
2.2.3 VARIABLES RELEVANTES EN LA DEFINICION DEL ESTADO TENSIONAL DEL SUELO	2.12
2.2.4 SIGNIFICADO FISICO DE LA SUCCION	2.16
2.2.5 ALGUNOS COMPORTAMIENTOS PECULIARES DEL SUELO NO SATURADO	2.24
2.3 EVOLUCION DE LOS ESTADOS DE HUMEDAD EN UN SUELO. . .	2.32
2.3.1 FLUJO EN MEDIO NO SATURADO	2.39
2.3.2 COALESCENCIA DEL AIRE EN EL SUELO	2.41
2.3.3 EFECTO "MAXIMO" DE LA SUCCION	2.48
2.4 VISION GENERAL DE LOS MODELOS SOBRE COMPORTAMIENTO DE SUELOS	2.58
2.4.1 MODELOS CONSTITUTIVOS	2.61

2.4.1.1 APROXIMACION MACROSCOPICA	2.62
2.4.1.2 APROXIMACION MICROSCOPICA	2.62
2.4.2 MODELOS FISICOS, ANALOGICOS Y NUMERICOS	2.67
2.4.2.1 FISICOS	2.67
2.4.2.2 ANALOGICOS	2.70
2.4.2.3 NUMERICOS	2.73
2.4.3 OTROS MODELOS DE SIMULACION NUMERICA. PERSPECTIVAS	2.87

**CAPITULO 3. MODELO CONCEPTUAL: ESTRUCTURA, FLUJOS,
===== FUERZAS Y MOVIMIENTOS**

3.1 INTRODUCCION	3.1
3.2 DISPOSICION GEOMETRICA Y ESTRUCTURA DEL SUELO . . .	3.3
3.2.1 CARACTERISTICAS DE LA PELICULA DE AGUA ADHERIDA A LAS PARTICULAS	3.6
3.3 DESCRIPCION DE LOS FLUJOS DE LAS ESPECIES DEL SUELO Y CAMBIOS DE FASE	3.15
3.3.1 FLUJO ENTRE LOS POROS	3.19
3.3.2 CAMBIO DE FASE A TRAVES DE LA INTERFASE AIRE-AGUA	3.20
3.3.3 FLUJO ENTRE LOS MENISCOS	3.28
3.4 FUERZAS Y MOVIMIENTOS	3.31

**CAPITULO 4. DESCRIPCION GEOMETRICA DEL MENISCO AISLADO
=====**

4.1 INTERFASE CURVA ENTRE LA FASE LIQUIDA Y LA FASE GASEOSA	4.2
4.2 CONTACTO DE LA INTERFASE LIQUIDO-GAS SOBRE LA FASE SOLIDA	4.8
4.2.1 CONTACTO ENTRE LAS TRES FASES	4.8

4.2.2 CONFORMACION DE LA INTERFASE	4.10
4.2.3 VALOR DEL ANGULO DE CONTACTO	4.17
4.3 DISPOSICION DE LA FASE LIQUIDA COMO MENISCOS ENTRE PARTICULAS	4.18
4.3.1 CURVATURA MEDIA DE UNA SUPERFICIE	4.22
4.3.2 SUPERFICIES DE CURVATURA CONSTANTE. SUPERFICIES MINIMAS	4.23
4.3.3 EL PSEUDOCATENOIDE	4.26
4.3.4 EL MENISCO TOROIDAL	4.28
4.3.5 REFERENCIAS AL MENISCO TOROIDAL	4.35
4.3.6 EL MENISCO GENERALIZADO	4.39
4.3.7 ALGUNAS POSIBLES DESVIACIONES Y LIMITACIONES EN EL MODELO MENISCO AISLADO	4.45
4.4 NOTA FINAL	4.53

CAPITULO 5. DESCRIPCION DE LA ORGANIZACION GEOMETRICA Y NUMERICA ADOPTADA
=====

5.1 VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LOS METODOS EXPLICITOS	5.2
5.2 ORGANIZACION GEOMETRICA ADOPTADA	5.9
5.2.1 GENERACION DEL ESTADO INICIAL	5.11
5.3 PROGRAMA PRINCIPAL DE ENSAYO FLUJO-DEFORMACIONAL . .	5.20
5.3.1 MODULO DE FLUJOS	5.28
5.3.2 MODULO MECANICO	5.37
5.3.3 MODULO DE CONTROL LOGICO Y GEOMETRICO	5.49
5.3.4 ARCHIVOS DE DATOS Y POSTPROCESO	5.55

**CAPITULO 6. VERIFICACIONES DEL MODELO Y APLICACIONES
A CASOS TIPICOS**
=====

6.1	GENERACION INICIAL, GRANULOMETRIA Y POROSIMETRIA . . .	6.2
6.2	ENSAYOS DE FLUJO	6.8
6.2.1	ENSAYO DE FLUJO SOBRE 9 PARTICULAS	6.8
6.2.2	ENSAYO DE FLUJO SOBRE UNA COLUMNA DE 100 PARTICULAS	6.10
6.2.3	ENSAYO DE FLUJO SOBRE UN CONJUNTO CIRCULAR DE PARTICULAS	6.15
6.3	ENSAYOS FLUJO-DEFORMACIONALES	6.23
6.3.1	ENSAYOS SOBRE 21 PARTICULAS	6.23
6.3.2	ENSAYOS SOBRE 592 PARTICULAS	6.25
6.3.2.1	PARTICULAS RIGIDAS	6.27
6.3.2.2	PARTICULAS COMPRESIBLES	6.54
6.3.2.3	DETALLES MICROESTRUCTURALES	6.100

**CAPITULO 7. RESUMEN, CONCLUSIONES Y LINEAS DE INVESTIGACION
ABIERTAS**
=====

7.1	RESUMEN Y CONCLUSIONES	7.1
7.1.1	ASPECTOS BASICOS	7.1
7.1.2	MODELO NUMERICO	7.3
7.1.3	SOBRE LOS ENSAYOS NUMERICOS	7.8
7.2	LINEAS DE INVESTIGACION ABIERTAS	7.11

NOTACION

REFERENCIAS

- ANEJOS:

- A1. GEOMETRIA DEL MENISCO TOROIDAL. CASO PARTICULAR
 - A2. GEOMETRIA DEL MENISCO TOROIDAL. CASO GENERALIZADO
 - A3. DESCRIPCION DE LOS PROGRAMAS

AGRADECIMIENTOS

Quedan pocos instantes para que el cúmulo de trabajos encaminados a la realización de esta tesis doctoral pasen “a imprenta”. Es para mí un placer poder agradecer la numerosa serie de colaboraciones que han contribuído a este fin.

Eduardo Alonso Pérez de Agreda ha sido desde la *causa primera* hasta el *último tamiz* de lo que aquí se vierte. Desde el día (hace ahora unos cuantos años) en el que me propuso el tema de investigación, hasta las últimas discusiones del contenido (y los giros!) de la tesis, ha desempeñado una labor constante y equilibrada, pero a la par suficientemente elástica.

Por su relación y experiencia en el tema de estudio, ha resultado imprescindible también el apoyo recibido de Antonio Lloret, Antonio Gens y Alejandro Josa, así como del resto del Departamento de Ingeniería del Terreno y de la Escuela de Caminos.

Por motivos diversos quisiera agradecer la colaboración de: Ignacio Carol, Juan Miquel Canet, Alex Barbat, Jesús Carrera, José Rodellar, Francisco Marqués, Ana Serra, José Padró (Facultad de Físicas) y de Antonio Molinero (Lab. F. Echevarne).

A nadie se le oculta que el Centro de Cálculo ha constituído también una pieza fundamental en el desarrollo del modelo que se presenta en esta tesis. Quiero expresar mi reconocimiento a sus responsables por haberme “soportado” en cuantas necesidades informáticas he planteado. También (*por pasiva*) a todos los usuarios del ordenador, con los que he tenido que *compartir* recursos.

En el apartado de *agraTeX*cimientos¹ y composición quisiera resaltar la

¹ *TeX*es nuestro procesador de textos

intervención, más allá de sus obligaciones, de: Francisco Almansa, Manuel Gómez, Josep Sarrate, Magda Mestres, Eduardo González, José Spagnolo, Ana Nisarre, Agustí Collado, Pere Prat, Eva González y Jesús Torres.

Agradezco asimismo al numeroso colectivo² que, sin ningún espíritu anatómico, me preguntaba por el estado de mis *partículas*, por el funcionamiento de mis *meniscos*, o por la humedad de mis *poros*³.

Dentro del apartado de “soporte electrónico”, ha sido también inestimable la ayuda *prestada* por M. Casteleiro y por L. Candela⁴.

Es justo recordar la ayuda recibida del Ministerio de Educación y Ciencia, a través del Plan de Formación de Personal Investigador, y el marco de investigación propiciado por un Proyecto de la Comisión de Investigación Científica y Técnica.

Faltaría una palabra adecuada para expresar el profundo agradecimiento que debo a mi familia (en toda la extensión del término). ¿Cómo expresar el sentimiento de aflicción que experimento al recordar la larga *trayectoria de fluencia* a la que les he sometido? Con una cierta impertinencia se podría hablar de un proceso que a lo largo del tiempo equivaldría a unas condiciones K_0 , de *deformación lateral nula*: un *apoyo constante* y a la vez un *empuje* y estímulo ininterrumpido, en equilibrio, cuya *trayectoria tensional* (incluyendo *fenómenos de histéresis*, *grandes esfuerzos* y *corrimientos finales*) ha desembocado, maravillosamente, como solución única, a un punto real (la tesis que se presenta). Este trabajo puede ser (como se comenta en el capítulo 7) punto de partida de nuevas trayectorias, preferentemente *controladas*.

Es posible que sin la colaboración de alguno de ellos esta tesis hubiera podido salir a la luz (sic). Pero no me gustaría tener que comprobarlo.

² por su insistencia es de destacar Javier Oliver

³ partículas, poros y meniscos son tres elementos fundamentales del modelo de comportamiento que se desarrolla en esta tesis

⁴ cafetera y radio, respectivamente

RESUMEN

En esta tesis se ha llevado a cabo:

- a) Un estudio de las propiedades básicas del suelo no saturado a escala *microestructural*, fijando la atención no sólo en el esqueleto sólido (suelo granular fino, tipo limo), sino también en la *fase líquida* y en la *fase gaseosa*, presentes en el estado no saturado a niveles bajos de humedad.
- b) A partir de a) se ha elaborado un *modelo conceptual* de comportamiento que mantiene el carácter discontinuo que a esa escala tiene el suelo. Dicho modelo se basa en una serie de *hipótesis* aproximadas, relativamente sencillas:
 - b.1) sobre la geometría interna del suelo y de las fases. Sobre un esqueleto sólido particular se ha incorporado la fase líquida en forma de agua retenida como *meniscos* alrededor de los contactos entre *partículas*, y la fase gaseosa ocupando los intersticios (*poros*) entre las mismas.
 - b.2) sobre la interacción entre ellas (de tipo *mecánico* en el caso del esqueleto; y de *flujo* en y entre las restantes fases fluidas). En concreto el modelo comprende los siguientes fenómenos básicos: interfase líquido-gas gobernada por la succión y la tensión superficial; “efecto rigidizador” de los meniscos alrededor de los contactos; redistribución del contenido de agua y aire, y cambios de fase entre ellas.

Alguna de las anteriores hipótesis han sido adaptadas de anteriores modelos conceptuales, pero otras han tenido que ser planteadas originalmente. Así se ha integrado en un solo modelo los aspectos acoplados de comportamiento

mecánico y de flujo, y su relación con y sobre la estructura del suelo.

- c) El estudio de a) y el modelo conceptual de b) se han concretado en un *modelo numérico*, nuevamente *discontinuo*, de ensayo de comportamiento, basado en una serie de programas de ordenador. El método numérico usado para calcular las fuerzas y los desplazamientos es una adaptación del "*Distinct Element Method*" de P. A. Cundall. Para modelar el flujo se ha desarrollado un nuevo método inspirado en el anterior. Consisten básicamente es un esquema de relajación en diferencias finitas, explícito a lo largo del tiempo; se ha juzgado indicado especialmente para las situaciones no estacionarias y de *no-linealidad geométrica* que se tratan. Cabe resaltar el importante papel de los *algoritmos* que se han tenido que desarrollar para el control lógico y geométrico del modelo, y que se describen.
- d) Finalmente se ha procedido a *verificar* de manera parcial el modelo, mediante *ensayos numéricos* de comprobación y otros de aplicación a casos típicos. Los ensayos simulan los cambios de contenido de humedad, de distribución de poros, de fuerzas de contacto, bajo condiciones variables de tensión y de presión en el contorno. Muestran las posibilidades de ambos modelos para evaluar la influencia que tiene la succión en este estado no saturado, y descubren algunos aspectos microestructurales peculiares. Son una herramienta útil para el estudio de este tipo de suelos, en especial de los fenómenos de *colapso*.

PARTE I

**ESTUDIOS DEL COMPORTAMIENTO DE MEDIOS GRANULARES
NO SATURADOS, CON ESPECIAL ENFASIS EN LOS
ASPECTOS MICROESTRUCTURALES**

CAPITULO 1

INTRODUCCION Y OBJETIVOS

1.1 INTRODUCCION

EL SUELO NO SATURADO

La Mecánica del Suelo se ha centrado tradicionalmente en el estudio del suelo en estado seco o saturado. Las razones pueden encontrarse en el predominio de depósitos sedimentarios saturados en los países desarrollados, de clima templado, en el establecimiento temprano del principio de las tensiones efectivas, y en la general certeza de que el caso saturado es el más desfavorable durante la vida útil de muchos proyectos geotécnicos. El citado principio de las tensiones efectivas, que constituye uno de los pilares básicos del estudio del comportamiento de los suelos saturados, no puede ser empleado para explicar el del suelo parcialmente saturado, especialmente en lo que se refiere a los cambios de volumen que experimenta este último bajo cambios en las condiciones ambientales o de carga exterior. Falta una base teórica y una metodología general de estudio que constituya una alternativa a esta situación, pero hasta el momento se ha considerado que los costos que se derivarían de un estudio más

general y profundo no justifican su desarrollo.

No hay que olvidar sin embargo que gran parte de la superficie emergida de la Tierra está en estado *no saturado*, sometida a cambios importantes en sus condiciones de humedad, afectando a espesores del orden de la decena de metros, que pueden provocar importantes cambios de volumen y de resistencia y, en casos extremos, conducir a situaciones patológicas para las ocupaciones artificiales de superficie.

Los terrenos “artificiales” utilizados por el hombre para cimentar las obras (terraplenes y presas de tierra, por ejemplo), se construyen en situación no saturada, y en muchos casos no es previsible ni a largo plazo que se alcancen condiciones de saturación total.

La complejidad del comportamiento del suelo no saturado (de donde nace la dificultad de su estudio) reside fundamentalmente en el hecho de que depende tanto de las condiciones iniciales y actuales (humedad, cargas), como de la *historia* de saturación y tensional a la que ha sido sometido (ciclos de carga, cambios periódicos de humedad, etc.). Adicionalmente a las variables “de estado” (densidad seca, grado de saturación . . .) será imprescindible conocer la trayectoria de sollicitaciones pasada. La fuerte dependencia de algunos de los parámetros implicados (como la permeabilidad) en los cambios de humedad, y el acoplamiento introducido por la deformación volumétrica del suelo, convierten al estudio matemático del suelo no saturado en una cuestión no trivial, por no hablar de las dificultades en la medida de los parámetros implicados, o de establecer las condiciones de contorno a las que realmente ha sido sometido el suelo.

ESTRUCTURA DE LOS MEDIOS GRANULARES

Como señala Brzakala (1987), casi toda la Mecánica de Sólidos moderna se basa en la concepción clásica de tensiones y deformaciones en el *continuo*. Fue iniciada por Cauchy ya en 1822, y propició el gran desarrollo de la teoría matemática del continuo deformable, dado que en él se podían aplicar con éxito las herramientas del cálculo infinitesimal. Sin embargo trabajos anteriores de Newton o Poisson, y también de Navier, partían de la naturaleza discreta de los materiales, generalmente a escala molecular. Estas aproximaciones se veían limitadas por la naturaleza complicada de las fuerzas interparticulares. Por otro lado no se contaba con herramientas matemáticas para resolver el problema de un gran número de partículas en contacto.

Sin embargo los *materiales granulares* (escollera, gravas, arenas o limos no cohesivos) están efectivamente compuestos por granos. Es razonable pues decir que la “no-continuidad” (la naturaleza discontinua) de estos materiales es un carácter fundamental (concepto de “fabric” o estructura), que determina la mayoría de sus propiedades, y que dificulta su análisis teórico.

En este sentido es reveladora la siguiente cita de K. Terzaghi. Refiriéndose a Coulomb, en 1920 dijo:

“De hecho las hipótesis fundamentales de las teorías tradicionales sobre el empuje de tierras no resisten ni el más superficial de los análisis. El error fundamental fue introducido por Coulomb, quien de manera consciente ignoró el hecho de que la arena está compuesta por granos individuales, y la trató como si fuera una masa homogénea con determinadas propiedades mecánicas. Esta idea de Coulomb fue altamente fructífera como hipótesis de trabajo para la solución de un problema especial de la teoría de empuje de tierras, pero se convirtió en un obstáculo para progresos ulteriores, dado que los sucesores de Coulomb olvidaron el carácter hipotético de la idea. El camino para sortear este obstáculo reside en abandonar los viejos principios fundamentales, y en

empezar de nuevo a partir del hecho elemental de que la arena se compone de granos individuales”.

Para tener en cuenta esta realidad se han desarrollado algunos modelos “discontinuos” para suelos. Trabajar en esta línea de investigación sigue siendo aún una necesidad dentro de la Mecánica de Suelos, según Hoeg (1980).

1.2 OBJETIVOS

Tras la observación del comportamiento real del suelo “in situ”, y la reproducción en laboratorio de sus rasgos más significativos, acotándolos, se debe proceder a la elaboración de *modelos generales de comportamiento* que unan las causas con los efectos de manera coordinada y que permitan predecir con cierta fiabilidad la respuesta del suelo a las sollicitaciones a las que se vea sometido.

Justamente para la elaboración de estos modelos ha de ser sin duda de especial ayuda e interés el conocer cual es la relación física última entre las causas (cambios de condiciones de carga y de humedad), y los efectos (deformación volumétrica y de corte, condiciones de rotura, flujo intersticial). *El objetivo global* de la presente tesis podría ser profundizar de alguna manera en esta relación, en sus aspectos mecánicos y de flujo, a través de la estructura particular del suelo no saturado de tipo granular. Consecuentemente este trabajo quiere ser una contribución al mejor conocimiento de los suelos no saturados; conocimiento que eventualmente puede desembocar en la elaboración de ecuaciones constitutivas.

Para ello se ha decidido elaborar un *modelo discontinuo*, a base de partículas, en el cual se puedan reproducir todas las fuerzas internas de interés (básicamente las mecánicas entre granos, pero también las inducidas por la acción capilar del agua a succión), estudiando su interrelación: la influencia

mutua y los movimientos (flujos) de las fases líquida, sólida y gaseosa.

Este objetivo global ha comportado la revisión de los aspectos básicos estructurales que intervienen en la relación entre las fases. A continuación se ha tenido que concebir un *modelo conceptual* de comportamiento, a escala microscópica: forma de los granos y ubicación del agua y del aire en el suelo no saturado a bajos contenidos de humedad. Especial atención ha recibido el espacio enmarcado por las partículas sólidas, es decir los huecos o poros.

Para hacer operativo el citado modelo conceptual y poderlo explotar debidamente, ha sido *objetivo adicional* de esta tesis la elaboración de un *modelo numérico* en ordenador capaz de efectuar ensayos numéricos (simulaciones) en condiciones diversas de contorno, bajo cargas isotrópicas o desviadoras, con condiciones de succión especificadas (fijas o variables). La utilidad perseguida ha sido el modelado de comportamientos volumétricos peculiares de este tipo de suelos, especialmente los de colapso.

Un objetivo implícito y necesario es la *verificación* del modelo así implementado, mediante la comparación con fenómenos típicos de flujo y deformación.

Un modelo de este tipo puede ser una herramienta útil para los fines propuestos, especialmente para relacionar parámetros constitutivos de tipo macroscópico (los característicos de leyes constitutivas generales) con constantes físicas básicas y con la *estructura* del suelo.

1.3 CONTENIDO

A efectos de su redacción esta tesis se ha dividido en 7 capítulos.

En el capítulo primero (el presente) se lleva a cabo la introducción general y el enunciado de los objetivos.

En el segundo capítulo se lleva a cabo un estudio de las propiedades básicas del suelo no saturado a escala *microestructural*, fijando la atención no sólo en el esqueleto sólido (suelo granular fino, tipo limo), sino también en la *fase líquida* y en la *fase gaseosa*, presentes en el estado no saturado a niveles bajos de humedad.

En el tercer capítulo se ha elaborado un *modelo conceptual* de comportamiento que mantiene el carácter discontinuo que a esa escala tiene el suelo. Dicho modelo se basa en una serie de *hipótesis* aproximadas, relativamente sencillas:

- sobre la geometría interna del suelo y de las fases.
- sobre la interacción entre ellas .

Para el aspecto geométrico es de especial importancia la disposición del agua en forma de meniscos entre partículas, que se estudia en el capítulo cuarto.

En el quinto capítulo, el modelo conceptual se han concretado en un *modelo numérico*, de ensayo de comportamiento, basado en un paquete de programas de ordenador, que se describen.

Finalmente en el capítulo seis se ha procedido a *verificar* de manera parcial el modelo, mediante *ensayos numéricos* de comprobación y otros de

aplicación a casos típicos, que muestran las posibilidades de ambos modelos.

En el **último capítulo** se resume el trabajo desarrollado y las principales conclusiones derivadas de él. Se exponen también las líneas futuras de investigación abiertas.



MEDIOS GRANULARES NO SATURADOS

2.1 INTRODUCCION

En este capítulo se pasa revista a una serie de aspectos relevantes característicos del suelo no saturado: desde el punto de vista de su naturaleza y estructura y de comportamiento deformacional (epígrafe 2.2); y desde el punto de vista de evolución de la humedad en su interior (epígrafe 2.3).

El comportamiento general de los suelos puede describirse o reproducirse con la ayuda de modelos. En el caso de suelos granulares la importancia de la estructura del mismo y de la forma de los granos y de los espacios libres que dejan (poros), puede exigir el empleo y puesta a punto de modelos discontinuos de comportamiento que tengan debidamente en cuenta la naturaleza esencialmente particular del suelo. Una visión general de los modelos de comportamiento de suelos y de sus posibilidades se lleva a cabo en el epígrafe 2.4.

Este capítulo no pretende ser una revisión exhaustiva del conocimiento sobre la respuesta del suelo no saturado, pero incluye aquellos aspectos y trabajos anteriores (muchos de ellos suficientemente conocidos), relacionados con el estudio que se lleva a cabo en los siguientes capítulos.

2.2 ASPECTOS RELEVANTES CARACTERISTICOS DEL COMPOR- TAMIENTO DE UN SUELO NO SATURADO

En este apartado se exponen algunas peculiaridades de la naturaleza y el estudio de los suelos no saturados, especialmente por lo que se refiere a los de grano fino (arenas finas y limos).

Información adicional puede encontrarse en las siguientes referencias (entre otras): Wood (1979), Lloret (1982), Alonso et al. (1987) y Josa (1988).

2.2.1 FASES PRESENTES EN EL SUELO NO SATURADO

Como es tradicional en los estudios sobre suelo no saturado, éste se considera como un sistema trifásico. En el espacio que deja libre el esqueleto sólido están presentes el agua y el aire. El comportamiento del esqueleto sólido y la presencia relativa e interacción del aire y del agua en los poros está influenciado por la estructura del mismo.

En el cuadro de la figura 2.1, debido a Yoshimi y Osterberg (1963) se resume la forma en que está presente cada componente o especie en las tres fases citadas.

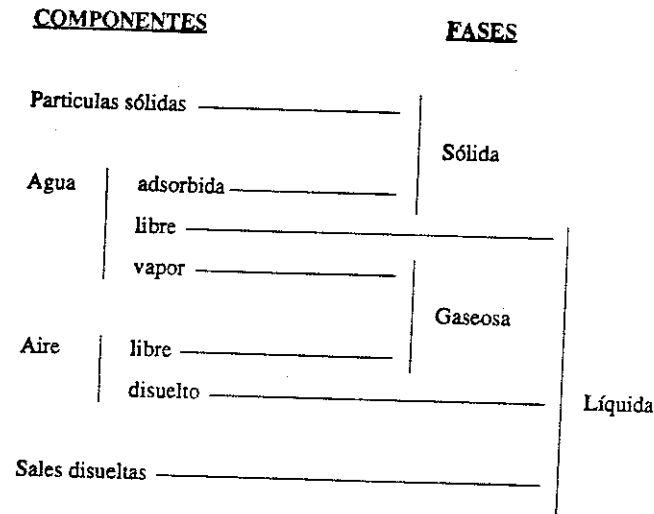


FIGURA 2.1 .- *Especies y fases presentes en el suelo no saturado (Yoshimi y Osterberg, 1963)*

2.2.2 NIVELES E IMPORTANCIA DE LA ESTRUCTURA EN LOS SUELOS NO SATURADOS

La influencia de la estructura del suelo sobre sus características resistentes y deformacionales ha sido reconocida desde los inicios de la Mecánica de Suelos. Ya Terzaghi y Casagrande avanzaron ideas sobre la microestructura y su papel en determinados comportamientos. Si es importante en los suelos secos o en los saturados aún lo es más en los parcialmente saturados, en los que la geometría y composición interna del suelo controlan la cantidad de agua que será retenida bajo una determinada succión. A su vez esa agua "a succión" influirá en el comportamiento mecánico. Fredlund et al. (1987) consideran que un mismo suelo en dos situaciones con distinta estructura (densidad seca inicial diferente, por ejemplo) debe ser considerado como si de dos materiales distintos se tratara, en cuanto a

definición de la envolvente de rotura.

En un suelo se pueden distinguir varios niveles de estructura implicando agrupaciones primarias, secundarias y terciarias de partículas básicas, según Barden (1972 a). Dicho autor señala de manera simplificada la existencia de una macroestructura y de una microestructura. Por otro lado Trollope (1970) distingue tres niveles de estudio: el *macroscópico* (de escala métrica); el *mesoscópico*, a nivel de partícula de grava, arena, limo o compuesto de arcilla; y el *microscópico*, a base de cristales, moléculas o átomos. En medios granulares existe una cierta tendencia a denominar microscópicos a los estudios a escala de partícula, aunque según Trollope serían mesoscópicos. En esta tesis se utilizará indistintamente la denominación "micro" o "meso" para referirse al nivel de estudio de partículas "independientes" de suelo (los granos en el caso de arenas o limos y ciertas agregaciones en el caso de arcillas) sin entrar a distinguir separadamente sus componentes mineralógicos.

Ejemplo de características macroestructurales son las juntas y fisuras, la alternancia de estratos y otros detalles geológicos que influyen en el comportamiento ingenieril (resistencia, drenaje). Los estudios microestructurales son fundamentales para entender algunas propiedades y comportamiento básicos de los suelos (por ejemplo el hinchamiento de arcillas).

Inicialmente pensando en arcillas distribuidas homogéneamente, se establecieron dos tipos extremos de microestructura, de comportamiento dispar: estructura floculada (reticulado en panal o "castillo de naipes") y estructura dispersa (Lambe, 1958 a; Seed y Chan, 1959).

En base a una serie de observaciones con microscopio electrónico de barrido sobre muestras de suelos naturales y compactados (Barden y Sides, 1970; Barden 1972 a y b; Sides, 1972; McGown y Collins 1975; Collins, 1984), discutidas en Alonso et al. (1987), se establece que en los suelos no saturados la distribución interna generalmente no es homogénea. Los comportamientos de hinchamiento y/o colapso bajo cambios de humedad o de carga obtienen así una explicación más satisfactoria. En la figura 2.2 se incluyen de manera altamente esquemática algunas de estas disposiciones microestructurales. La fracción arcillosa puede encontrarse formando

una matriz más o menos homogénea (típica en suelos expansivos); o bien recubrir (“forrar”) la superficie de partículas mayores (Schuster, 1987), formando incluso conexiones entre ellas; o bien formar agregados de arcilla (“clusters”, “packets”, “pedal arrangements” o “crumbs”); Popescu, 1980; Pusch y Feltham, 1980) que pueden llegar a tener apariencia y tamaño granular. Se pueden concebir otras disposiciones, como por ejemplo las citadas en Kamon (1985). Las tres primeras subfiguras corresponden a estructuras relativamente abiertas, comunes en suelos colapsables, como se verá en el apartado 2.2.5.

La microestructura de un suelo está relacionada con la naturaleza y presencia relativa de sus componentes: atracciones electro-químicas y cationes intercambiables de las partículas arcillosas (que dependen de la presencia de agua); carga en superficie de las partículas granulares (generalmente negativa, debido a discontinuidad de la estructura cristalina). También depende la microestructura del origen o génesis del suelo: en los naturales, de las condiciones de deposición e historia posterior; en los artificiales, de las condiciones de compactación (energía y humedad).

En todo caso se deduce de los citados estudios que la microestructura será decisiva de cara al comportamiento deformacional de los mismos, frente a cargas exteriores y a cambios de humedad.

Esta estructura “multinivel” y en cierto grado heterogénea de los suelos concuerda con los estudios de porosimetría (distribución de tamaño de los poros) por intrusión de mercurio (ver por ejemplo García Bengochea y Lovell, 1981; Olson, 1985). Muchos suelos residuales y algunos compactados a humedades “bajas” (por debajo de la humedad óptima Proctor) tienen una distribución de poros bimodal (Sridharan et al., 1971; Juang y Holtz, 1986; figura 2.3). El pico superior correspondería a los poros entre los granos de limos y los agregados de partículas (son poros exteriores a éstos); y el inferior a los poros interiores a los agregados de partículas. Como se observa, estos últimos no se reducen al aumentar la energía de compactación, debido a que el agua a succión confiere una cierta rigidez a los agregados de partículas, manteniendo sus poros internos. También se pueden denominar “macroporos” (entre los agregados) y “microporos” (interiores a los agregados; ver por ejemplo Wood, 1979).

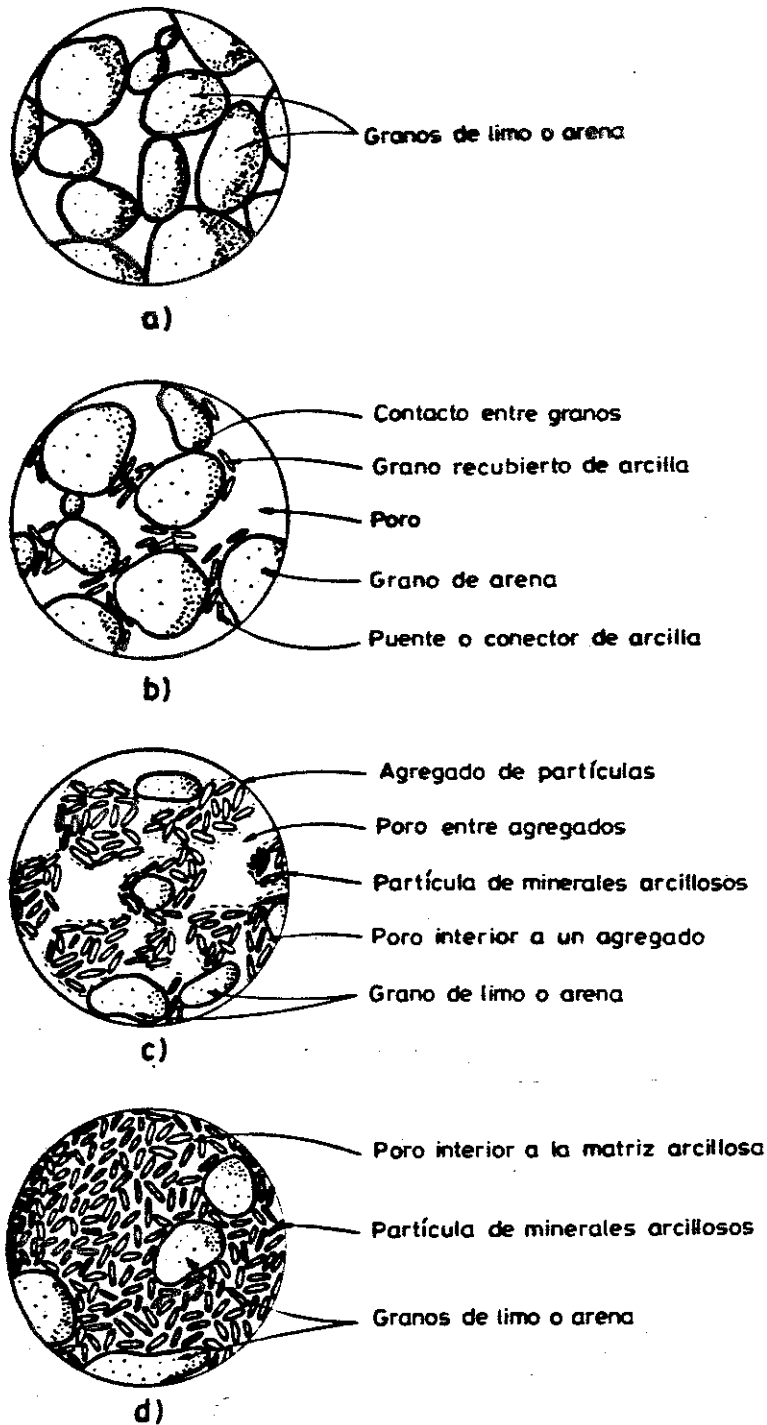


FIGURA 2.2 .- Algunas microestructuras en suelos no saturados (adaptado de Alonso et al. 1987).

a) Suelo granular no cohesivo (granos de arena fina o limo) prácticamente sin arcillas.

b) Esqueleto de arenas finas o limos con conexiones de arcilla entre las partículas.

c) Estructura formada predominantemente por un conjunto de agregados de partículas.

d) Matriz arcillosa bastante homogénea, integrada por partículas de minerales arcillosos y algunos granos aislados de arena o limo.

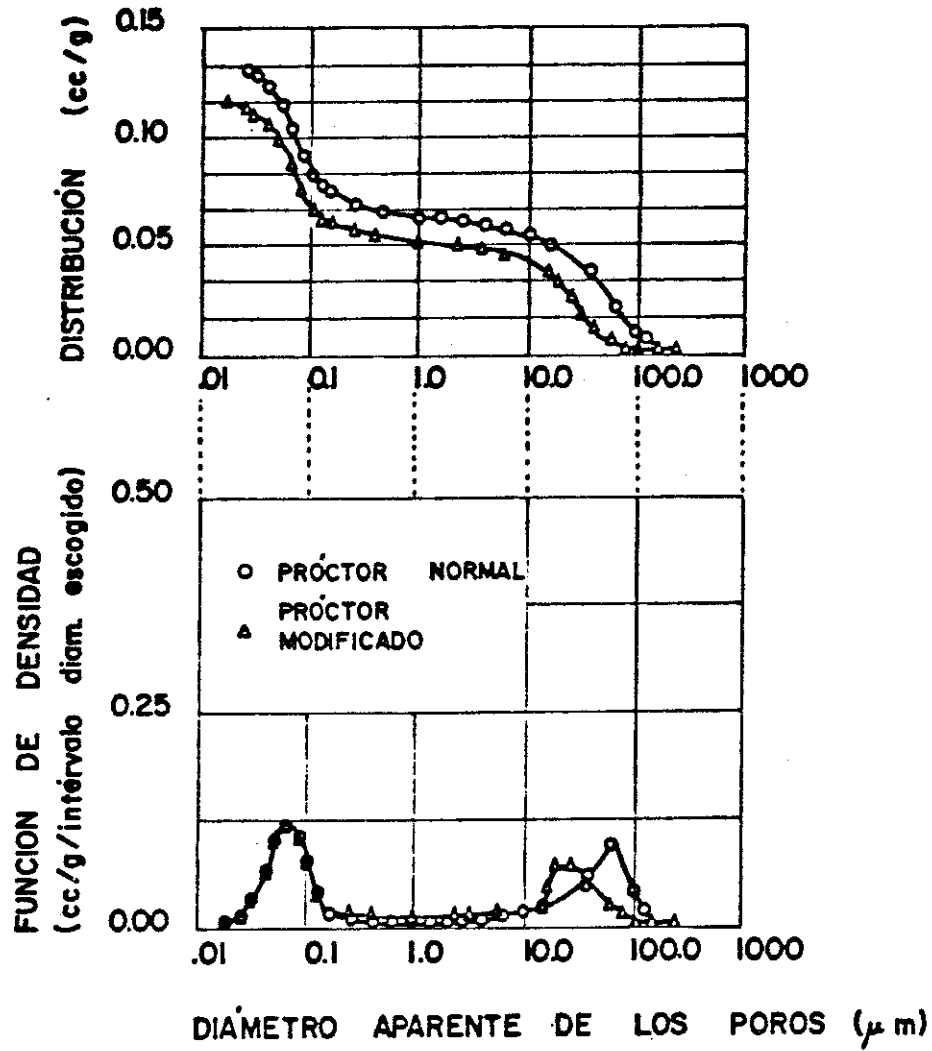


FIGURA 2.3.- Distribución bimodal de tamaños de poros. Mezcla de 70% arena de Ottawa y 30% caolín, compactada por el lado seco del óptimo Proctor (Juang y Holtz, 1986, adaptada por Josa, 1988).
 a) Distribución acumulada (intrusión de Hg).
 b) Función de densidad de poros.

En materiales eminentemente granulares (figura 2.2 a) la microestructura adquiere también una importancia capital. Aquí puede pensarse en estructura en un sentido más directamente geométrico, puesto que otras fuerzas de carácter físico-químico tienen menor importancia al ser inferior la superficie específica. En medios granulares, bajo las sollicitaciones habituales, cobra relevancia su naturaleza intrínsecamente discontinua, de manera similar a como en determinados casos el comportamiento y estabilidad de los macizos rocosos va a estar regido por las familias de juntas y fallas, importando menos, relativamente, la resistencia y deformabilidad de la roca matriz.

Las interacciones entre partículas se realizan en las zonas de contacto físico, por las que se transmiten fuerzas normales y tangenciales, incluso bajo cargas externas isotrópicas, debido a la estructura discontinua. Este mismo carácter discontinuo es el motivo por el cual unas determinadas partículas reciben mayores fuerzas en sus contactos, mientras que otras, vecinas o no muy distantes, se hallan prácticamente "descargadas" según la casuística local de estructura y contactos. Ello provoca la formación de auténticas "columnas" o "cadenas" de carga, caminos preferenciales a través de los cuales se transmiten los esfuerzos. El reticulado de cadenas de carga deja unas zonas o lagunas con partículas nada o muy levemente sollicitadas como se aprecia en la figura 2.4 (ver por ejemplo Dantu, 1966; De Josselin de Jong y Verruijt, 1969; Cundall y Strack, 1979 a; Kitamura 1981, a y b; Konishi, Oda y Nemat-Nasser, 1982).

Si inicialmente las fuerzas son moderadas, el comportamiento puede asemejarse al elástico. Pero al crecer se registrarán aplastamientos en las zonas de contacto que darán lugar a un primer tipo de deformaciones no recuperables. En este punto serán de interés: la granulometría (mayores aplastamientos en granos uniformes) y la compacidad del conjunto (mayores cargas a menor número de contactos por partícula); la forma y naturaleza de las partículas (si el material procede de machaqueo tendrá los bordes más agudos y microfisurados, y sufrirá mayores aplastamientos; así como los sufrirá si el mineral es más débil); y las presiones exteriores aplicadas (Jiménez Salas y Justo, 1975).

Una segunda fuente de deformaciones no recuperables serán las de reordenación

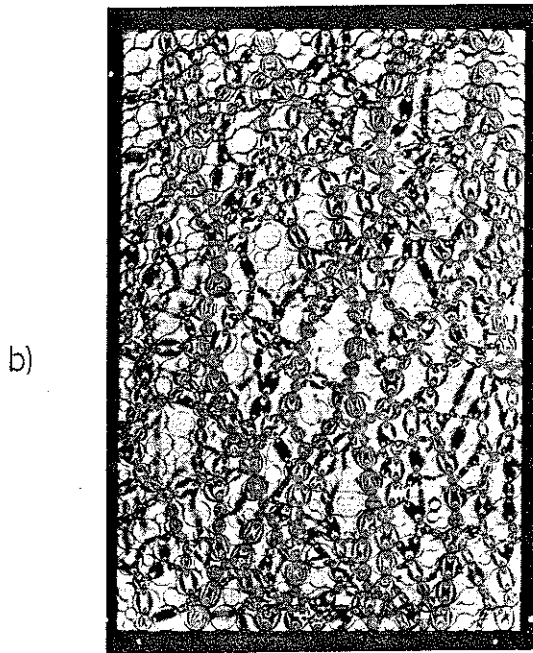
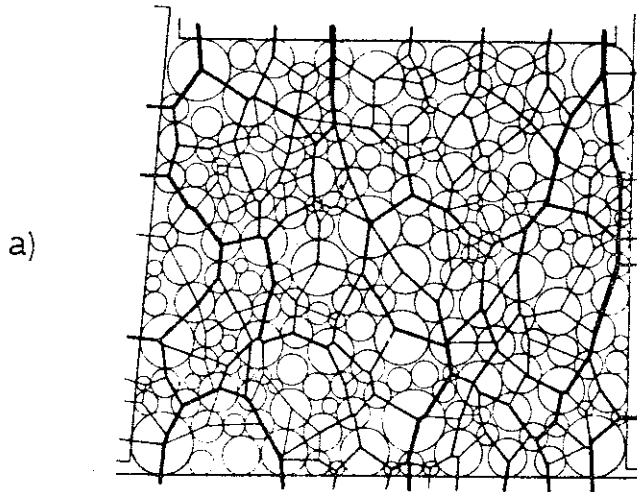


FIGURA 2.4 .- Distribución de fuerzas entre partículas obtenidas en modelos analógicos sobre discos fotoelásticos:
a) Josselin de Jong y Verruijt (1969).
b) Konishi et al. (1982).

geométrica de las partículas, si deslizan al superar la máxima fuerza a corte resistible en algunos contactos, o por rodadura de unos granos sobre otros. Estos movimientos vienen localmente determinados por la estructura relativa de los granos. Tenderán hacia una estibación más densa, creándose nuevos contactos por pandeo y bifurcación de las antes citadas "cadenas de carga". La reordenación será mayor o menor según la dirección principal de carga, puesto que la disposición geométrica es anisótropa debido en parte a la deposición, generalmente gravitacional. Es la anisotropía llamada natural o "inherente". En la figura 2.5, debida a Rodríguez Ortiz (1974), se aprecia una cierta tendencia a la disposición hexagonal (unos 30° con la vertical).

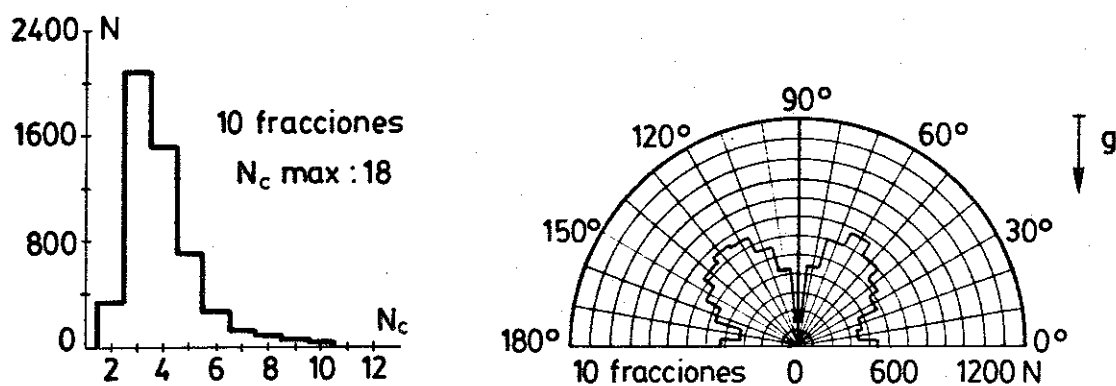


FIGURA 2.5 .- Distribución polar de frecuencias de orientación de las normales en los contactos en una simulación por ordenador de la deposición compacta de una arena con diez fracciones granulométricas (Rodríguez Ortiz, 1974).

La estructura varía dentro del mismo proceso de carga: se establecen nuevos contactos y se pierden otros existentes; los contactos se reorientan en orden a resistir el esfuerzo máximo o debido a rotación de la dirección principal de carga; las partículas, en definitiva, pueden reorientar su dimensión mayor, si no son esféricas. Esta variación puede introducir una anisotropía adicional, que dependerá de la historia de sollicitaciones (anisotropía inducida, según Nemat-Nasser, 1982; Jiménez Salas y Uriel, 1983).

Estas anisotropías afectarán a la deformabilidad del conjunto según la dirección de carga, y también a la resistencia a la rotura a corte. La única manera de conocer esta influencia es mediante un seguimiento detallado de la orientación de las partículas, de los contactos, etc. Este conjunto de información sobre la geometría interna del suelo ("fabric") y sobre los esfuerzos transmitidos es lo que debe englobarse dentro del término general "estructura". Si se quiere además estudiar la evolución de las dos fases restantes será importante el conocimiento de los huecos asociados, enmarcados por las partículas (poros).

Todas estas particularidades hacen difícil, si no imposible, el estudio en los términos usuales de mecánica del medio continuo ideal (donde no existen espacios vacíos). Su esquema de trabajo (condiciones de equilibrio, ecuaciones constitutivas, condiciones de compatibilidad) falla al ser aplicado a medios discontinuos, puesto que la compatibilidad entre tensiones y deformaciones depende marcadamente de la estructura local del medio, como se ha venido argumentando. Los campos de tensiones y de desplazamientos no son continuos, y considerarlos así equivale a ignorar el papel de la estructura.

De todas formas, para resolver problemas prácticos no se puede considerar en detalle la estructura exacta del medio, y se debe trabajar con conceptos como el "REV" ("Representative Elementary Volume") para promediar las propiedades del medio, la porosidad por ejemplo (Bear, 1972). Este concepto ha sido muy fructífero. Se ha empleado también en estudios de suelos no saturados (Ozanam, 1988, es un ejemplo reciente de ello). En todo caso, una descripción exclusivamente en términos de porosidad es insuficiente y por ello si se quiere construir una relación constitutiva general deberá incluirse en ella algo similar a un "tensor de estructura" (Satake, 1982; Tobita, 1983; Oda, 1985). Cuanto más capaz sea este tensor de seguir los cambios de geometría y estructura, mejor será la relación constitutiva general.

2.2.3 VARIABLES RELEVANTES EN LA DEFINICION DEL ESTADO TENSIONAL DEL SUELO

En el concepto de Tensiones Efectivas introducido por Terzaghi para suelos saturados se establece que la tensión efectiva, σ' , es igual al exceso de la tensión total aplicada, σ , por encima de la presión intersticial p_w :

$$\sigma' = \sigma - p_w \quad (2.1)$$

El comportamiento de cambio de volumen y resistencia al corte del material depende exclusivamente de esta tensión así definida. Se ha comprobado que para la mayor parte de los casos prácticos el análisis en tensiones efectivas es válido para suelos saturados. También por extensión se ha encontrado aplicable para suelos casi-saturados (con aire en forma de burbujas ocluidas).

En suelos no saturados, Bishop (1959) planteó un principio análogo:

$$\sigma' = \sigma - p_a + \chi(p_a - p_w) \quad (2.2)$$

donde χ dependería en principio del grado de saturación (S_r).

Suponía que una sola tensión, combinación de las tensiones presentes, podría describir el comportamiento del suelo no saturado.

En los años siguientes se verificó que dicha ecuación (u otras similares) se ajustaba de forma razonable al comportamiento de algunos suelos no saturados para grados de saturación altos, superiores a uno crítico (dependiente del tipo de suelo, Aitchison, 1960).

Casi inmediatamente se empezó a comprobar que su valor práctico era limitado debido a la extrema dependencia del parámetro χ respecto a la estructura del suelo, los cambios cíclicos de humedad y las variaciones de carga, incluso para un mismo

suelo (Lambe, 1960). Es decir χ dependía de la historia de carga y humedecimiento. La ecuación 2.2 se ajustaba a estados de rotura en determinados suelos; por ejemplo en los no saturados compactados, de estructura más o menos simple y conocida. Pero para otros ensayos no cercanos a las condiciones de rotura (por ejemplo los de cambio de volumen), en los que la estructura juega distinto papel, debía cambiarse el valor de χ a emplear en la ecuación de Bishop.

Uno de los puntos claves que ponen en entredicho la existencia de una expresión de la tensión efectiva en términos similares a los de la ecuación 2.2, es su no adecuación para explicar el colapso. Este fenómeno es característico de algunos suelos no saturados bajo determinadas circunstancias de carga y humedad, y se tratará en 2.2.5. Al humedecer una muestra, la succión ($p_a - p_w$, diferencia entre las presiones de agua y de aire) se reduce, e incluso se anula si la inundación es total. El parámetro χ según los valores normales deducidos experimentalmente puede aumentar pero sólo ligeramente en la mayoría de los casos. En conjunto pues la tensión efectiva, σ' , según la ecuación 2.2 disminuye. Consecuentemente el suelo debería aumentar de volumen cuando en realidad, en el colapso, éste se reduce (Jennings y Burland, 1962).

Para ajustarse a valores de colapso, χ debería tener un cambio de valor brusco. Así pues depende del tipo de ensayo y de la trayectoria de tensiones seguida. En algunos casos la ecuación 2.2 introduce una nueva incógnita, χ . Por este motivo puede decirse que la citada expresión de tensiones efectivas en suelo no saturado deja de ser una ecuación puramente tensional y de obligado cumplimiento y se convierte en una ecuación de tipo constitutivo, que incluye de manera solapada características propias del material, especialmente su estructura. No ayuda así a hacer predicciones generales sobre el comportamiento del suelo, porque justamente χ depende de ese comportamiento.

Paulatinamente se fue reconociendo que las dos tensiones que se intentaba combinar en la ecuación de Bishop (tensión exterior neta aplicada, $\sigma - p_a$, y succión, $p_a - p_w$) eran de naturaleza distinta en tanto en cuanto afectaban al comportamiento deformacional y resistente del suelo de diferente manera (Bishop y Blight, 1963; Blight, 1965; Burland, 1965) Este último autor razonaba la diferencia de actuación de las dos tensiones citadas basándose en la figura 2.18. La existencia de una tensión

efectiva puede ser cierta en los suelos saturados o casi-saturados, en los cuales el agua ocupa continuamente los poros; pero no en los típicamente no saturados, en los cuales la estructura juega un papel fundamental debido a que el agua se ceñirá al esqueleto. Un incremento de la tensión exterior produce en general cambios en las fuerzas intergranulares normales y tangenciales, y en algunos puntos se producirán deslizamientos. Un aumento de la succión cuando el agua esté en forma de meniscos entre los granos (figura 2.18 b), producirá esencialmente aumentos de la fuerza normal intergranular (actúa como si se tratara de unos “tensores” manteniendo a los granos juntos, como se verá en el capítulo 6). Como hay diferencias sustanciales en la transmisión al esqueleto de los cambios de $\sigma - p_a$ o $p_a - p_w$, no pueden combinarse equivalentemente ambas tensiones en una efectiva del tipo de la ecuación 2.2.

En este sentido, Aitchison (1967) ya relacionaba el cambio de volumen de una muestra con los valores de la tensión aplicada y de la succión, por separado, para evitar el empleo del coeficiente χ .

Matyas y Radhakrishna (1968) concebían unas “superficies de estado” sobre los dos ejes tensionales citados. Estas superficies definían el estado del suelo, en términos de grado de saturación (S_r) e índice de poros (e), para una sollicitación tensional dada en el plano $(\sigma - p_a) \times (p_a - p_w)$. Una vez caracterizadas experimentalmente, estas superficies ayudan a determinar el volumen del suelo y su humedad frente a cambios tensionales (camino o historias de carga) siempre que la tensión exterior externa, $\sigma - p_a$, crezca monóticamente y la succión disminuya. Este tratamiento permite observar respuestas de colapso si la estructura del suelo así lo propicia.

Sin embargo, cuando los incrementos tensionales no son en el sentido indicado el suelo evidencia una cierta histéresis. El estado del suelo resulta dependiente del camino tensional seguido, o si se quiere las superficies de estado no son únicas.

En el mismo sentido Fredlund y Morgenstern (1976, 1977) determinan el estado del suelo en función de lo que denominan dos variables (independientes) de estado tensional, que pueden ser:

$$\sigma_{ij} - p_a \cdot \delta_{ij} \quad ; \quad (p_a - p_w) \cdot \delta_{ij}$$

$$\sigma_{ij} - p_w \cdot \delta_{ij} \quad ; \quad (p_a - p_w) \cdot \delta_{ij}$$

$$\sigma_{ij} - p_a \cdot \delta_{ij} \quad ; \quad \sigma_{ij} - p_w \cdot \delta_{ij}$$

Cualquier par de ellas es adecuado para definir el estado tensional que afecta efectivamente al estado del suelo. Las ecuaciones de estado por ellos formuladas y que relacionan una serie de variables dependientes (e y S_r) con las variables de estado (o independientes), son equivalentes a las nombradas superficies de estado. Concuerdan razonablemente bien con sus ensayos sobre limos y arcillas, siempre que se sigan trayectorias tensionales monotónicas.

Actualmente se tiende a utilizar el primer par de tensiones especialmente cuando se dan resultados experimentales basados en la técnica de traslación de ejes (Matyas y Radhakrishna, 1968; Escario y Saez, 1973; Fredlund y Morgenstern, 1976; Escario, 1980; Lloret, 1982; Maswoswe, 1985; Lloret y Alonso 1985; Josa 1988).

Es un paso en la dirección correcta de acuerdo a Maswoswe (1985), que también señala:

“Desafortunadamente, el uso de dos variables compromete el tipo de predicciones que se pueden llevar a cabo. La mayoría de ecuaciones que se han propuesto para seguir el cambio de volumen en suelos no saturados no han sido totalmente satisfactorias. Claramente son necesarios más estudios experimentales para probar los conceptos y las teorías propuestas”.

El desarrollo de *nuevas hipótesis de comportamiento constitutivo* de los suelos no saturados reales es un camino abierto, seguido por ejemplo por Josa et al. (1987), Alonso et al. (1987) y por Josa (1988).

También son interesantes otros estudios básicos que ayuden a comprender el efecto de la tensión externa y de la succión en el comportamiento físico de los suelos, camino en el que se enmarca el presente trabajo y que se expone en capítulos siguientes.

2.2.4 SIGNIFICADO FISICO DE LA SUCCION

Como ha quedado establecido en el epígrafe anterior una variable relevante en la definición del estado tensional del suelo (y por ende en su comportamiento deformacional) es la succión. Como prerequisite a cualquier consideración posterior debe definirse qué se entiende por succión y cuales son sus componentes, que también influirán en el flujo de agua en el suelo.

Los primeros trabajos encaminados a determinar el papel del agua intersticial en el suelo se enmarcaron dentro de la Física del Suelo y la Agronomía, a finales del siglo pasado. Desde los principios de la Mecánica de Suelos se reconoció la importancia del agua en el comportamiento del suelo saturado o en el parcialmente saturado.

El sistema agua-suelo no es conservativo. Sistema conservativo sería aquel capaz de almacenar el trabajo que recibe. En ese caso dicho trabajo no se pierde por intercambios (fricciones, calor, etc.) y la energía potencial almacenada es igual al trabajo suministrado. Paralelamente el trabajo desarrollado por el sistema entre dos situaciones puede hallarse por diferencia de la energía potencial entre los dos estados extremos con independencia del camino seguido para pasar de uno a otro. En estos términos puede asegurarse y verificarse experimentalmente que el sistema suelo-agua no es conservativo: depende de cómo se le suministra el trabajo para que tenga una u otra energía final (Kirkham y Powers, 1972). A pesar de ello se han definido unos ciertos potenciales para el agua en el suelo. Según dichos autores se pueden distinguir cuatro: Potencial gravitacional, potencial de presiones hidrostáticas, potencial osmótico y potencial de adhesión. Según otros autores los tres últimos se pueden agrupar en uno denominado potencial capilar.

Más adecuada es sin embargo la terminología que se adoptó desde 1965 y que se recoge por ejemplo en Aitchison (1965), en Aitchison et al. (1966), y en Krahn y Fredlund (1972). Básicamente se asumieron las definiciones establecidas ya por la Sociedad Internacional de Ciencias del Suelo (International Society of Soil

Science). El potencial total del agua en el suelo (ψ_t) se consideraba como suma de cuatro contribuciones: Potencial matricial o estructural (ψ_m); Potencial osmótico o de solutos (ψ_o); Potencial gravitacional (ψ_g); y Potencial debido a la presión del gas circundante (ψ_p).

Los potenciales que dependen directamente del agua (ψ_m y ψ_o) y no de su posición, (ψ_g), o de la presión externa (ψ_p), dan paso al concepto de succión total del suelo (s): Es igual a la presión (relativa a la presión de gas externa actuando sobre el agua del suelo) a la que se ha de someter al agua pura de un recipiente para que esté en equilibrio con el agua intersticial del suelo al ponerlas en contacto, mediando entre ambas una membrana semipermeable (permeable al agua e impermeable a las sales disueltas en el agua intersticial). Se puede considerar igual a dos términos: Succión matricial (s_m) y succión osmótica (s_o), que se corresponden con sus respectivos potenciales:

$$s = s_m + s_o \quad (2.3)$$

La succión matricial se definiría en idénticos términos que la total exceptuando que el agua del recipiente es de composición idéntica al agua intersticial del suelo. Al tener que ser igual la concentración de soluto entre ambos líquidos, la separación entre ambos deberá ser permeable a la circulación de sales.

El término restante de succión osmótica será por tanto igual a la presión relativa que deberá aplicarse a un recipiente con agua pura para que esté en equilibrio con el agua de otro recipiente de composición igual a la intersticial del suelo, mediando entre ambos una membrana semipermeable.

Como la tendencia normal del agua será a "ser succionada", para que se registre equilibrio se le deberá aplicar una presión relativa negativa (tracción en relación a la presión de gas ambiente). Las succiones sin embargo se consideran definidas como positivas.

En la figura 2.6 se muestra una visión esquemática de los dos términos de la succión total en un suelo ideal, medidos escalonadamente con un tensiómetro. En este caso las succiones vienen representadas por la altura de columna de agua equivalente.

Es de notar que la succión total puede identificarse con el potencial total definido anteriormente cuando son nulos los correspondientes potenciales debidos a la gravedad y a presión de gas circundante. Los potenciales se definen en términos de energía por unidad de volumen de agua, mientras que al hablar de succión nos referimos a la presión a la que equivale dicho potencial y que nace de él.

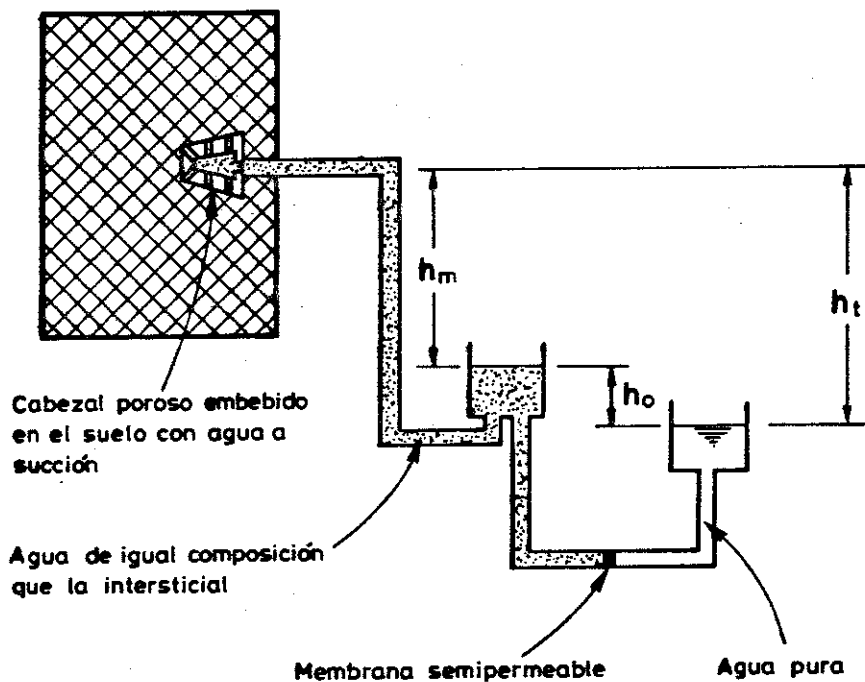


FIGURA 2.6.- *Visión esquemática de los términos matricial (h_m) y osmótico (h_o) de la succión total de un suelo.*

La succión matricial suele asimilarse a la diferencia de presiones entre el aire y al agua del suelo (definidas como condiciones impuestas o medidas en el contorno de una fracción de suelo)

$$s_m = p_a - p_w \quad (2.4)$$

Esta succión nace físicamente de los fenómenos de tensión superficial que combinados con la gravedad (cota por encima de una determinada superficie de referencia) y con

fenómenos de adhesión (entre el agua y las superficies sólidas del suelo) definen la capacidad de la matriz del suelo a retener la fase líquida de sus poros (agua, sales y gases disueltos).

Una interpretación simple y tradicional de la succión matricial es la que la asocia a fenómenos capilares de ascensión de agua a través de los pequeños poros o conductos delimitados dentro del esqueleto sólido (gracias a la tensión superficial actuando en la interfase aire-agua). Los suelos así tendrán menos humedad a mayor altura sobre el nivel freático, tomado como origen de ascensiones capilares. Es decir, a mayor succión "ambiental" podrán retener menor cantidad de agua. La forma general de las curvas denominadas de retención de humedad puede verse en la figura 2.7.

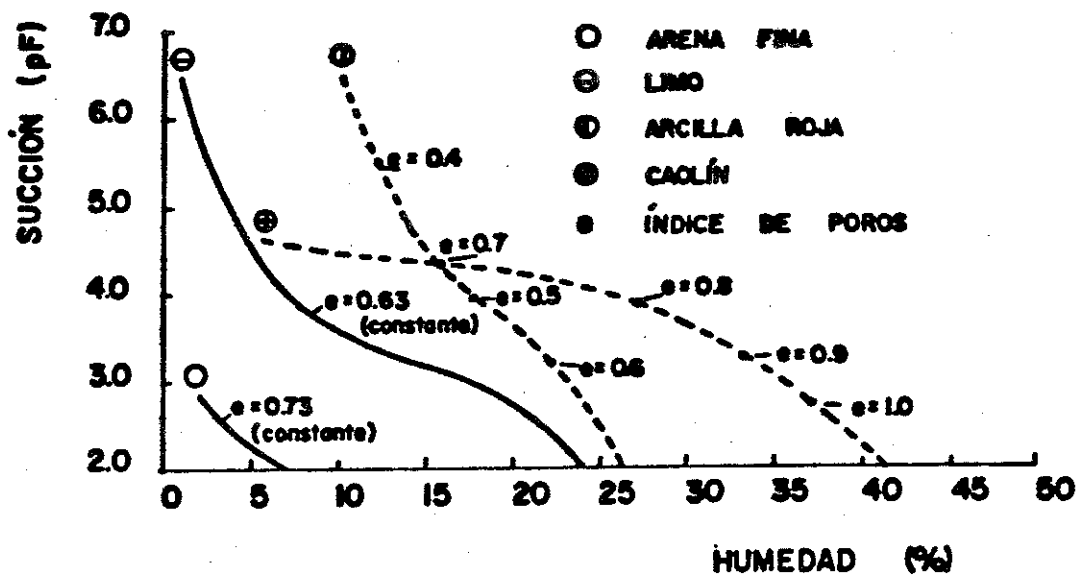
La succión matricial que desarrollará un suelo para humedades cambiantes estará íntimamente relacionada con la estructura del mismo: tamaño, gradación y naturaleza mineralógica de los granos, y, especialmente, tamaño de poros. Esta dependencia también se puede apreciar en dicha figura. En general cuanto más fino es el material, mayor es la humedad retenida para una succión determinada.

Los materiales de naturaleza arcillosa, compresibles, varían su índice de poros como consecuencia de la variación de succión, y de las fuerzas a ella asociadas, transmitidas al esqueleto sólido. En estos materiales la interpretación de la succión matricial como fenómenos capilares no es completa, al ser importantes los fenómenos de adhesión agua-suelo a escala microscópica (Jiménez Salas, 1958). Para caracterizar el estado global de humedad del suelo será suficiente conocer cualquier par de valores entre los tres grupos siguientes: humedad en peso (ω); índice de poros o porosidad (e o n); grado de saturación (S_r). El tercero se podrá deducir de:

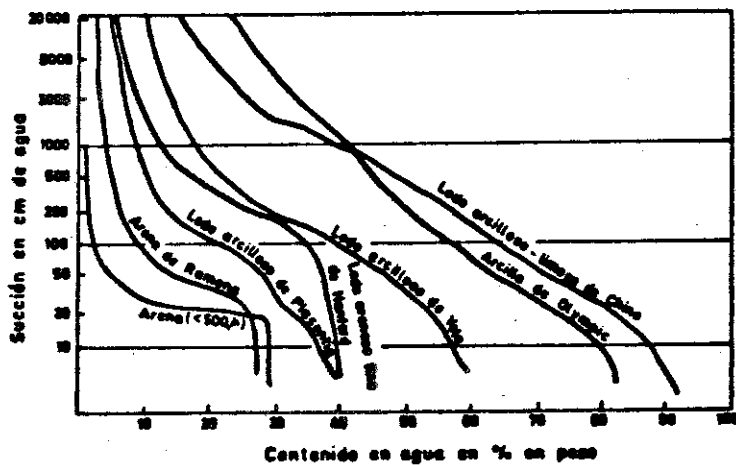
$$S_r = \frac{\omega \gamma_s}{e \gamma_w} \quad (2.5)$$

siendo γ_s y γ_w los pesos específicos de las partículas de suelo y del agua respectivamente.

En la figura 2.7, y frecuentemente, la succión en ordenadas viene expresada



a)



b)

FIGURA 2.7.- Curva de retención de humedad para algunos suelos compresibles e incompresibles:

a) Según Aitchison (1956), adaptada por Josa (1988).

b) Según Klute (1969), adaptada por Custodio y Llamas (1983).

como “potencial F” (pF) que se define como

$$pF = \log_{10}(h) \quad (2.6)$$

donde h es la columna de agua equivalente a la succión, expresada en centímetros.

Pueden existir succiones significativas incluso en suelos predominantemente granulares con bajos contenidos de arcilla siempre que el material o fracción fina esté bien distribuída en el suelo. Toll et al. (1987) encuentran que este es el caso incluso en algunos materiales cuarcíticos o lateríticos, macroscópicamente calificables como gravas. En sus trabajos también detectaron como la estructura puede determinar diferencias de succión en el mismo suelo y con la misma humedad pero con distinta historia de drenajes y humedecimientos. Este es un efecto ampliamente referenciado en estudios agronómicos y de mecánica de suelos (ver por ejemplo Croney et al., 1958; Poulouvassilis, 1962). Se conoce como *histéresis* de la curva de retención de humedad. Para una misma succión la humedad del suelo será mayor si se está secando desde una situación más húmeda que si se está humedeciendo desde una situación más seca. Esta histéresis es importante en agricultura, pero también lo será para el tratamiento ingenieril, por cuanto una misma succión podrá corresponder a dos humedades y dos comportamientos distintos.

Para el estado de saturación la succión matricial es nula ($p_a = p_w$), aunque el agua pueda someterse a tracción. Para grados de saturación altos, con el aire ocluído en forma de burbujas, también es difícil definir la succión al ser p_a inmedible.

La succión osmótica nace de la diferencia de concentración de sales entre el agua intersticial y el agua pura (relacionada con la presión osmótica). El agua del suelo, con determinada cantidad de sales disueltas, puede “succionar” agua pura libre si se pone en contacto con ella. De manera equivalente, se puede considerar el agua de los poros a una tensión igual a la presión osmótica producida por esas sales disueltas (Lambe, 1958 b). Si el agua está en forma continua se tenderá a un *equilibrado* de concentraciones por circulación de agua y de sales. Si el estado del suelo es tal que el agua no forma una fase continua, sino que está aislada en meniscos, angosturas y microporos, las masas de sales cautivas en esas zonas aisladas serán constantes. La diferencia de concentraciones producirá distintos descensos de la presión de vapor, y

se puede suscitar una transferencia de humedad vía fase gaseosa por este motivo.

Debido a los términos matricial y osmótico, un suelo a determinada succión total tendrá tendencia a absorber agua libre si se pone en contacto con ella. En este sentido, Aitchison (1956) definía el suelo no saturado como "aquel que en sus condiciones de presión externa, puede absorber agua adicional si se le suministra libre de aire y a la presión atmosférica". Y viceversa, el suelo podrá retener agua intersticial frente a fuerzas que de otra manera la extraerían como las debidas al potencial gravitatorio, o a una hipotética presión de aire que intentara desplazar al agua. Los métodos para medir la succión del agua de un suelo se describen comparativamente en Aitchison et al. (1966). Los más sencillos son el tensiómetro (en la línea del de la figura 2.6, para succiones menores de una atmósfera; Barbee, 1986) y la membrana de presión; ambos miden la succión matricial.

En base a principios termodinámicos (concretados en la ecuación 3.10, conocida como de Kelvin) el potencial total del agua puede ser obtenido midiendo la presión parcial del vapor de los poros (humedad relativa) mediante técnicas psicrométricas. Como la presencia de solutos reduce la presión de vapor de agua de equilibrio, así como lo hace la succión matricial, la succión que se mide con dichas técnicas es la total. En un suelo desecado hasta humedades bajas las mediciones con psicrómetro se pueden traducir en succiones muy altas (3000 Kp/cm^2 o más). Tensiones de esta magnitud son incompatibles con la misma "resistencia" del agua libre a tracción (como se verá en el capítulo 3). Así no debe considerarse que existe una cierta masa de agua a esta succión, sino que debe interpretarse como una medida del esfuerzo con el que el suelo retiene a cada molécula de agua. En esos términos la succión debe ser considerada meramente como un índice de la afinidad que desarrolla el suelo por el agua (Custodio y Llamas, 1983; Blight, 1967).

Existe una cierta controversia sobre en qué grado cada componente de la succión total gobierna el comportamiento mecánico del suelo. En Alonso et al. (1987) se presentan comparativamente las contribuciones que en un u otro sentido dan diversos autores, apoyados por determinaciones experimentales. La medición separada y fiable de los dos tipos de succión constituye una dificultad adicional en estas consideraciones (Krahn y Fredlund, 1972; Edil y Motan, 1984). La succión osmótica es generalmente

menor que la matricial. Si suponemos al suelo en determinada situación de equilibrio bajo potencial total de agua constante, suponiendo cota constante ($\psi_g = cte.$) y presión de aire constante ($\psi_p = cte.$), un aumento de la succión osmótica vendrá acompañado de una disminución de la succión matricial. En este sentido Yong y Warkentin (1965) detectan disminuciones de la resistencia al aumentar la succión osmótica del suelo, y ésto puede ser interpretado en el sentido de que la disminución paralela de la succión matricial es la responsable de que baje la resistencia.

Existen varios mecanismos físicos conceptuales para ver como la tracción mayor o menor del agua (mayor o menor succión matricial) influye en el comportamiento mecánico del suelo (meniscos rigidizando los contactos entre partículas, etc.) en tanto que no existen para la succión osmótica. Unos ensayos triaxiales llevados a cabo por Blight (1983) denotan que las envolventes obtenidas dependen claramente de la succión matricial y no de la succión osmótica. La succión osmótica lo que sí que provocará es flujo de agua intersticial producido por gradientes de concentración de sales. Este autor indica al respecto que el camino de actuación de la succión osmótica puede ser el señalado: indirectamente, al provocar variaciones en la humedad del suelo y en la succión matricial.

Aparte de variar la presión osmótica del agua intersticial, las sales disueltas pueden tener efectos físico-químicos sobre la capa doble de las partículas arcillosas. Así el tipo de soluto (básicamente el catión) puede influenciar el comportamiento del suelo. Pero no a través de un efecto mecánico producido por la presión osmótica. Los ensayos de Richards et al. (1984) parecen demostrar efectivamente que en el hinchamiento de unas muestras arcillosas influye más el tipo de sal que su concentración.

De todas estas evidencias e indicaciones, Alonso et al.(1987), aun aceptando que el tema está abierto y que las sales pueden tener gran importancia en el comportamiento deformacional, concluyen que en última instancia éste vendrá regido por la componente matricial de la succión, $p_a - p_w$, en la línea de otros autores (por ejemplo Fredlund, 1979, y Blight, 1983).

2.2.5 ALGUNOS COMPORTAMIENTOS PECULIARES DEL SUELO NO SATURADO

Nuevamente sin afán exhaustivo, se pasa revista a continuación a algunos comportamientos característicos de los suelos no saturados que les dan una cierta complejidad en relación a los saturados.

En los suelos saturados el índice de poros es constante si la tensión efectiva también lo es. En cambio, si por cualquier causa se modifica el grado de saturación, un suelo no saturado puede experimentar deformaciones volumétricas, a igualdad de carga exterior. Para una posición fija en el eje de la carga exterior ($\sigma - p_a$) se pueden encontrar distintas situaciones del suelo al cambiar la succión ($p_a - p_w$). Estos fenómenos de cambio de volumen son por ello típicos de los suelos no saturados.

El incremento de la succión produce deformaciones *plásticas irreversibles*, que contribuyen a una rigidización del suelo frente a cargas exteriores, y a un cierto efecto de "preconsolidación aparente" frente a las mismas (Dudley, 1970). El efecto rigidizador de la succión también se traduce en un aumento del módulo de deformación frente a sollicitaciones de corte (Richards, 1978; Brull, 1980). Este aumento del módulo no puede ser indefinido porque para succiones muy altas al suelo estará prácticamente seco. Wu et al. (1984 y 1985) encuentran en efecto que este aumento tiene un máximo para un grado de saturación entre el 10% y el 20% para varios limos y arenas.

La succión también aumenta la resistencia a esfuerzo cortante de los suelos no saturados, como ya se ha esbozado en 2.2.3 al tratar del desarrollo de tensiones efectivas en suelos no saturados. Fredlund et al. (1978) propusieron el siguiente criterio de rotura para suelos no saturados:

$$\tau = c' + (\sigma - p_a) \tan \phi' + (p_a - p_w) \tan \phi_b \quad (2.7)$$

Esta envolvente de rotura es lineal con la succión a través del ángulo ϕ_b que

puede variar extensamente según el tipo de suelo, desde valores bajos hasta valores del mismo orden que ϕ' . Como orden de magnitud, Josa (1988), compendiando diversas referencias en suelos arcillosos, recoge valores desde los 12° hasta los 32° (Escario, 1980; Gulhati y Satija, 1981) moviéndose ϕ_b entre el 40% y el 80% de ϕ' . Adicionalmente ese ángulo parece ser ligeramente dependiente del tipo de ensayo y de la densidad seca. Esto último vendría explicado por el hecho de que a diferentes densidades la estructura puede ser distinta; la trayectoria tensional "real" seguida por el suelo en un mismo tipo de ensayo puede ser diferente debido a esta modificación de la estructura.

La linealidad de efectos que se supone en 2.7 debe limitarse a rangos concretos de variación de las tensiones relevantes ($\sigma - p_a$) y ($p_a - p_w$). El incremento de la resistencia al corte no puede crecer indefinidamente con la succión, como ha sido apuntado por diversos autores (Alonso y Lloret, 1985; Escario y Saez, 1986), y comprobado con ensayos a corte directo con succión controlada por Escario (1987). En el capítulo 4 de esta tesis se justifica este hecho con una aproximación a nivel de contacto. En el caso extremo de suelo seco la envolvente de resistencia debe tener una cierta similitud con la del caso saturado. Por estos motivos el efecto de la succión debe decrecer a partir de determinado valor del grado de saturación, reduciéndose con él. Es posible sin embargo que estas situaciones sean más secas que las usuales en la práctica ingenieril.

Alonso et al. (1987) concluyen que ecuaciones como la 2.7 no serán válidas mas que para limitados rangos de la tensión y la succión. Esto puede ser más que suficiente en muchos casos reales en los cuales dichas tensiones varían en un intervalo relativamente reducido.

Los cambios de volumen notables que se pueden dar bajo determinadas circunstancias en los suelos no saturados al variar sólo la succión, se conocen con el nombre de *hinchamiento*, si aumenta el volumen, o de *colapso*, si se reduce drásticamente. Su estudio, y la determinación del potencial expansivo o bien de colapso, es importante, puesto que las deformaciones volumétricas que implica, integradas a lo largo de un cierto espesor de material pueden suponer movimientos considerables "en superficie". Estos levantamientos o bien estos asientos pueden

causar importantes daños sólo por variaciones de condiciones ambientales (por ejemplo de humedad al variar la infiltración o la evapotranspiración sobre un terreno) directa o indirectamente relacionadas con la actividad humana (excavaciones, construcciones en superficie, rotura de conducciones de agua, etc.).

Conviene aclarar que aquí nos referimos al colapso por variación de la succión. Se ha de distinguir, por ejemplo, de la consolidación por aumento de carga, por cuanto en el colapso no se precisa incremento de carga, el suelo admite agua y no la expulsa, y en general es rápido.

Según Barden et al.(1969), Dudley (1970) y Popescu (1986), para que se registren estas deformaciones volumétricas por cambio de succión se han de dar las siguientes circunstancias:

- a) Estructura no saturada potencialmente inestable: En el caso del colapso el esqueleto sólido ha de tener una estructura abierta para que pueda reducirse el volumen.
- b) Las cargas deben ser adecuadas para que se dé una cierta situación metaestable: no han de ser excesivas en el caso del colapso; y para el hinchamiento han de ser suficientemente bajas, para permitir que se desarrolle.
- c) Algún mecanismo latente de deformación que se movilice al inundar total o parcialmente el suelo. En el caso de colapso este mecanismo consistirá en algún tipo de estabilización temporal del contacto entre partículas. Para el hinchamiento deberá contarse con una microestructura que sea capaz de aumentar de volumen en presencia de agua.

La existencia de suelos no saturados que cumplan en mayor o menor grado estas condiciones es relativamente frecuente, sobre todo en climas áridos. En estas regiones se centra buena parte del desarrollo humano actual y no es de extrañar que los problemas asociados a las deformaciones indeseables antes descritas hayan propiciado una creciente atención hacia este tipo de fenómenos, su predicción y corrección (Sultan, 1969; Dudley, 1970; Clemence y Finbarr 1981; Popescu 1986)

Un tipo de suelo en el que tradicionalmente se han estudiado y descrito estructuras metaestables proclives el colapso corresponde a las arenas finas y a los limos (loess) eólicos (transportados y/o depositados por la acción del viento; Maswoswe, 1985). Este es el origen más común de los suelos colapsables. Otros modos de deposición pueden dar lugar a otras estructuras metaestables, como en los suelos depositados por inundación aluvial en determinadas condiciones ambientales (composición relativa de tamaños, iones presentes etc.). También lo pueden ser: los suelos residuales generados a partir de otros, o de rocas, por meteorización (química o por arrastre de iones o de finos); los yesos y otros suelos de grano fino con algún tipo de cementación débil en los contactos; algunos de origen volcánico; y los rellenos hechos por el hombre (presas de tierra, terraplenes, rellenos, etc.). En España tenemos ejemplos en la Ribera del Ebro (loess yesíferos, Jiménez Salas et al., 1973) y en otras localizaciones y materiales (por ejemplo de origen volcánico en Canarias, Uriel y Serrano, 1973).

En relación a la condición c), algunos *mecanismos de estabilización temporal* del contacto entre partículas concebidos por Dudley (1970) y Barden et al. (1973) y descritos en Clemence y Finbarr (1981) son los que aparecen en la figura 2.8.

Un primer tipo de estabilización temporal se basa en el efecto de la tensión superficial. Como se discute en el capítulo 4 los meniscos que se pueden formar entre partículas sólidas de tipo limo o arena fina incrementan la fuerza normal entre ellas; y esto hace más resistente y menos deformable al conjunto frente a las sollicitaciones exteriores. La interfase aire-agua puede enlazar dos partículas o englobar un conjunto de otras menores, como en la segunda subfigura. Dada la natural gradación de tamaños de algunos suelos, determinadas zonas o fracciones del mismo mantendrán sus poros saturados (con el agua "suspendida" pero en forma aún continua) mientras que en otros poros de mayores dimensiones ya habrá "entrado" el aire. Para una determinada deficiencia de presión del agua respecto al aire, estas "fracciones saturadas" registrarán una ligazón, equivalente a una compresión "radial" o isotrópica, que puede ser de efecto más importante que la de los meniscos concretos entre pares de partículas (Aitchison y Donald, 1956). Las fuerzas transmitidas por los meniscos de agua pueden ser varios órdenes de magnitud mayores que los pesos de las mismas partículas. Esta relación aún aumenta al reducirse el tamaño de las

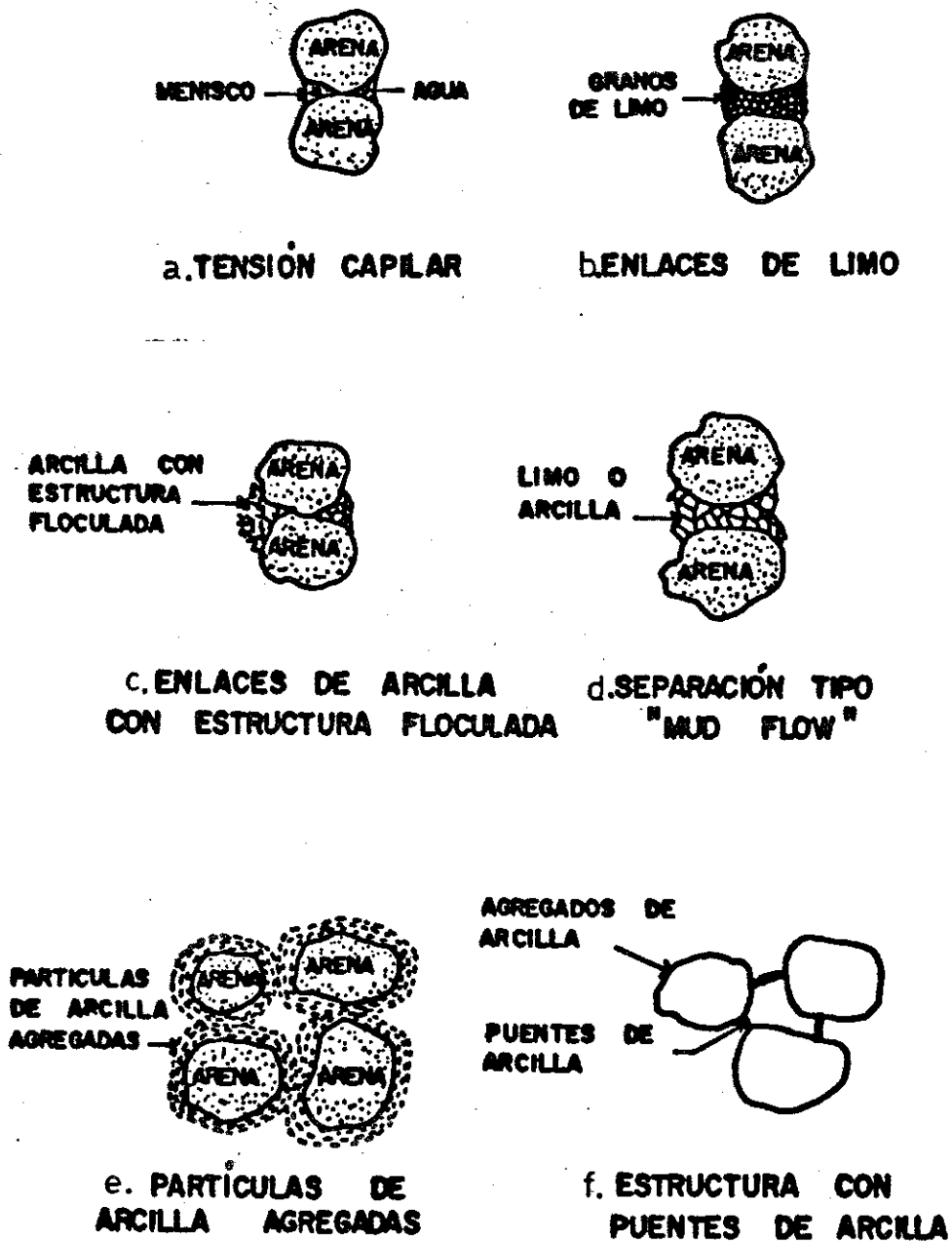


FIGURA 2.8 .- Mecanismos de estabilización temporal del contacto entre partículas en suelos colapsables (Dudley, 1970; Barden et al., 1973; Clemence y Finbarr, 1981; adaptada por Josa, 1988).

partículas, como se verá en el anejo A1. La fuerza intergranular debida al agua y la debida a la carga exterior pueden ser del mismo orden en el caso de suelos finos y cargas ligeras.

Sin embargo a medida que el tamaño de las partículas se reduce y entramos en el "calibre" arcilla, otras fuerzas crecerán en importancia: las de atracción molecular sólido-sólido y sólido-líquido, de tipo Van der Waals. Así un segundo tipo de estabilización temporal entre partículas es la formada por partículas arcillosas. Estas pueden presentarse como ordenamientos paralelos o floculados en los contactos, o como agregados que unan otras partículas mayores, formando en ocasiones una especie de puentes entre ellas, como se ha comentado en 2.2.2. La existencia de una u otra disposición depende de la estructura cristalina original de las partículas arcillosas, de su origen y de las sales que puedan estar presentes. Los efectos capilares debidos a la tensión superficial pueden ser aún considerables si por encima del "puente" de arcilla, con cierta agua constitutiva absorbida, existe una superficie curvada "libre" entre el agua y el aire de los poros. Esta situación puede registrarse incluso a humedades "globales" bajas. Las uniones a base de arcilla pueden perderse o desorganizarse al ser humedecido el suelo, produciéndose el colapso.

Un tercer tipo de estabilización temporal, que no está incluida en la figura 2.8, sería la cementación, generalmente de origen calcáreo, que ayudaría a mantener una estructura abierta. La disolución de esta cementación, aunque normalmente lenta, puede llevar al colapso. La existencia de sales u otros contaminantes puede influir en el desarrollo (velocidad y alcance) del colapso que se registre, tanto para el enlace temporal por cementación como por puentes de arcilla entre partículas (Jiménez Salas et al., 1973).

A través de los contactos entre partículas del suelo se transmiten esfuerzos normales y tangenciales. La fuerza tangencial máxima antes del colapso se verá incrementada por el mecanismo estabilizador temporal, sea cual sea. Al inundar, se disipa su efecto y se registrarán movimientos de deslizamiento relativo en orden a encontrar el equilibrio perdido. Si la estructura es abierta el resultado final macroscópico será el fenómeno del colapso.

Burland (1961) y Knight (1963) muestran que en este proceso las arenas y los limos tienden a una rama de consolidación noval (única) del suelo saturado. Maswoswe (1985) indica la misma tendencia en limos arcillosos. No se producen colapsos adicionales, si no se registran aumentos del grado de saturación por encima del S_r del último colapso (Josa, 1988).

El mecanismo de relajación de tensiones capilares será el que en general producirá colapsos más abruptos y es el que se considera generalmente aceptado como principal responsable del colapso en suelos de grano fino no cohesivos (arenas finas, limos o loess de baja plasticidad; Dudley, 1970; Maswoswe, 1985). Con el modelo que se presenta en este trabajo se va a comprobar que la relajación de la succión puede provocar apreciables colapsos.

En un suelo relativamente cercano a la saturación determinadas acciones (por ejemplo pequeños movimientos cíclicos o de corte, sin drenaje) pueden producir también un aumento de la presión intersticial. Es importante establecer cual es la trayectoria tensional "real" seguida por el suelo. En algunos casos se explica el colapso como una verdadera rotura "global" del suelo (Holtz y Hilf, 1961), al disiparse las presiones intersticiales negativas cuando se inunda la muestra. En el plano (p' , q) la trayectoria de tensiones efectivas se trasladaría "en horizontal" ($q = cte.$) hacia la envolvente de resistencia del material. Aceptando una ecuación como la 2.2, esta "traslación" sería de valor igual a $\chi(p_a - p_w)$ (con χ probablemente cercano a la unidad). El suelo, según dichos autores, alcanzaría un estado de rotura generalizado, por corte (al llegar a la envolvente de rotura), que se traduciría en los desplazamientos verticales típicos del colapso.

En algunos casos particulares, en arcillas, se ha invocado a determinadas estructuras floculadas para explicar el colapso.

Sin embargo no son éstos los procesos que generalmente conducen al colapso. Maswoswe (1985), mediante cuidadosos ensayos con control de succión en una mezcla de caolín y arcilla, ha determinado que las trayectorias de tensiones en colapso (en términos de $\sigma - p_a$ y $p_a - p_w$) no cortan la envolvente de rotura. Por este motivo concluye que el colapso no es debido a una rotura global por "agotamiento" de las

tensiones globales, sino a deslizamientos tangenciales por agotamiento de la fuerza resistible a nivel de contacto entre partículas, en la línea de lo descrito, y a las subsecuentes reorganizaciones conducentes a una estructura más densa. También Barden (1972b) cree que el responsable del colapso es la mesoestructura (comentado en 2.2.2), confirmando la sugerencia de Jennings (1967) en el sentido de que el colapso en arcillas es esencialmente debido a las reordenaciones de agregados de partículas en forma de "granos".

Está claro que en la inmensa mayoría de los suelos naturales o artificiales existirán arcillas en mayor o menor proporción que tendrán un papel unas veces clave y otras de matiz. Los minerales arcillosos, y agrupaciones de ellos, si pueden absorber agua libremente, expanden. El hinchamiento es el resultado de complicados procesos de interacción entre el agua intersticial y la microestructura de los minerales arcillosos del suelo. A grandes rasgos se puede decir que hay dos mecanismos o niveles básicos implicados (según Gillot en Popescu, 1986): hinchamiento intercrystalino (entre agrupaciones de monocristales), e hinchamiento intracrystalino, característico de los minerales arcillosos de tipo montmorillonítico (en los cuales entra el agua entre las láminas individuales que forman los monocristales). No se va a profundizar aquí en los mecanismos, variables y procesos que influyen en el hinchamiento, por cuanto el estudio que se lleva a cabo se centra en materiales granulares no cohesivos (de nula o baja plasticidad), encontrándose una excelente revisión de todos esos extremos en Josa (1988) y en Alonso et al. (1987) por ejemplo.

En todo caso a continuación se expondrán algunas peculiaridades de los fenómenos de hinchamiento, recogidas de dichos autores.

La *tensión exterior* aplicada al suelo potencialmente expansivo controla el valor total del hinchamiento que registra al variar su succión. Al aumentar la carga aplicada se reduce la expansión. La mayor parte del hinchamiento se registra para valores bajos de la succión.

Por otro lado la mayoría de materiales arcillosos de baja plasticidad, o incluso media, presentan un *comportamiento combinado* de hinchamiento y colapso al saturarlos (Jiménez Salas y Justo, 1975): si la carga exterior es suficientemente

baja expanden; y si es relativamente alta colapsan. La historia de humedades, succiones y carga del suelo es fundamental para el futuro comportamiento. Se ha comprobado que este acoplamiento entre el hinchamiento y el colapso tiene lugar para cualquier variación de succión. A escala microestructural, las agrupaciones de partículas arcillosas o los puentes descritos pueden expandir si disponen del agua necesaria para satisfacer su afinidad por ella. A escala mesoestructural, la relajación de determinados enlaces entre partículas puede dar paso a reorganizaciones.

La combinación de los dos cambios "microvolumétricos" puede resultar en un comportamiento aparente global de uno u otro cariz. Probablemente la separación convencional entre comportamientos de hinchamiento y comportamientos (o materiales) colapsibles sea artificiosa para muchos suelos y circunstancias reales.

2.3 EVOLUCION DE LOS ESTADOS DE HUMEDAD DE UN SUELO

Si tomáramos muestras a distintas alturas de una columna de suelo eminentemente granular no saturado o si fuéramos sometiendo a una muestra de suelo a succiones crecientes, iríamos obteniendo distintas situaciones del aire y del agua en el suelo, al variar la humedad y el grado de saturación. En cada estado, unas fuerzas y fenómenos tendrán mayor importancia que otros, y la mayor o menor presencia de agua definirá una mayor o menor conductividad hidráulica.

El suelo por debajo del nivel freático corresponde al estado saturado: todos sus poros están llenos de agua. Si nos situamos inmediatamente por encima de él, el agua, por continuidad, estará sometida a una cierta tracción. Sin embargo puede encontrarse un cierto espesor en el cual aún sigue ocupando de forma continua todos los huecos intersticiales, por fenómenos de capilaridad. A esta zona algunos autores la denominan capilar cerrada, y el suelo en ese estado puede considerarse casi-saturado, asimilándose su comportamiento al del suelo saturado.

Si continuamos ascendiendo, en función de las dimensiones de los poros

intersticiales, llegará un momento en el que algunos de ellos dejarán paso al aire que limitará con una interfase aire-agua sometida a tensión superficial. Progresivamente el número de poros conteniendo agua se irá reduciendo, manteniéndose “localmente saturados” sólo los menores. El agua en ellos forma un cuerpo más o menos continuo, y se conoce también como agua “funicular” (Custodio y Llamas, 1983) o “capilar”.

El suelo en este estado correspondería a la zona capilar “abierta”, que junto con la zona capilar cerrada constituirá lo que algunos autores denominan *zona de transición*, pudiéndose considerar al suelo como parcialmente saturado (Kovacs, 1981). El aire va ocupando progresivamente mayor número de poros. En algún caso pueden existir burbujas de aire aisladas (o, mejor, poros de aire no interconexiónados), pero muy pronto el aire formará conductos continuos (prácticamente desde grados de saturación del 0.8 ó 0.9, según Yoshimi y Osterberg, 1963). Irá aumentando la facilidad del aire para moverse bajo la acción de gradientes de presión (conductividad o permeabilidad relativa al aire). En ausencia de gradientes, y siempre que el drenaje lo permita, el aire mantendrá su presión igual a la atmosférica.

Si el examen del estado de humedad del suelo se hace por desecación o desaturación paulatina sobre una misma muestra de suelo, en algún momento, cuando nos encontremos cercanos a los estados de transición, el aire “entrará” en la probeta, ocupando algunos poros y desplazando al agua. Dado que las partículas del suelo son de tamaños distintos, agrupaciones aleatorias entre ellas aislarán o delimitarán distintos poros, o conductos, con diferente escala de dimensiones. De manera aproximada se puede usar la siguiente fórmula para relacionar la diferencia de presiones entre el aire y el agua (succión) que será necesario establecer para que el aire venza la oposición de la interfase (de tensión superficial σ_s) a su entrada en el suelo a través de un determinado conducto de dimensión típica D_{TIP}

$$p_a - p_w = \frac{4 \sigma_s}{D_{TIP}} \quad (2.8)$$

Esta fórmula también se utiliza en los estudios porosimétricos y es consecuencia inmediata de la ecuación de Laplace (4.2), que se presenta en el capítulo 4. Los poros con dimensiones intersticiales menores podrán retener su agua hasta más avanzado el proceso de desaturación.

Para una succión determinada los poros mayores contendrán ya aire, al haberse superado su "valor de entrada de aire" particular mientras que determinadas fracciones menores (huecos y capilares) mantendrán su interior localmente saturado aún. Si en un instante concreto un poro de determinado diámetro tuviera agua en su interior, y en sus inmediaciones existieran otros de menores dimensiones, el agua tenderá a desplazarse hacia estos últimos; debido a que en ellos las interfases aire-agua tendrán menores radios de curvatura y, según la citada ecuación de Laplace, mayores succiones, por lo que atraerán al agua. Un segundo mecanismo, aunque más lento, refuerza esta tendencia del suelo a retener el agua en sus poros menores. Como se verá en el capítulo 3, la presión de vapor disminuye con el radio de curvatura medio de los meniscos aire-agua; por tanto el agua tiende a evaporarse de los meniscos de mayor radio para condensarse en aquellos de radio menor (Yoshimi y Osterberg, 1963).

Si la gradación de tamaños de partículas del suelo es reducida el aire "entrará" en los poros de manera más o menos simultánea al rebasar un valor que se puede llamar de "entrada de aire" en el suelo, registrándose una gran variación de humedad para un cambio relativamente pequeño de succión. En suelos bien graduados la humedad muestra una variación más paulatina con la succión. En suelos con fracción arcillosa también es más suave la curva de retención de humedad (ver figura 2.7).

A partir de esa zona de transición, al ir aumentando la succión se entraría en un estado de suelo propiamente *no saturado*, en el cual pueden empezar a tener relevancia las fuerzas de adhesión (Kovacs, 1981). Determinados poros minúsculos pueden permanecer inicialmente aún saturados (agua denominada "pendular") pero el agua se encontrará principalmente en forma de meniscos alrededor de los contactos entre partículas, y en forma de películas de reducido espesor adheridas a la superficie de las partículas (agua "pelicular"). Las características de estas películas adheridas y de los meniscos se discuten en profundidad en los capítulos 3 y 4 respectivamente. Realmente existe una transición gradual desde el agua absorbida hasta el agua de los meniscos o de algunos poros saturados que puede moverse libremente bajo gradientes de potencial. A título indicativo se puede afirmar que en un suelo eminentemente granular existirán algunos meniscos aislados desde estados muy secos hasta grados de saturación relativamente altos (tal vez del 60%, muy variable con la estructura y

granulometría). Por otra parte, el menisco aislado será la tipología predominante de retención de agua (no adherida) por debajo aproximadamente de un $S_r = 20\%$.

El aire podrá circular libremente por los huecos del suelo siendo su presión igual a la atmosférica en circunstancias normales. Para una misma cota sobre el nivel freático, suponiendo que no existan diferencias de potencial debido a ósmosis, para alcanzar una situación de equilibrio de potencial total el agua se moverá por la fase líquida o como vapor hasta que en todos los meniscos la curvatura sea la misma (Yoshimi y Osterberg, 1963; Barden, 1965). Esta situación es la que se corresponde con el modelo de comportamiento desarrollado en esta trabajo. En los capítulos 3 y 4 se completará la descripción de los fenómenos implicados.

A partir de la anterior situación, la disminución de humedad para un aumento de succión es cada vez menor. Al ir ascendiendo por la curva de retención de humedad los meniscos irán reduciendo su entidad para conformarse, con curvaturas mayores, a la succión ambiental creciente (figura 2.9 recogida de Kirkham y Powers, 1972). Al disminuir sus dimensiones se entrará en el rango de acción de las fuerzas de adhesión, llegándose finalmente a estados de gran sequedad en los cuales el agua, si existe, no puede considerarse libre en absoluto y se encuentra exclusivamente en forma adsorbida a la superficie de las partículas sólidas (Lloret, 1982). En dicho estado no puede hablarse propiamente de la existencia de succión como diferencia de presiones de aire y de agua, y sólo puede definirse una cierta succión equivalente a través de la humedad relativa del aire (presión de vapor reinante dividida por la presión de vapor de equilibrio para esa temperatura) en el interior del suelo. En efecto, mediante técnicas psicrométricas se puede determinar la succión equivalente a la que debería someterse al agua libre de un recipiente para que en sus inmediaciones el aire tuviera una humedad relativa de presión de vapor igual a la del aire en el interior del suelo. Puede afirmarse que, en un suelo en este estado casi seco, no puede interpretarse la succión (matricial) como una diferencia mecánica de presiones de aire y de agua, dada la inexistencia de agua libre donde medir la segunda presión. Cualquier relación que incorpore el efecto de la succión matricial en el comportamiento mecánico del suelo presentará una discontinuidad en este estado, desembocando en el comportamiento del suelo seco, con estructura tal vez modificada por la historia de succiones.

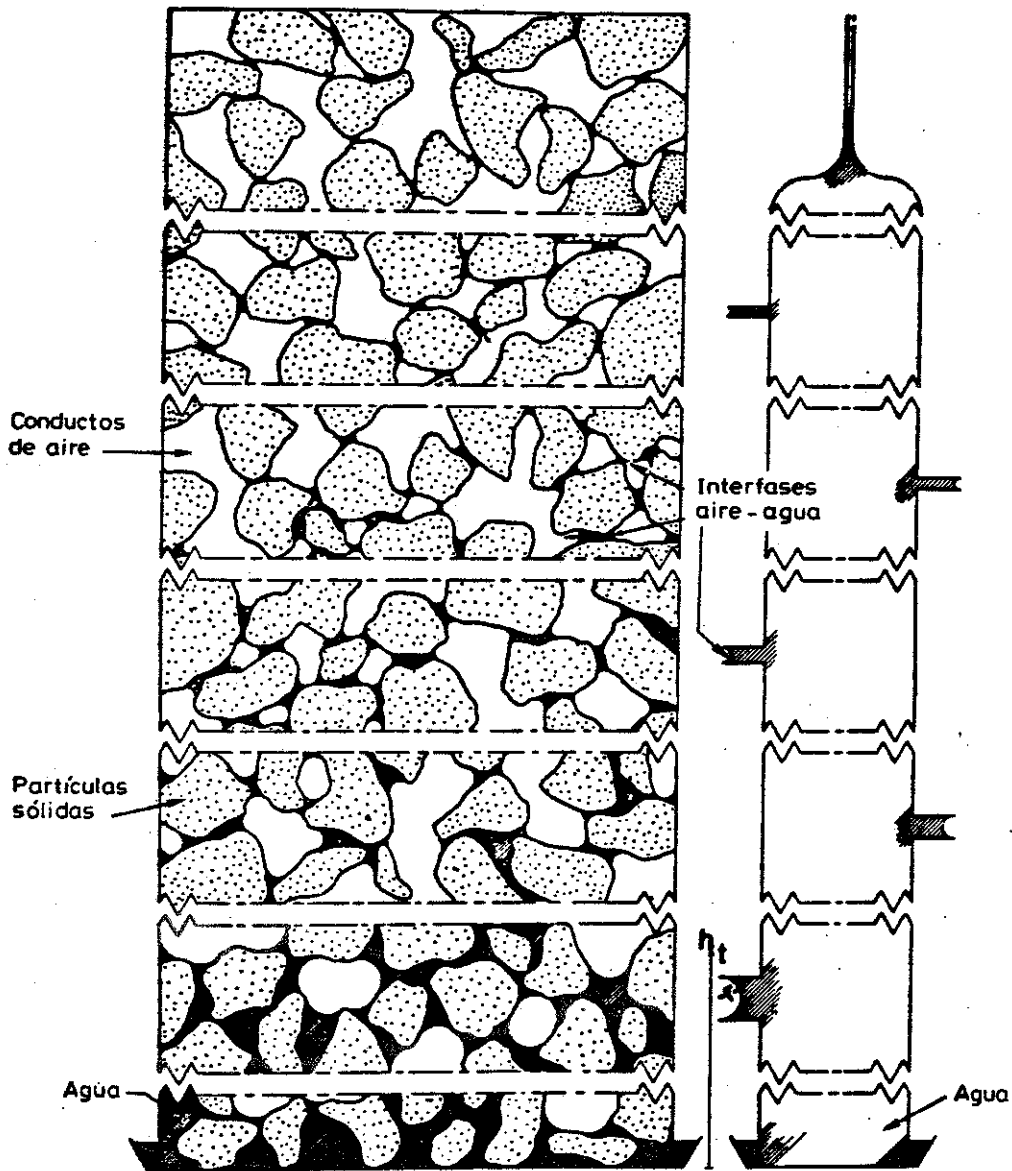


FIGURA 2.9 .- Curvatura de las interfases aire-agua en un suelo eminentemente granular al ir ascendiendo desde la zona saturada y por encima de la zona de transición (Gardner y Chatelain, 1947).

Diversos autores diferencian también varias situaciones de saturación del suelo. Por ejemplo Hryciw y Dowding (1987) al estudiar la resistencia en suelos no saturados (mediante penetrómetro de cono en relación a la mejora de terrenos con explosivos) distinguen fundamentalmente los tres estados de la figura 2.10. El estado (a) o de "agua aislada" se registraría a niveles bajos de humedad: la fase gaseosa es continua hasta la periferia del suelo mientras que el agua está recluída en meniscos. Al incrementar la humedad se llega a un estado intermedio en el cual cada fase puede ser continua a cortas distancias pero ninguna lo es de forma completa a lo largo de todo el suelo. En el tercer estado las burbujas de aire estarán atrapadas y el agua en forma continua.

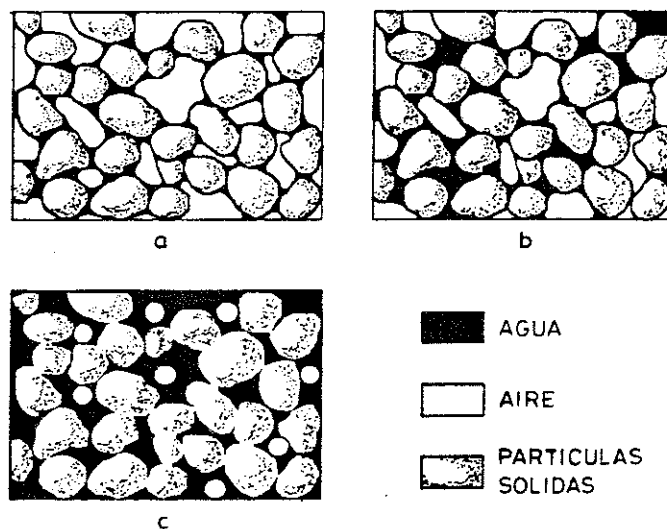


FIGURA 2.10 .- Tres sistemas aire-agua-suelo según Hryciw y Dowding (1987). a) agua aislada ("closed water"). b) semi-abierto ("bi-opened"). c) aire aislado ("closed gas").

Si desde la situación de suelo seco suministráramos agua al suelo, reduciendo su succión, volviéndolo a saturar paulatinamente, se irían recuperando los estados de humedad descritos. Sin embargo para una misma succión, la humedad del suelo será inferior a la que presentaba en el secado, fenómeno conocido como *histéresis*, y que

ya se ha comentado en el epígrafe 2.2.4. Se ha descrito anteriormente el mecanismo, basado en la tensión superficial, por el cual para un valor de la succión, el aire podrá entrar en un conjunto de poros. Al imponerse la misma succión no existe mecanismo simétrico que haga salir al aire, quedando dicha "fracción porosimétrica" sin agua cuando en el secado estaba "localmente saturada". De esta diferencia, que puede explicar la histéresis en la parte intermedia de la curva de retención de humedad y que se conoce como "efecto tintero", se habla también en el epígrafe 4.2. La histéresis en la parte más saturada suele atribuirse al aire que puede quedar atrapado en algunos poros en el proceso de imbibición de la muestra y también a la variación de volumen que haya podido experimentar el esqueleto en el ciclo de secado-humedecimiento, derivadas del efecto mecánico de la succión sobre el suelo (retracción) y del mismo flujo de agua al salir y entrar de los poros (Kirkham y Powers, 1972). Adicionalmente también producirán histéresis los cambios de estructura inducidos por variación de la carga exterior (si es que este ha sido el caso) (Alonso et al. 1987).

2.3.1 FLUJO EN MEDIO NO SATURADO

En cualquiera de los estados de humedad descritos pueden establecerse flujos de las especies presentes. De hecho es imprescindible que se registren flujos para pasar de un estado a otro. En la mayoría de los casos la entrada de agua en los acuíferos se produce a través del suelo no saturado. El estudio del movimiento del agua en el suelo no saturado es más complicado que en el caso saturado. El flujo puede venir provocado por gravedad, por capilaridad, por esfuerzos de adhesión, por ósmosis, por electro-ósmosis por termo-ósmosis, etc., de manera variable según la humedad del terreno. Los flujos pueden venir también provocados por diferencias de presiones externas de aire o de agua en los contornos del elemento en cuestión, con un efecto neto de transporte de masa de aire y de agua. Blight (1971) por ejemplo estudia el flujo de aire a través de depósitos de estériles de minería, no saturados. Por otra parte los flujos pueden ser debidos a reajustes *internos* por variación de las condiciones locales de presión o de saturación en el interior del suelo; este último tipo de flujo, a igualdad de condiciones externas muchas veces no tendrá efecto neto de transporte de masa de agua a través del contorno del suelo. Yoshimi y Osterberg (1963) encuentran que al cargar un suelo cohesivo no saturado del lado seco del óptimo Proctor, no hay salida de agua intersticial, y que el aire forma canalículos interconectados; en base a estos resultados establecen que las deformaciones diferidas se deben explicar por efectos reológicos del esqueleto más que por efectos hidrodinámicos, tipo consolidación.

Convencionalmente se puede distinguir entre aquellas aproximaciones al flujo desde un óptica macroscópica o desde una microscópica. En el primer caso se podrán suponer por ejemplo dos fases inmiscibles, con unas propiedades macroscópicas que representen el comportamiento promedio (permeabilidades equivalentes relativas globales), y aplicar leyes de tipo Darcy. En el enfoque microscópico el estudio de flujo puede realizarse a nivel de fuerzas y movimientos intra e inter-porosos.

Se entiende fácilmente que la aproximación macroscópica, que no distingue

partes diferenciadas dentro de un elemento del suelo, no podrá seguir debidamente los flujos internos, porque no considerará en detalle la geometría y las leyes a las que se atiene dicho flujo. También es cierto que para una aproximación microscópica a los flujos internos deberá considerarse la geometría interna del suelo (es decir su estructura interna) y las leyes locales de circulación de masas dentro de esta geometría.

Por diferencias de presión o de concentración podrán fluir las especies presentes en las fases del suelo no saturado esquematizadas en la figura 2.1 (incluyendo cambios de fase), en orden a alcanzar el equilibrio final. En el capítulo 3 se presenta un posible modelo conceptual de comportamiento del suelo eminentemente granular que incluye el tratamiento de flujos, internos y externos, desde un enfoque microscópico. En el resto de capítulos se implementa y se utiliza como modelo numérico de flujo y deformación.

De especial interés resulta el transporte del agua en el suelo no saturado. Este se llevará a cabo bajo gradientes de potencial total, definido en el epígrafe 2.2.4. En ausencia de gradientes de potencial osmótico, y para una misma cota, el flujo no tendrá lugar en la dirección de los gradientes de succión sino en la dirección de los gradientes de presión absoluta de agua. Ambos pueden ser distintos si la presión de aire no es la misma en todos los poros del suelo (Alonso et al. 1987). La migración de humedad, que también puede tener lugar en forma de vapor, incluso en condiciones globalmente isotermas, se prolongará hasta conseguir un potencial constante en todos los puntos. En una columna de suelo con los poros interconectados de manera que se pueda suponer la presión de aire en el equilibrio igual a la atmosférica, y suponiendo ausencia de potencial osmótico, el equilibrio (dinámico) final requeriría que la succión aumentara linealmente con la elevación por encima de un nivel de referencia (Kovacs, 1981). En muchas circunstancias, en el terreno natural nunca se alcanzará el equilibrio por causas climáticas (cambios de temperatura a lo largo del día y de las estaciones del año, precipitación, etc).

Como se ha comentado anteriormente para el suelo en estado casi seco la succión matricial, como diferencia de presión de agua y de aire, deja de tener sentido. También el potencial ψ_m , y los demás asociados al agua del suelo (ψ_g, ψ_o, ψ_p), dado

que el agua misma deja de existir como libre y continua. En este estado casi seco tendrá especial relevancia la circulación de vapor por diferencias de humedad relativa del aire, especialmente para grados de saturación por debajo del 20% (Grismer, 1986).

2.3.2 COALESCENCIA DEL AIRE EN EL SUELO

Algunas diferencias de comportamiento del suelo muchas veces se imputan a la presencia de *burbujas de aire* ocluidas o atrapadas en él. La no coincidencia en la curva de retención de humedad del grado de saturación de la rama de secado y de la de humedecimiento para succión nula, es un ejemplo de ello. También ciertas disminuciones de rigidez en la muestra inmediatamente antes de la saturación total se atribuyen a la presencia de burbujas (Wu et al. 1985). Existe una cierta controversia sobre la existencia y perdurabilidad de las burbujas en el suelo cercano a la saturación.

Los primeros estudios de las presiones de aire y agua en los suelos no saturados (Brahtz y Hamilton en 1939, citados por Hilf (1956), contemplaban la existencia de burbujas combinada con la ley de Boyle y la de Henry de disolución de gases en agua. Sin embargo asumían erróneamente que la presión del aire y la del agua coincidían, y no consideraban la presión de vapor y el efecto de la tensión superficial entre las fases, resultando en valores la presión de agua superiores a las medidas.

Según consideraciones del propio Hilf, las burbujas sólo pueden existir si el agua está saturada de aire. Por ello considera incompatible la existencia de burbujas con la existencia de poros llenos de aire: en estos últimos, la menor curvatura de la interfase resultará en una presión de aire menor que la del aire en las burbujas; éstas acabarán desapareciendo en la situación de equilibrio final, por disolución del aire en agua.

Yoshimi y Osterberg (1963) también consideran los canalículos de aire continuos prácticamente hasta saturación. Sin embargo Schuurman (1966) considera la existencia de burbujas para grados de saturación por encima del 85% de manera

general. Hryciw y Dowding (1987) también son favorables a su presencia (figura 2.10 c). Pasando al campo de la evidencia, en la figura 2.11 se puede ver la saturación incompleta de una columna de suelo debido a las burbujas ocluidas. La zona saturada aparece blanca, mientras que las cadencias grises indican la presencia de aire atrapado; el tono es proporcional al contenido de aire. En Williams (1967) se presentan también unas excelentes imágenes de burbujas micrométricas tomadas con microscopio sobre un suelo sometido a succiones variables en un dispositivo especial. Es evidente que las burbujas pueden existir en el suelo no saturado, aunque sea de manera transitoria y no sean estables a largo plazo.

Al ir aumentando la presencia de agua en el suelo las películas de agua sobre las partículas y los meniscos van aumentando su espesor hasta que obturan los canaliculos en forma de cuello de botella que comunicaban los huecos de aire. Como se verá en el capítulo 4, la evolución de una situación a otra se rige por una tendencia a adoptar disposiciones de energía libre (potencial total) mínima. Si dentro de los potenciales distinguidos anteriormente en ψ_t ($\psi_m, \psi_p, \psi_g, \psi_o$) consideramos cota constante e inexistencia de potenciales osmóticos quedan los debidos a la presión de aire, ψ_p , y el ψ_m , que integra los fenómenos de tensión superficial y de adhesión. El paso a la situación de burbuja ocluida vendrá influenciado pues por la interfase, por las fuerzas de adhesión y por las presiones del aire y del agua. Fredlund (1976) vaticina la formación de la burbuja cuando la presión de aire y del agua son muy similares.

En un primer instante si se considera el volumen total del poro invariable y el del agua también, el del aire deberá ser constante. Al serlo también la masa de aire, la presión de aire será la misma que antes de ocluirse (sensiblemente la atmosférica). Simples consideraciones de capilaridad resultan en una diferencia a través de la interfase de la burbuja (esférica) inversamente proporcional al radio de la misma. El agua localmente estaría a menor presión que antes de la oclusión (p_{wo}) y consecuentemente afluirá agua de las inmediaciones para restituir ese valor. Al hacerlo el aire de la burbuja aumentará la suya, por encima de la atmosférica de otros poros cercanos. Por disolución irá disminuyendo el aire de la burbuja, y su radio. Así aumentará nuevamente la presión de aire, con lo cual, autoacelerativamente, la burbuja irá disminuyendo (Fredlund, 1976). También Barden (1965) y Barends

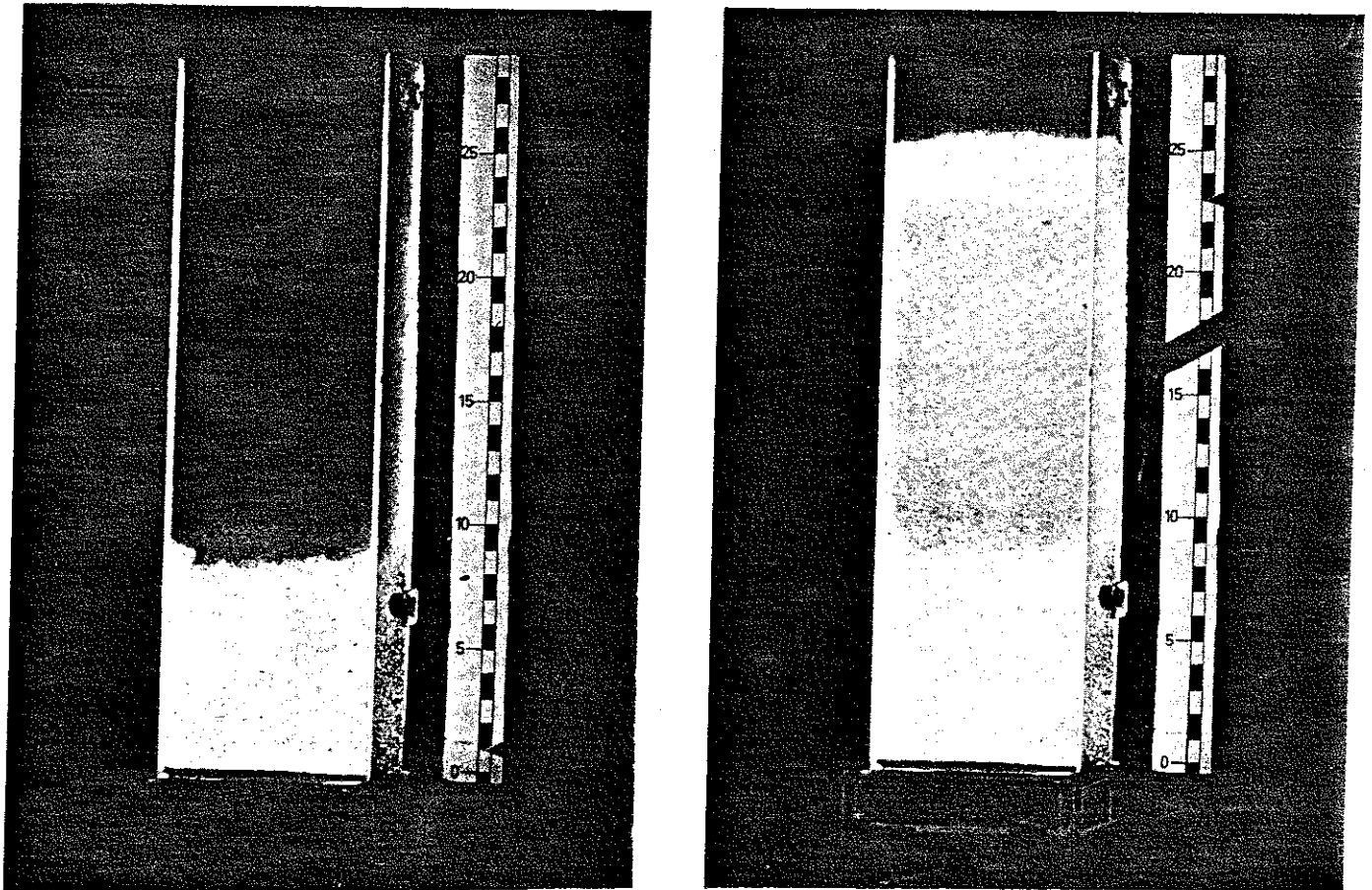


FIGURA 2.11 .- Saturación incompleta de una columna de suelo. Izquierda: saturado hasta 8 cm. Derecha: estado tras subir el nivel de agua. Las tonalidades grises indican la presencia de aire ocluido (Kovacs, 1981).

(1979) consideran que la presión de aire dentro de las burbujas se hace superior a la atmosférica. La diferencia de presiones a nivel local entre el aire de una burbuja y el agua no puede considerarse igual a la succión, por cuanto ésta se refiere a los valores generales de presión (tomados por ejemplo en el contorno de la muestra). La presión del aire de una burbuja, desligada de la anterior, es por otra parte inmedible. En este sentido Fredlund (1976) afirma que la importancia, desde el punto de vista ingenieril de las burbujas aisladas del suelo, se reduce a hacer más compresible la mezcla intersticial. Según Schuurman (1966) y Teunissen (1982) existe una presión de aire máxima para la cual la burbuja alcanza un tamaño crítico a partir de la cual "colapsa" (el aire se disuelve totalmente en el agua).

La clave para considerar la exacta situación de las masas aisladas de aire en el suelo es nuevamente la estructura del mismo. Vaughan (1987) (entre otros) considera la existencia de masas de aire ocluido en formas *no esféricas* (ajustadas al esqueleto sólido), para explicar el fenómeno de *coalescencia* o tendencia a la agrupación de las masas de aire en zonas mayores, ocupando casi completamente determinados poros, en lugar de estar en forma de burbujas menores aisladas. Así el radio de la interfase queda controlado por los intersticios del esqueleto en el cual se adentra, no por el tamaño de la burbuja. Como el aire de unos poros cerrados puede difundirse, por disolución, hacia otros de menor presión de aire, todas las "bolsas" de aire tenderán a tener la misma presión, la menor de las posibles, relacionada (a través de radios de curvatura "efectivos" similares en la ecuación de Laplace) con la presión de agua en su vecindad (igual en todos los puntos por continuidad de la fase líquida). En la figura 2.12 se muestra esta situación. La burbuja A, de radio constante r_A , es tangente a las partículas del esqueleto. La burbuja B, en un poro mayor, tiene la misma presión y el mismo radio equivalente, r_B , que ha conseguido adentrándose en los intersticios. La burbuja B es estable porque si aumentase su volumen disminuiría su r_B , aumentando su presión interior, con tendencia a difundir aire a otros puntos del suelo y a reducirse de nuevo; si por el contrario se contrae, r_B aumentaría, su presión disminuiría y reclamaría aire de otros poros para volver a su r_B inicial. Bien al contrario la burbuja A es metaestable: si se contrayera un poco por cualquier causa, disminuiría su radio, aumentaría la presión interior y tendería a perder progresivamente todo su aire por disolución hacia otros poros como el B. Por este motivo, en la situación de la figura, la burbuja A, tangente a las partículas, es la menor que puede existir. Todos los

poros mayores que el A van a estar ocupados por burbujas como la B, porque si tuvieran burbujas como la A, se habrían expandido, reclamando aire de otros poros, hasta adoptar una configuración como la B, estable.

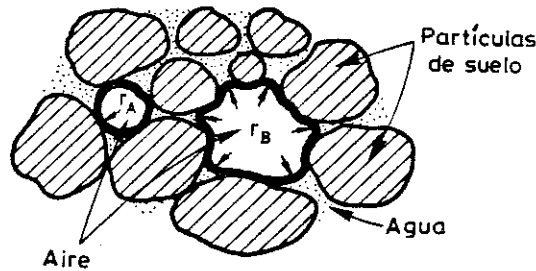


FIGURA 2.12 .- *Burbujas A y B en un suelo. La burbuja esférica A, tangente al esqueleto es metaestable. La B, no esférica, se adapta al esqueleto, y es estable (Vaughan, 1987).*

Así se razona el fenómeno de la coalescencia por el cual el aire tenderá a ocupar los poros mayores del suelo con formas no esféricas (no pudiéndose deducir su presión directamente de sus dimensiones, vía la ecuación de Laplace), y el agua se mantendrá de forma continua en los poros menores.

La coalescencia del aire en el suelo se puede apreciar directamente en la figura 2.13 o en el interesantísimo estudio microfotográfico de Williams (1967). En él se puede observar como unas burbujas de unas decenas de micras, interiores al suelo, inicialmente esféricas y con un radio mayor que el de las interfases agua-aire exterior, van creciendo gracias al aire que les llega de disolución. Al crecer tienden a penetrar en los intersticios y poros adyacentes hasta que las interfases de las burbujas tienen un radio equivalente similar a la de las interfases exteriores. En ningún caso detectaron la formación espontánea de nuevas burbujas por lo que se puede concluir que las burbujas que en un instante determinado quedan atrapadas transitoriamente en el

suelo, o bien desaparecen por disolución y difusión del aire, o bien tienden a adaptarse al esqueleto, agrupándose y ocupando los poros mayores, por coalescencia.

El tiempo para que se termine la fase transitoria y se complete el fenómeno de coalescencia, llegándose al equilibrio, puede ser largo. Williams (1967) precisó tiempos del orden de días. Lee y Black (1972) y Black y Lee (1973) emplearon tiempos de horas a días para disolver determinadas burbujas en tubos de drenaje de laboratorio. La baja permeabilidad del suelo y la difusividad reducida por el recinto exiguo que depara el esqueleto pueden contribuir a dilatar en el tiempo esta fase transitoria.

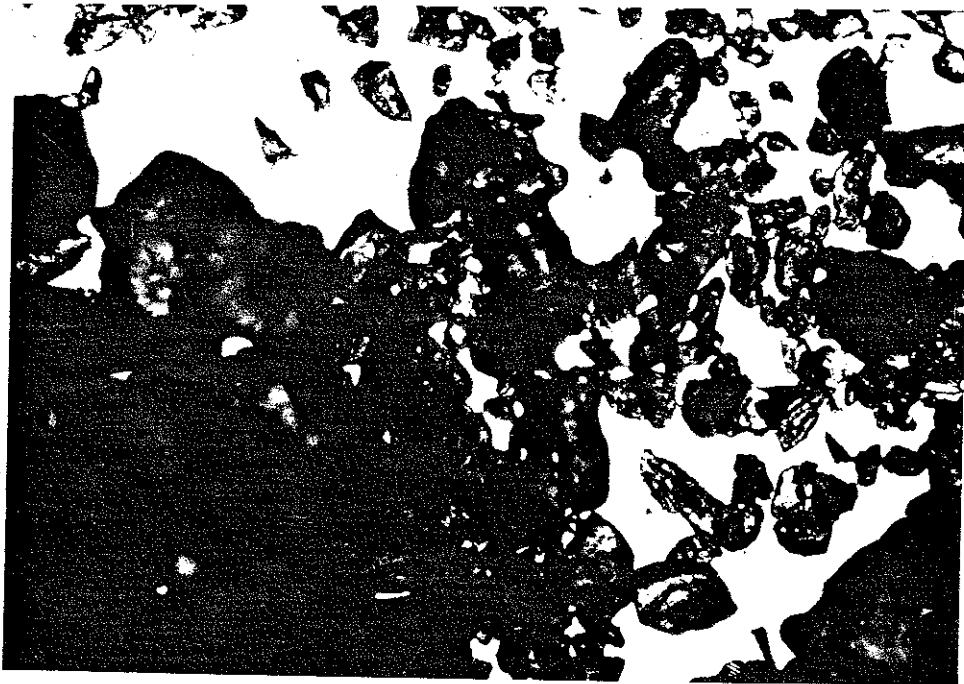
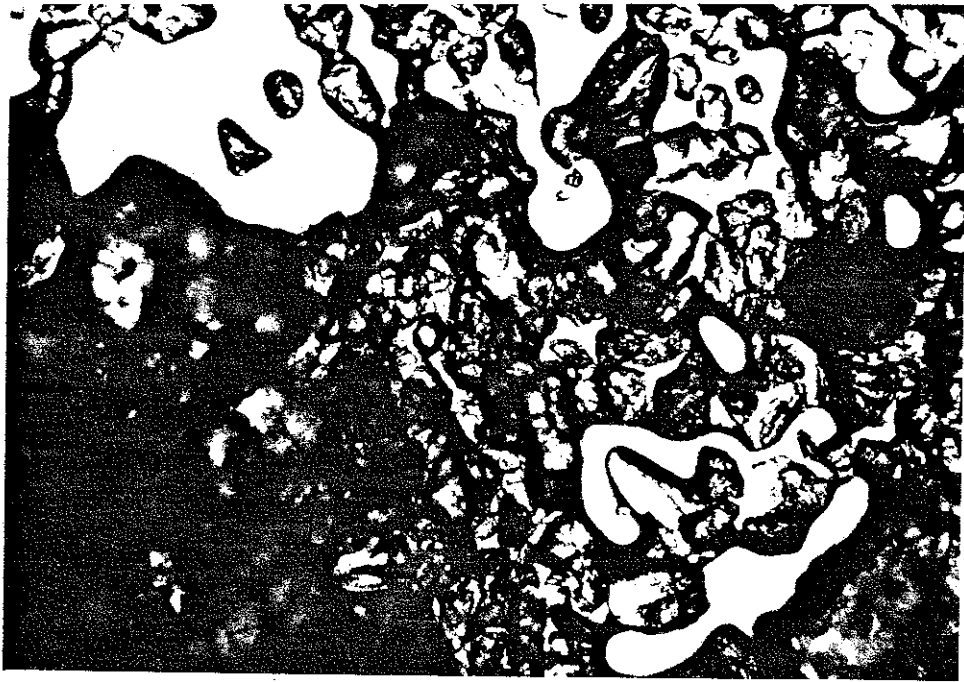


FIGURA 2.13 .- *Coalescencia del aire en el suelo. Arena normalizada del Manzanares. Ancho de la imagen 3.5 mm aproximadamente.*

2.3.3 EFECTO "MAXIMO" DE LA SUCCION

Cabe preguntarse en cual de los *estados de humedad* vistos anteriormente es "máximo el efecto" de la succión.

Towner y Childs (1972) encuentran que en una arena de playa sin confinamiento lateral el aumento de la succión genera una "cohesión aparente" (resistencia a compresión con presión de confinamiento nula) que crece linealmente con la succión hasta que la arena se desatura a unos 30 cm. de "succión", por entrada de aire en los poros. Para succiones mayores el efecto resistente añadido por la succión es menor, del orden de la mitad de la cohesión aparente antes de la entrada de aire.

Ya en 1956 Donald estableció un comportamiento similar para cuatro arenas finas sometidas a ensayo de corte directo bajo succión. Los valores de entrada de aire estaban comprendidos entre 80 cm. y 150 cm. Las desaturaciones producidas por este concepto eran bastante marcadas o súbitas (para una succión bastante definida), dada las granulometrías relativamente uniformes de las arenas ensayadas. El efecto "beneficioso" debido a la succión, que Donald traducía en un incremento de tensión efectiva, también caía a la mitad, tras la desaturación.

Los anteriores ensayos sirvieron a Aitchison y Donald (1956) para derivar unas relaciones entre la humedad del suelo y la tensión efectiva de confinamiento que aporta la succión para esa humedad y para las arenas finas anteriores. Estos autores asumieron que en un proceso de aumento de succión partiendo de saturación, el suelo mantendrá inicialmente la saturación y que progresivamente los poros irán drenando cuando la succión supere el valor de entrada de aire para su correspondiente diámetro equivalente. Se basan en las curvas de retención de humedad en función de la succión para deducir indirectamente el porcentaje de poros que han drenado para una humedad determinada. El agua en esos poros adoptará forma de meniscos aislados alrededor de los contactos entre granos. En un instante determinado del proceso de drenaje se puede calcular la tensión media transmitida por el agua a succión a través

de un plano ideal considerando dos contribuciones: la del agua a succión en los poros aún "localmente saturados"; la del agua de los meniscos aislados (incluyendo la acción de la tensión superficial en la interfase aire-agua). Sumando ambas componentes ponderadamente al porcentaje de poros en uno y otro estado se puede calcular una "tensión efectiva" media debido al agua a succión para una humedad determinada. En la figura 2.14 se incluye la relación entre la "tensión efectiva" debida al agua y el contenido de humedad del suelo, resultado de este proceso de cálculo aproximado y teórico, para las cuatro arenas finas de Donald (1956). Como puede apreciarse el "efecto de la succión" es grande para estados cercanos a la humedad de saturación, con la mayoría de poros con agua en su interior aún, y luego va reduciéndose. Para humedades bajas el agua estaría predominantemente en forma de meniscos aislados en los contactos entre partículas y su efecto total sería menor debido a que el déficit de presión del agua, aunque posiblemente de mayor entidad, actúa sobre una superficie de plano ideal mucho menor. Realmente en arenas finas esta tendencia puede reflejar la realidad. Baste recordar el clásico ejemplo de los castillos de arena. Se construyen saturados y al volcarlos el agua queda sometida a succión, confiriendo una pequeña cohesión aparente a la arena, que se mantiene. Al cabo de cierto tiempo el agua drena, la arena pierde la saturación y en la mayor parte de los casos se desmoronan.

Blight (1967) llega a resultados coherentes con los anteriores al estudiar en la ecuación de Bishop (2.2) la participación del segundo término, $\chi (p_a - p_w)$, a través de consideraciones teóricas bastante similares, en una estibación regular de esferas de tamaño uniforme.

Sridharan (1968) calcula de manera teórica la variación de la "succión efectiva" con el grado de saturación (a partir de estimaciones de la superficie específica de las partículas de un caolín compactado, del espesor de agua adsorbida, del tamaño de los poros y de las tensiones capilares equivalentes). Los valores máximos también le resultan para grados de saturación relativamente altos, entre el 60 y el 70%.

Unos resultados experimentales que podrían encajar con la tendencia marcada por Aitchison y Donald son los de Mendoza y Náder (1979) o Romo et al. (1979). En la figura 2.15 se incluyen los resultados de resistencia a compresión sin confinamiento de unas muestras de un limo residual y una arena arcillosa en función de la humedad

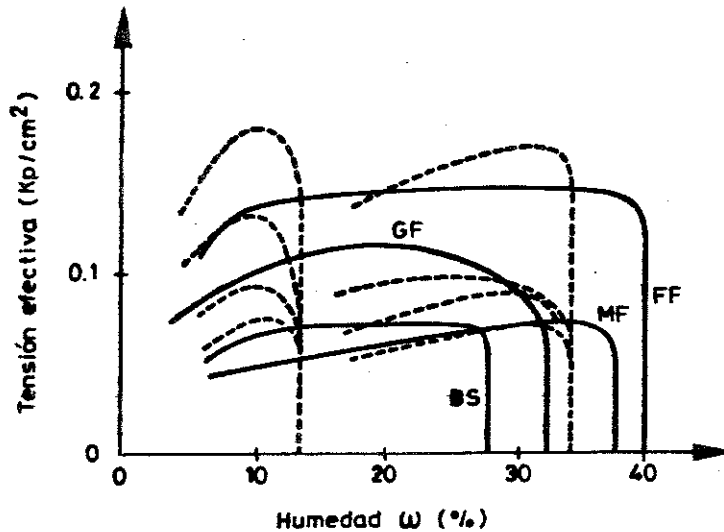


FIGURA 2.14 .- *Curvas continuas: relación entre la tensión efectiva debido al agua y el contenido de humedad de cuatro arenas finas (FF, GF, MF y BS), calculado por Aitchison y Donald (1956) a partir de las respectivas curvas de retención de humedad y de los ensayos a corte directo con succión de Donald (1956). Líneas discontinuas: relaciones teóricas para estibaciones hezagonales (izquierda), y cúbicas (derecha) de esferas uniformes con curvas de retención de humedad adaptadas sobre las distintas arenas (de arriba a abajo: FF, GF, MF y BS), a efectos de comparación.*

variable (grado de saturación y succión variable). Para el limo residual se observa un máximo de resistencia para una humedad relativamente alta y luego el efecto decrece. Para humedades bajas se registra un cierto aumento, como le acontece al esfuerzo transmitido al esqueleto sólido por los hipotéticos meniscos de agua alrededor de contactos entre partículas (capítulo 4). Sin embargo la subfigura b no presenta la misma tendencia.

Es lógico aceptar que en suelos reales con una mayor gradación de tamaños, con cierta proporción de limos o incluso de arcillas, el fenómeno de entrada de aire sea mucho más progresivo y extenso, como puede apreciarse en la figura 2.7 (si es que

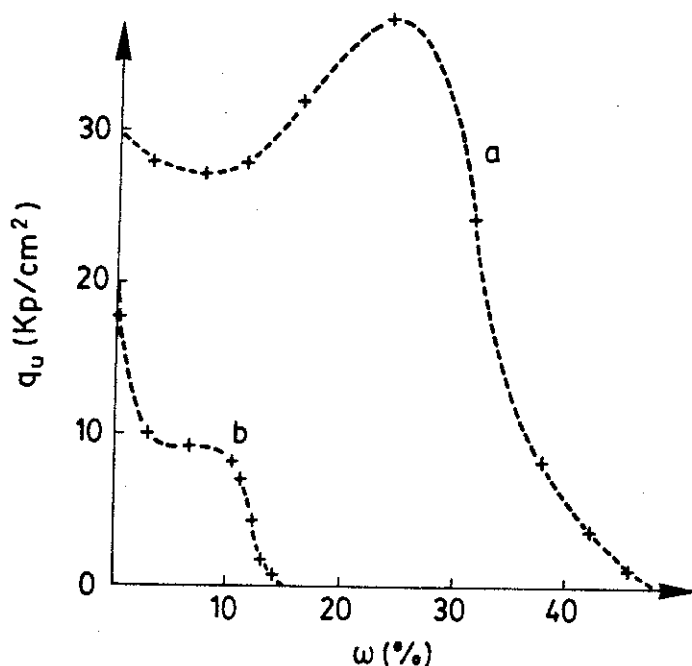


FIGURA 2.15 .- Resistencia a compresión sin confinamiento (q_u) de un limo residual (a) y de una arena arcillosa (b), en función de la humedad. (Mendoza y Náder, 1979).

se puede hablar de un valor concreto de entrada de aire en suelos finos y arcillosos, Bishop, 1975).

Adicionalmente las fuerzas de adhesión sólido-sólido y sólido-líquido- sólido pueden sobreponerse al esquema ideal (eminentemente granular) supuesto por Aitchison y Donald, modificándolo. Por este motivo el máximo efecto que dichos autores sitúan para valores de S_r cercanos a la unidad puede separarse sustancialmente de ese valor. Por otro lado el estado de suelo casi-saturado (zona de transición) se extenderá poco en suelos granulares reales (generalmente menos de un metro por encima del nivel freático. En otros puntos es presumible que el suelo haya abandonado la saturación. En el fondo los anteriores enfoques (Aitchison y Donald, Blight, Sridharan) no dejan de ser teóricos y un tanto académicos: El suelo real para llegar a rotura deberá deformarse, y si está cercano a la saturación

cualquier movimiento de corte o cualquier otro tipo de deformación volumétrica podrá generar cambios de la presión del agua intersticial que podrán modificar el estado teórico inicial de tensiones efectivas concebido por los citados autores. La rotura, por ejemplo, de un suelo real dependerá no solo del estado inicial, sino de la evolución de las deformaciones y presiones y en definitiva de la respuesta de la estructura a las sollicitaciones.

Como se ha visto la resistencia a corte de un suelo para varios estados de carga exterior y humedad se puede estudiar sobre el plano definido por los ejes $(\sigma - p_a)$ y $(p_a - p_w)$. Para succiones bajas se ha encontrado que la envolvente de resistencia es no lineal, en relación al eje de la succión. A grandes rasgos se podría señalar que para succiones cercanas a cero la pendiente de la envolvente para cambios de succión se asemeja a ϕ' (ángulo de resistencia interna del suelo saturado), reduciéndose progresivamente al aumentar la succión hasta adoptar una pendiente final, sensiblemente constante para succiones mayores, igual al ángulo ϕ_b de la ecuación 2.7. Fredlund et al. (1987) citan los siguientes ejemplos: Gan (1986) con ensayos a corte directo a succión controlada sobre una morrena glaciar, encuentra que el cambio de una a otra pendiente se registra para succiones desde 0.5 a 1.5 Kp/cm²; resultados reinterpretados de Satija (1978) sobre una "arcilla de Dhanauri" compactada, denotan un cambio de ángulo progresivo entre 0.5 y 1.0 Kp/cm², pudiéndose considerar la pendiente igual a ϕ_b a partir de 1.5 a 3 Kp/cm², en función de la densidad inicial del material. Por otro lado también los resultados de Escario y Saez (1986) a corte directo con succión controlada (sobre dos arcillas y especialmente sobre una "arena de miga") presentan un cambio acusado de pendiente alrededor de 1 Kp/cm² de succión, para varios niveles de tensión exterior.

Podría pensarse, a la vista de los anteriores valores, en un abandono rápido del agua del suelo para succiones cercanas a 1 Kp/cm² (por un fenómeno tipo "cavitación"), con el consiguiente cambio de comportamiento del suelo; pero ello parece improbable para los materiales relativamente finos ensayados, en los cuales el tamaño de las partículas y de los poros es tan pequeño que las fuerzas de adhesión sólido-líquido adquirirán mucha importancia e impedirán que se desarrolle tal fenómeno (ver epígrafe 3.3).

Aunque en algunos casos podría asociarse este cambio de comportamiento a una especie de preconsolidación debida a la succión de fabricación de las muestras, Fredlund et al. (1987) relacionan la no linealidad de la envolvente de resistencia a succiones bajas con la entrada de aire en los poros del suelo. La entrada de aire en estos materiales dependerá de la granulometría (especialmente de la fracción fina, pero más directamente de la porosimetría del suelo y de su estructura). En los materiales ensayados no será un valor muy concreto, sino que será progresivo. Fredlund et al. (1987) indican que existe buena correlación entre la succión en el punto de cambio de pendiente y el valor de entrada de aire.

Así a succiones bajas la muestra del suelo y todos sus poros permanecen saturados. En ese caso los efectos de la deficiencia de presión del agua y de la tensión exterior en la resistencia a corte se caracterizan por el mismo ángulo de fricción ϕ' . Por ésto un incremento de la succión matricial ($p_a - p_w$) produce el mismo incremento en la resistencia a corte que un incremento de la carga exterior neta (Escario y Saez, 1987). Cuando se alcanza progresivamente la presión de entrada de aire en el suelo empieza la desaturación del mismo. El agua ocupa solo una parte de los poros. Posteriores aumentos de la succión matricial no son tan efectivos en el sentido de aumentar la resistencia, como los incrementos de tensión exterior. En este sentido, Toll (1988) define una "succión efectiva" que es esencialmente igual a la succión normal para valores menores que la presión de entrada de aire y que luego aumenta mucho más despacio, al ser ya menos efectivos los aumentos de succión.

Por estas razones, en Fredlund et al. (1987) la pendiente de la envolvente sobre el eje de la succión desciende progresivamente hasta ϕ_b . Hay que notar que a pesar del cambio de pendiente o curvatura, al aumentar la succión sigue aumentando la resistencia a corte, sin disminución intermedia de efecto (contrariamente a como ocurría en el estudio de Aitchison y Donald sobre suelos eminentemente granulares).

Por encima de la curvatura inicial y como se ha comentado en el apartado 2.2.5, en algunos suelos la envolvente de resistencia se adapta razonablemente bien a un plano, según la ecuación 2.7 (Fredlund et al., 1978; Escario, 1980; Gulhati y Satija, 1981; etc.). Esto equivale a suponer que el efecto de la succión crece con ella, al disminuir la humedad y el grado de saturación del suelo. Como ya se apuntó

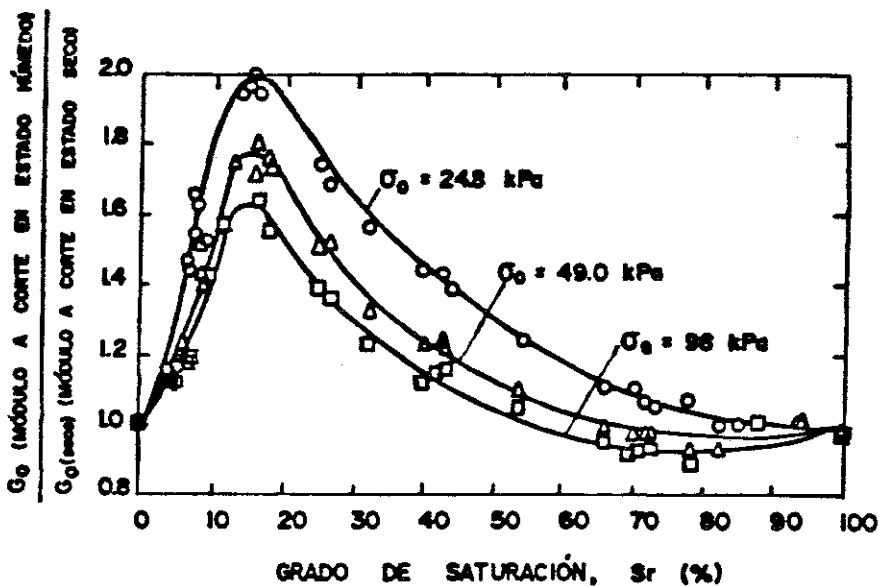
allí, teórica y experimentalmente se ha comprobado que la envolvente de rotura debe presentar un máximo antes de reducirse la resistencia del suelo al estar prácticamente seco. Este se registraría para cierta succión, generalmente muy alta (superiores a las usuales en la práctica ingenieril). En Escario y Sáez (1987 a y b) se acota alrededor de 100 Kp/cm^2 el valor de la succión que confiere máxima resistencia a corte directo a unas arcillas no muy plásticas, compactadas del lado seco del óptimo y confinadas bajo cargas verticales del orden de 3 Kp/cm^2 . Dichos autores discuten si el máximo es real o aparente debido a pequeñas imprecisiones experimentales. Pero en todo caso y bajo el concepto de resistencia a corte, el efecto "máximo" de la succión para esos suelos reales se registra para grados de saturación y humedades realmente bajas.

Para solicitaciones distintas de las que conducen rotura a corte, el efecto de la succión también depende de la estructura del suelo y de la disposición interna del agua.

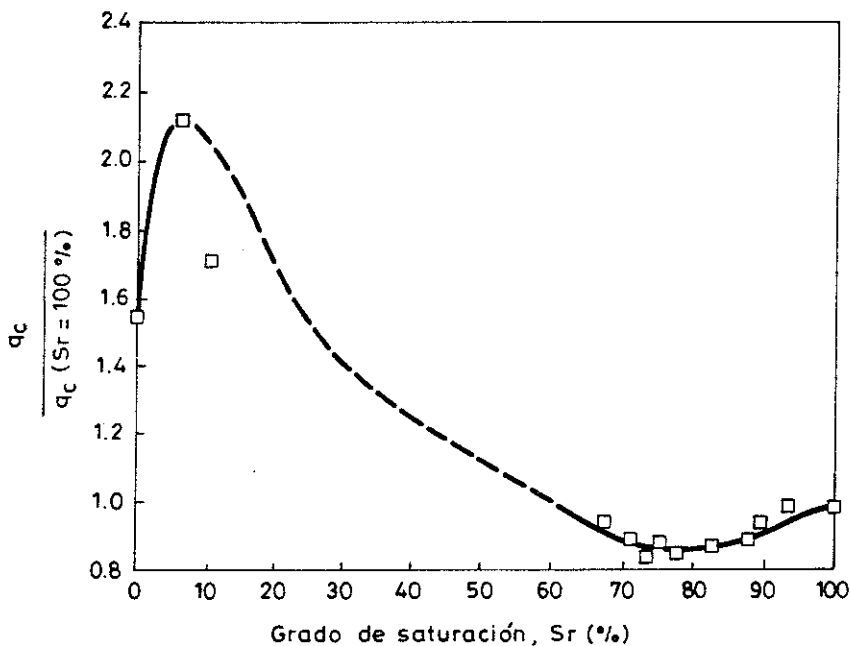
Como se ha citado en 2.2.5, Wu et al. (1984 y 1985) estudian el efecto rigidizador que tiene la succión en el suelo no saturado. Mediante la medición de la velocidad de propagación de ondas de corte por columna resonante a través de probetas de limo y arena en todo el rango de saturaciones (S_r de 0 a 1) calculan el módulo de deformación a corte (G). El nivel de deformación impuesto a la muestra va desde las pequeñas deformaciones (0.001%) hasta valores relativamente altos (0.25%). Encuentran que la relación entre G y G_{SECO} tiene un máximo para grados de saturación entre 10% y 20%, y su magnitud aumenta en el caso de pequeñas deformaciones y a menores presiones de confinamiento. Para grados de saturación mayores el valor de G se asemeja a G_{SECO} o incluso es un poco inferior (figura 2.16a).

La resistencia a la penetración de un penetrómetro de cono ha sido investigado por Hryciw y Dowding (1987) en un programa de ensayos de laboratorio sobre arena de Ottawa a varios grados de saturación.

Para los valores bajos ($S_r = 5$ a 10%) en los cuales el agua está en forma de meniscos, la succión incrementa las tensiones capilares y la resistencia del suelo. Por este motivo la resistencia a la penetración es superior que las de condiciones seca o saturada (figura 2.16b). Para grados de saturación mayores (70% a 95%) la



a)



b)

FIGURA 2.16 - a) Relación entre el módulo de deformación a corte, G , y el grado de saturación para un limo (Wu et al., 1985, adaptado por Josa, 1988).

b) Resistencia a la penetración por punta del cono, q_c , en función del grado de saturación para arena de Ottawa 20-30, al 50% de densidad relativa (Hryciw y Dowding, 1987).

resistencia es ligeramente menor que la de $S_r = 100\%$. Este efecto, que también se observa en la figura 2.16a, es atribuido por los autores a burbujas de aire atrapadas en el esqueleto. En el mismo artículo se hace referencia a Freitag et al. (1970) que determinan que la resistencia a la penetración de cono sobre arenas de Yuma es mayor a contenidos de humedad bajos que en el estado seco o en el saturado.

Moore (1967) encontró que la resistencia de un suelo limoso por él ensayado presentaba un pico para una saturación del 50%. Steensen-Bach et al. (1987) señalan que la cohesión aparente que comunica la succión a sus arenas finas al ir las desaturando va creciendo hasta un máximo, también cercano a $S_r = 50\%$. En Clemence y Finbarr (1981) se afirma de manera general que dicho máximo puede estar entre el 10% y la saturación total en función del tipo de suelo y su estructura. Di Martino (1961) incluye unos ensayos en los que la resistencia a la tracción de un suelo arcilloso va aumentando al irse evaporando el agua, alcanzando un máximo para S_r entre 10% y 20%. Si el mismo suelo se ensaya a distintas humedades humedeciendo desde el estado seco, el aumento de resistencia es muy inferior, y se registra para un $S_r \simeq 50\%$.

En el campo de la mejora de terrenos por vibrocompactación también se registra la influencia de las tensiones capilares (succión) en el rendimiento del proceso. La figura 2.17 recogida de Arquí (1973) refleja la relación entre un cierto coeficiente de rendimiento de la vibrocompactación (B) para una arena, en función de su humedad. Para estados húmedos, cercanos a la saturación la reordenación inducida es alta ($B = 0.8$). Parecida eficiencia se alcanza en el suelo seco. Sin embargo para humedades bajas la curva presenta un mínimo bastante marcado que se atribuye a la resistencia adicional, contraria a las reordenaciones del esqueleto, que las fuerzas debidas a capilaridad confieren a la arena y que la hacen menos deformable a corte (Wu et al., 1985). En este caso podría decirse que la influencia de la succión es "negativa" de cara a su comportamiento ingenieril. Su influencia máxima, en el sentido de mínima mejora del terreno, se registra para un grado de saturación del orden del 15%.

A la vista de las referencias dispares, aquí citadas, sobre el efecto del aumento de succión sobre los distintos comportamientos del suelo cabe concluir que no se puede hablar de efecto máximo de la succión si no se especifica el suelo y la naturaleza del

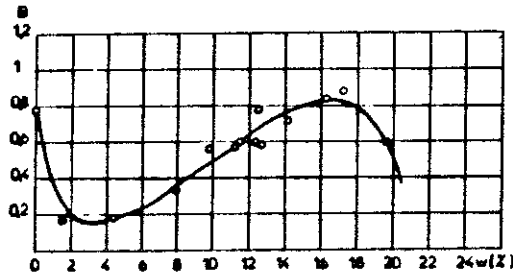


FIGURA 2.17 .- Relación entre el coeficiente de rendimiento de la vibrocompactación (B) de una arena y su contenido en agua (w) (Barkan, 1968).

mismo, las condiciones de ensayo y sobre cual variable se considera tal efecto.

En líneas muy generales, en términos resistentes el efecto máximo podría estar en algunos casos cerca de la saturación (suelos granulares muy uniformes), pero en suelos reales se registraría para succiones altas. En términos deformacionales o de rigidez frente a deformación, el máximo efecto se daría para grados de saturación bajos.

Para suelos eminentemente granulares esta diferencia de grados de saturación para el cual influye más la succión se puede explicar como sigue. En términos resistentes es más efectiva la situación de la figura 2.18a (S_r altos), con el agua a succión en el contorno del suelo o de zonas "localmente saturadas", pero sin haber entrado aún el aire en los poros. La succión se puede asimilar a una carga externa isotrópica. Desde el punto de vista deformacional esta última situación no difiere mucho de la saturada, porque a nivel de contacto existirán fuerzas "normales" y "tangenciales" a pesar de la acción isotrópica. Sin embargo en la situación de la figura 2.18b (S_r bajos) el agua, reclusa a meniscos aislados alrededor de los contactos, transmite esencialmente fuerzas "normales" interpartículas, que contribuirán a aumentar las transmitidas por el esqueleto sólido; así reducirán notablemente la ocurrencia de deslizamientos en los contactos (al aumentar la fuerza tangente máxima resistible y, por ende, la deformación global del esqueleto). Paralelamente la relajación de estas fuerzas normales son las que darán colapso, como

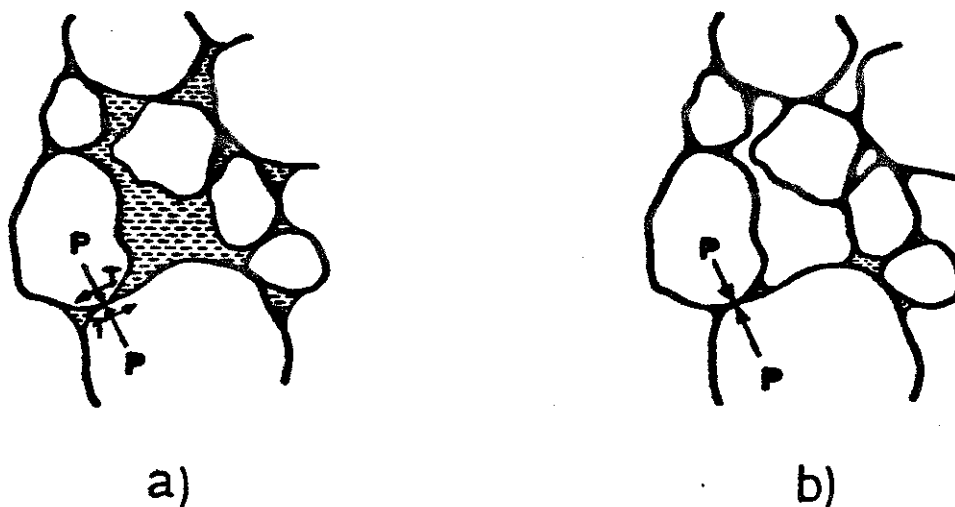


FIGURA 2.18 .- *Acción del agua a succión en un limo fino (Burland, 1965)*
a) *Suelo "localmente saturado" con los meniscos en superficie.*
b) *Agua en forma de meniscos aislados alrededor de los contactos.*

se ha razonado en 2.2.5.

2.4 VISION GENERAL DE LOS MODELOS SOBRE COMPORTAMIENTO DE SUELOS

Para predecir el comportamiento del suelo se utilizan modelos de comportamiento que solo reflejan la realidad hasta cierto punto. Normalmente las heterogeneidades del suelo, las limitaciones de los estudios geotécnicos, y el desconocimiento del estado inicial y de las condiciones de contorno impuestas se traducen en ciertas diferencias entre el comportamiento predicho por el modelo y el que se puede medir (?) en la realidad. Sin embargo en un proceso de diseño de cualquier elemento o estructura en contacto o no con el suelo el ingeniero utiliza

constantemente modelos. Estos deben estar debidamente comprobados y calibrados para que se correspondan con la práctica.

El procedimiento de selección o elaboración de un modelo de comportamiento adecuado no es sencilla. En primer lugar se deben conocer los fenómenos importantes que tienen lugar en el suelo en esas condiciones, su razón física y su posible formulación abstracta y decidir cuales de ellos son los relevantes para determinado proceso. Con ellos se elaborará el modelo conceptual, o abstracción lógica de la realidad en la cual vendrán esquemáticamente relacionados todas las variables y fenómenos relevantes. Este modelo conceptual se concretará en unas ecuaciones o en un esquema numérico que se adapte al tipo de problemas planteado y que en función de los datos disponibles y de una serie de parámetros logre predecir el comportamiento del suelo ante las sollicitaciones.

En Mecánica de Suelos existe una gran variedad de procedimientos experimentales (de laboratorio e "in situ") y de relaciones semi-empíricas que son útiles para predecir el comportamiento del suelo en circunstancias concretas. En otros casos sin embargo los cambios inducidos por la ejecución de una obra pueden traducirse en trayectorias tensionales arbitrarias, variables incluso punto a punto; especialmente en el caso de suelos no saturados, por cuanto su comportamiento es realmente complejo, y distinto para diferentes cambios de estado en el plano de tensiones relevantes. Para no tener que reproducir experimentalmente cada una de las trayectorias posibles suscitadas en el suelo al ejecutar una obra, siempre será interesante contar con modelos que reproduzcan dichos comportamientos observados.

Los beneficios derivados de contar con un modelo serían , según Alonso et al. (1987):

- a) Permite unificar la discusión y comparación de diferentes tipos de ensayo y de distintos resultados. Ocasionalmente se pueden encontrar comportamientos coherentes a partir de comportamientos dispares a primera vista.
- b) Contar con una idea formalizada de comportamiento del suelo favorece la orientación sistemática de las líneas de investigación para esclarecer (confirmando o denegando) determinadas hipótesis.

- c) Los modelos pueden ayudar a identificar los estados y parámetros básicos que rigen el comportamiento del suelo. La comparación de los valores de dichos parámetros para diversos suelos puede ser un buen medio para clasificarlos.
- d) Es una herramienta muy importante para, integrada en códigos de cálculo potentes, poder aproximarse a situaciones de problemas de contorno reales, a efectos investigadores o de diseño.

Dentro de la denominación de *modelo* se agrupan herramientas dispares. Se pueden distinguir primeramente los “modelos constitutivos”, formulaciones elaboradas, más o menos potentes, de propósito general. Por otra parte se dispone de determinadas herramientas que permiten ensayar el comportamiento del suelo bajo determinadas sollicitaciones. Muchas veces también se les ha denominado modelos. Trabajan sobre el mismo suelo o sobre un elemento idealizado que lo representa. A este respecto, estos últimos modelos pueden trabajar: con el suelo mismo (modelos físicos sobre suelo “real”); con un material físico distinto del suelo o configuración sucedánea, pero de comportamiento en algunos aspectos análogo cualitativamente (modelos analógicos); o con una abstracción matemática idealizada del suelo, de efecto global pretendidamente equivalente en algunos aspectos, soportada muchas veces por ordenador (modelos matemáticos o numéricos).

Un sencillo ejemplo de los diferentes tipos de modelos para el comportamiento de una arena sometida a compresión sería el siguiente. Una simple relación de tipo constitutivo y base semi-empírica podría ser (El-Sohby, 1969):

$$\epsilon = a \cdot \sigma^b \quad (2.9)$$

que nos daría la deformación unitaria ϵ al aplicar una tensión σ . Un ensayo “físico” sería uno de compresión isotrópica o edométrica sobre la misma arena (con el cual comprobar la anterior relación y determinar las constantes a y b). Un modelo analógico de ensayo podría consistir en un conjunto de discos de perspex o de aluminio dentro de un marco de carga (Rodríguez Ortiz, 1974). Si los anteriores discos se idealizan como círculos, definidos numéricamente por su centro y su radio, y se estudian por ordenador las interacciones de un conjunto de ellos en contacto, se trataría de un modelo numérico (Rodríguez Ortiz, 1974; Cundall y Strack, 1979 a y

b).

Como se puede apreciar en este sencillo ejemplo, los distintos modelos constituyen aproximaciones a la realidad radicalmente variadas, pero hasta cierto punto complementarias.

2.4.1 MODELOS CONSTITUTIVOS

Tras observación del comportamiento de distintos suelos bajo una determinada sollicitación o conjunto de ellas, se pueden reconocer unas tendencias llegándose a enunciar unos principios comunes de comportamiento.

Estos principios, que integran y resumen una gran cantidad de comportamientos observados, se pueden concretar en una serie de *ecuaciones constitutivas* del material. De una manera más general y amplia se conocen como *modelos* o *leyes constitutivas*. No se va a discutir aquí el estado de desarrollo de estos modelos *, y sólo se incluye este epígrafe para completar la visión general de los diversos tipos de “modelos” sobre comportamiento de suelos.

Lógicamente estos modelos o leyes constitutivas no pueden distinguir partículas, y por ello se pueden considerar “continuos” en el sentido de que trabajan con tensiones y deformaciones globales.

Sin embargo pueden usarse dos vías de aproximación para formular leyes constitutivas: la macroscópica o la microscópica que se tratan en los dos subapartados siguientes.

* que se puede encontrar en Subcomité (1985), o en la conferencia editada por Desai et al. (1987), por ejemplo.

2.4.1.1 APROXIMACION MACROSCOPICA

Los modelos constitutivos de inspiración macroscópica formulan y ajustan sus leyes analizando el comportamiento fenomenológico y las respuestas globales del suelo. Se utilizan generalmente teorías de la mecánica del continuo ideal. Sólo para dar algunos ejemplos, se pueden citar los modelos desarrollados en Cambridge (Cam-Clay, Roscoe y Schofield, 1963, y modificaciones posteriores). Una perspectiva general de su evolución para suelos fundamentalmente saturados puede encontrarse en Hashiguchi (1983 y 1985), o en Gens y Potts (1987). Recientemente se ha desarrollado el primer modelo elastoplástico completo constitutivo para suelos no saturados (Alonso et al. 1987; Josa, 1988).

2.4.1.2 APROXIMACION MICROSCOPICA

Como en la presente tesis se hace especial hincapié en la microestructura de los suelos, a continuación se desarrollan brevemente las ideas de estos modelos constitutivos de inspiración microscópica.

A partir del comportamiento individual de las partículas del suelo, se puede llegar a establecer ecuaciones constitutivas globales (respuesta tenso-deformacional equivalente, bajo determinadas simplificaciones). El paso de la escala micrométrica a la escala macrométrica puede hacerse por consideraciones mecánicas directas (estática) más ciertas hipótesis adicionales, o con análisis estadístico a partir de distribuciones probabilistas de las propiedades de las partículas. La aproximación microscópica también puede usarse en sí misma para estudiar los mecanismos internos de cambio de estructura a base de modelos numéricos, que se verán en 2.4.2.3.

En todo caso la aproximación microscópica se ha usado con ciertos resultados

en suelos granulares mayormente. En suelos cohesivos también se ha intentado hacer consideraciones directas microestructurales para dar cualitativamente forma a las relaciones 2.10, pero los fenómenos presentes son tales que se hace imprescindible recurrir todavía a un mayor número de simplificaciones, que comprometen el resultado (ver por ejemplo el estudio del comportamiento volumétrico de suelos cohesivos no saturados de Nagaraj y Srinivasa, 1985).

Para los suelos granulares supuestamente compuestos de partículas independientes se han formulado diversos modelos en base a la aproximación microscópica. Una visión conjunta de los principales hitos y enfoques en este campo se puede encontrar en la excelente revisión de Rodríguez Ortiz (1974) y en Matsuoka et al. (1985). Queda subrayado en ellos el papel que tiene la estructura debido a que la deformación se debe principalmente a la rotación y deslizamiento de unas partículas sobre otras. Estos movimientos relativos y la fricción gobiernan en última instancia el comportamiento global del material.

El tratamiento de un conjunto de muchas partículas deslizando y rotando es complicado. Los diversos modelos simplifican el tratamiento intentando no perder la esencia del fenómeno. En algunos casos se supone que las partículas son indeformables, en otros que no existe rotación relativa, o que todos los deslizamientos ocurren simultáneamente, etc. Por este motivo no se obtienen relaciones tensión-deformación generales, sino que a lo sumo se consiguen relaciones parciales entre algunas variables de deformación y otras geométricas, inspiradas microscópicamente. Por ejemplo entre la dilatación y el movimiento de corte (Newland y Allely, 1957), la inclinación de los planos de deslizamiento respecto los esfuerzos principales, etc. A menudo se han de establecer hipótesis adicionales, como suponer que al deslizar las partículas debe ser mínima la relación entre el gradiente de disipación de energía por rozamiento interno y el gradiente de energía aportada por la tensión principal mayor (Rowe, 1962, 1971), etc. Trollope (1970) por ejemplo, en los desarrollos de su "mecánica clásica" o de medios discontinuos aplicada a sistemas homogéneos de bloques o partículas, supone que todas las fuerzas de contacto pasan por el centro de los elementos, hipótesis que hace perder generalidad a sus resultados.

Siguiendo las teorías de Mindlin sobre el contacto entre cuerpos elásticos,

Mindlin y Deresiewicz (1953) estudiaron el comportamiento de conjuntos regulares de esferas elásticas en contacto, sometidas a cargas diversas (monótonas, cíclicas, vibratorias), demostrando una posible razón de la histéresis para pequeñas deformaciones, y de la no linealidad carga-deslizamiento (microdeslizamientos en el contacto). En la misma línea se trabaja aún y Dobry et al. (1982), por ejemplo, justifican en una estibación cúbica de esferas iguales el hecho observado de que existe una deformación de corte umbral ($\simeq 0.01\%$) por debajo de la cual no se registra deformación irre recuperable. A partir de las relaciones hertzianas del contacto cuantifican cual es la deformación de corte mínima para que se registre deslizamiento entre dos partículas, suponiendo que inicialmente no existían fuerzas tangenciales. Para valores elásticos medios del cuarzo y con presiones de confinamiento ingenierilmente usuales ($\simeq 2 \text{ Kp/cm}^2$) resultan valores umbrales teóricos del 1 a $4 \cdot 10^{-4}$, concordantes con los experimentales.

Scott (1963) investigó la resistencia de arenas imponiendo la condición de equilibrio límite en varias estibaciones regulares de esferas uniformes. Entre sus conclusiones cabe destacar que la fricción entre partículas no influye de manera proporcional en un ángulo de resistencia global de la arena (definido como aquel cuya tangente es la relación máxima entre la tensión tangencial y la normal). En efecto, si existe una tensión de confinamiento, aunque la fricción sea nula se precisa de un valor finito de corte para alcanzar la rotura, función de la ordenación relativa de las partículas (de su "encaje"). Este extremo fue confirmado posteriormente por Skinner (1969). En un caso general la rotura se registrará cuando la relación de tensiones supere determinado valor, función conjunta de la fricción y de las dimensiones y ordenación relativa de las partículas. Finalmente Scott acometió la generalización del resultado para apilaciones heterogéneas de partículas.

Rowe (1969) de manera similar encuentra la resistencia pico de arenas en corte directo y en ensayos de deformación plana. Horne (1969) hace lo propio para un suelo granular en condiciones de resistencia residual (cambio de volumen nulo).

Cuando la sollicitación es de compresión (por ejemplo isotrópica) los deslizamientos serán menos frecuentes y será más importante la deformación propia de las partículas en los contactos. Modificando las teorías de Hertz sobre el contacto

de esferas, Ko y Scott (1967) y Rowe (1971) dedujeron una ecuación similar a la 2.9 para ensayos de compresión.

Como se citaba al principio del epígrafe, también es posible utilizar análisis estadísticos o estocásticos para pasar de la escala de partícula a resultados macroscópicos. Las dimensiones, formas y situación espacial de los granos del suelo difieren entre sí, y en última instancia no interesa cada uno de ellos sino el comportamiento del conjunto. Por otra parte la heterogeneidad del medio impide obtener información mas que de forma estadística. Por ésto parece razonable un tratamiento probabilístico, que como mínimo superará la necesidad de estibaciones regulares de partículas de los anteriores métodos mecánicos "deterministas".

No se pueden discutir extensamente aquí las distintas soluciones, de este tipo, ni las dificultades que paralelamente entrañan. En Comité (1985) se citan dentro de este campo los trabajos de Nemat-Nasser y Shokooh (1979), Nemat-Nasser (1980), Oda et al. (1980) y Nemat-Nasser y Takahashi (1984). Este último estudio, por ejemplo, a partir de un modelo micromecánico que considera la estructura (principalmente mediante una distribución aleatoria dada de ángulos de contacto) explica la influencia de la anisotropía natural y de la inducida en el comportamiento de las arenas.

Se basan muchos de estos modelos en la transmisión de perturbaciones aleatorias a través del "camino crítico". Consiguen propagar estocásticamente, por procesos tipo Markov, la tensión o la deformación en profundidad en un suelo granular. Según Kitamura (1985), Litwiniszyn (1963) fue el primero en aplicar el proceso de Markov a la investigación de una ley constitutiva para un medio particular. Del mismo tipo son los estudios de Sergeev (1969), Kitamura (1981 y 1983) y Brzakala (1987). Kitamura (1985) también cita los modelos, basados en la mecánica estadística, de Murayama (1966) y Mogami (1965). Este último estudia la distribución aleatoria y heterogénea de los huecos en el suelo en la misma línea de Vanmarcke (1987). Marsily (1984) aplica la misma técnica al estudio de flujo en medio poroso.

Aunque en menor medida también se han usado aproximaciones microscópicas para estudiar el suelo no saturado. Especialmente, ésto se ha llevado a cabo para

razonar el efecto de la succión a base de disponer meniscos de agua alrededor de los contactos entre partículas de suelo, muchas veces de manera cualitativa o conceptual. En el apartado 4.3 se hace una revisión de los autores que han utilizado este modelo. Cabe citar aquí a Haines (1925), Aitchison y Donald (1956) y a Moore y Millar (1971).

Muchas de las anteriores referencias y deducciones de inspiración microscópica han sido apoyadas por minuciosas observaciones y ensayos físicos sobre arenas y analógicos sobre cilindros y esferas de aluminio, acero, vidrio y otros materiales. Los resultados sin embargo no dejan de tener una validez muy limitada y siempre quedan algunos valores básicos difíciles de determinar "a priori" (por ejemplo el ángulo de fricción entre partículas del suelo) y otros que dependerán del material, estibación, densidad, etc. y que deberán ajustarse con datos experimentales.

En los conjuntos regulares no se puede simular el complejo comportamiento (colapso, licuefacción, etc) de arenas reales, densas o sueltas, de formas irregulares y tamaños diversos. Más allá de la situación cuasi-estática inicial analizada por los autores citados, las deformaciones y reordenaciones implicarán rotura de contactos y generación de otros nuevos.

Estas limitaciones hacen que algunos autores manifiesten sus dudas sobre si es efectivo aproximarse a la realidad (microscópica, discontinua) de los suelos en lugar de basarse directamente en el método experimental o en lugar de limitarse a aproximaciones macroscópicas (suelo como continuo). A pesar de ello no hay que renunciar a la aproximación microscópica como única capaz de explicar, en última instancia, la razón de muchos fenómenos inherentes al comportamiento de los suelos. Los métodos de modelado numérico del discontinuo como los que se verán en el apartado 2.4.2.3 y como el que se desarrolla en esta tesis son una buena herramienta para superar muchas de las citadas limitaciones.

2.4.2 MODELOS FISICOS, ANALOGICOS Y NUMERICOS

Se incluyen aquí aquellos métodos de ensayo (aunque a veces se les denomina “modelos”) que experimentan el efecto de determinadas acciones sobre el suelo real o sobre un suelo “artificial”, idealización del primero (analógica o numérica). Todos los modelos de este tipo son en general discontinuos y en este sentido podrán tener debidamente en cuenta la estructura.

Se va a hacer especial mención de aquellos modelos y técnicas de ensayo que dan valor a la estructura del suelo granular, reconociendo su naturaleza discontinua. Se omiten los modelos de flujo en medio poroso, que se pueden encontrar en Bear (1972), por ejemplo.

2.4.2.1 FISICOS

La muestra ensayada es de suelo real, natural (“in situ” o transportada al laboratorio) o “fabricada” a partir de los anteriores (suelos compactados). En cuanto no se trabaja con todo el suelo que realmente estará por ejemplo bajo la cimentación a construir, y en cuanto no se le aplican las mismas cargas (ni en magnitud ni en tiempo), se trata de un “modelo”.

No es objetivo de este apartado hacer una relación comparativa de todos estos ensayos “in situ”, de laboratorio (estandar o especiales), por demás suficientemente conocidos. Sin embargo sí que se considera adecuado resaltar a continuación algunas técnicas desarrolladas recientemente de medición “discontinua” en el interior de las muestras.

La distribución de tensiones dentro de una muestra de suelo sometida por

ejemplo a corte no puede ser medida. Sin embargo la distribución de desplazamientos y deformaciones dentro de la muestra de suelo puede ser estudiada por medidas radiográficas del cambio en la posición de unos balines marcadores ("lead shots") embebidos en la probeta (Roscoe y Schofield, 1963; Arthur y Dunstan, 1982; Scarpelli y Wood, 1982; Vardoulakis y Graf, 1982).

También la técnica radiográfica puede detectar cambios locales de densidad debido a que la absorción de rayos X baja cuando el suelo dilata (Airey et al., 1985).

Se han utilizado diversos métodos no destructivos para medir la porosidad y el contenido de humedad en el interior del suelo (medidas de resistividad eléctrica, absorción de rayos X, γ , de neutrones, etc). Como se ha señalado repetidamente, usar sólo la porosidad es claramente una descripción incompleta de un suelo no homogéneo. Para obtener información de la heterogeneidad en la distribución de huecos y humedad en el interior del suelo se ha usado la *tomografía*. Es una técnica basada en la absorción o desviación de los rayos X que ha sido adaptada del campo médico y ofrece nuevas posibilidades para realizar estudios cuantitativos y cualitativos en laboratorio sobre suelos eminentemente discontinuos o no homogéneos. En definitiva se puede obtener "secciones" de la muestra que permiten cuantificar su estado concreto de huecos. La evolución de los poros puede seguirse comparando tomografías en varios instantes de un ensayo determinado. En Arthur (1972) se aplica al ensayo de corte en gravas.

También se ha aplicado en suelos la *tomografía computerizada por barrido* ("computed tomography scanning", CT o scanning tomográfico). que mediante un proceso conocido como de "reconstrucción de imagen", obtiene la representación bi o tridimensional de los valores del "coeficiente de absorción". Este puede guardar mucha relación con algunas propiedades físicas internas de la muestra. Petrovic et al. (1982) han demostrado la posibilidad de usarlo para estudiar las heterogeneidades y la densidad seca del suelo en tres dimensiones. Crestana et al. 1985) lo han aplicado para medir dinámicamente el contenido de agua en el interior del suelo, en tres dimensiones, pudiéndose detectar heterogeneidades en el contenido y en la transmisión de humedad.

Las anteriores técnicas a base de rayos X requieren equipamientos sofisticados, específicos y costosos, además de unas ciertas precauciones de seguridad en su empleo.

Existen también métodos para la determinación de desplazamientos punto a punto (grano a grano) en un ensayo de deformación plana o de corte simple en el cual la muestra granular está dispuesta contra una pared transparente. La técnica de *exposición continua* consiste en mantener el obturador abierto durante un intervalo de tiempo mientras se impone cierta deformación al marco del modelo de ensayo. Con ella se puede distinguir las zonas que han permanecido inmóviles de las que se han desplazado (que aparecen borrosas). Las técnicas *estereofotogramétricas* con doble cámara o con doble presentan mayores posibilidades y precisión. Los fotogramas pueden tomarse: sobre material granular real; sobre suelo con inclusiones especiales (como balines); sobre modelos analógicos (Butterfield et al. 1970; Butterfield y Andrawes, 1971; Andrawes y Butterfield, 1973; Chambon y Desrues, 1985; Andrawes y McGown, 1982; Davidson et al., 1981). Es necesario un equipo de toma y restitución relativamente costoso pero los resultados son precisos y completos.

La *interferometría láser* también ha sido aplicada a la medición de desplazamientos punto a punto en una superficie expuesta de una arena real en deformación plana (Pater y Nieuwenhuis, 1986).

Todas estas técnicas mencionadas de medición "discontinua" en el interior de las muestras se separan en algunos casos de los ensayos físicos tradicionales. Su aplicación está limitada a casos con deformaciones planas o en simetría radial, porque si no el vector desplazamiento real (o el cambio de volumen) queda indeterminado. Puede existir cierta diferencia de comportamiento entre la arena expuesta en superficie y la interior. Por ello algunos de estos modelos y técnicas se podría considerar a medio camino entre un ensayo físico y uno analógico, cuyo material fuera pétreo. En todo caso permiten un valioso acercamiento al estado de huecos y a la cinemática interior de los suelos, especialmente granulares.

Otra técnica de observación interior de suelos es la basada en el microscopio. Con un microscopio óptico normal se pueden obtener apreciaciones directas en suelos granulares (ver figura 2.13) en los cuales también se puede utilizar el ya citado

microscopio electrónico de barrido (Trent et al. 1987). En suelos cohesivos se utiliza preferentemente este último. Este instrumento puede llegar a diferenciar detalles de hasta 50 Å. El rango de aumentos va desde 20x a 50000x, permitiendo diversos niveles de estudio (Sides, 1972). Adicionalmente se puede proceder a la identificación mineralógica de partículas individuales (o puntos concretos de las mismas) a voluntad dentro de la imagen microscópica, mediante excitación con sonda electrónica "direccional" y análisis de la radiación resultante con espectrómetro de masas (Jiménez Salas, 1988).

2.4.2.2 ANALOGICOS

La muestra ensayada es de un material distinto al suelo, de comportamiento en algunos aspectos cualitativamente equivalente al del suelo real.

Es necesario que se cumplan unas determinadas reglas de escala o condiciones de similitud, que se refieren a las dimensiones y a la importancia relativa de las fuerzas presentes en la realidad y en el modelo. En un planteamiento general ciertas propiedades (rugosidad, viscosidad, resistencia, peso, deformabilidad) deben guardar ciertas relaciones para simular apropiadamente las fuerzas debidas a fricción, viscosidad, deformación, inercia, tensión superficial etc. Esto se puede conseguir teóricamente manteniendo el valor de determinados coeficientes adimensionales (similares al número de Reynolds, de Cauchy, etc.) No existe manera de satisfacerlos todos simultáneamente en la práctica. La escala además puede depender del tiempo si el fenómeno no es estacionario (Barends, 1987). Afortunadamente la mayoría de problemas pueden reducirse a unos pocos fenómenos dominantes que serán los que dictarán las escalas del modelo.

En suelos cohesivos se han utilizado materiales como la gelatina y determinadas resinas para modelar su comportamiento en rotura, desde un punto de vista continuo, aunque no tienen debidamente en cuenta la presencia de agua, tan importante en estos suelos. Scott y Craig (1980) construyeron un modelo analógico microestructural para

el caso de arcillas. Una serie de láminas, cada una representando una partícula de arcilla formaban una estructura de tipo floculada. Aunque se ensayó bajo carga, el propósito fundamental era de visualización.

Mayor éxito y difusión han tenido los modelos analógicos usados para el estudio de macizos de roca diaclasados, en rotura de taludes o en excavaciones subterráneas (Barton, 1974; Muller, 1970; Egger y Gindroz, 1979, por ejemplo).

En los modelos analógicos usados en suelos granulares el fenómeno de interés cuyo estudio se persigue es la estructura y la influencia de la estibación densa o suelta. Los modelos implementados podrían catalogarse de mecánico-estructurales, contruídos sencillamente por sustitución de los granos por otro material que haga más fácil el estudio del comportamiento geométrico. Esta solución sería la más intuitiva y generalizada. Entre los materiales utilizados en forma de bolas esféricas o de discos o de elipses se encuentran el vidrio, en forma de bolas o también machacado; el acero, bronce, aluminio, duraluminio y otras aleaciones en forma de esferas o de barras; y los materiales con ciertas propiedades fotoelásticas que los hacen adecuados para estudios de transmisión de esfuerzos, como el metacrilato, el perpex y otros polímeros, en forma de discos delgados circulares o elipsoidales (ver figura 2.4). Rodríguez Ortiz (1974) señala que las condiciones de similitud no se cumplen y en general han sido muy poco estudiadas, advirtiéndose una tendencia indiscriminada al uso de estos modelos, más allá de sus posibilidades. El citado autor indica que en un estudio de este tipo deben tenerse en cuenta las siguientes variables: Dimensiones del modelo, fuerzas externas aplicadas, ángulo de rozamiento, peso específico, parámetros elásticos del material, factor de forma de las partículas y porosidad o índice de poros de la estibación. En el citado trabajo se incluye una excelente revisión histórica de los modelos analógicos aplicados a suelos granulares. Adicionalmente, en él se desarrolla un modelo analógico bidimensional a base de cilindros de duraluminio, que se estudia tenso-deformacionalmente y en resistencia a corte.

Recientemente han seguido en la línea de modelos analógicos de discos fotoelásticos los trabajos de la escuela japonesa: Oda (1972), Oda y Konishi (1974), Oda et al. (1980), Konishi et al. (1982) (ver figura 2.4) y Oda et al. (1982). Parte de los resultados de la última referencia son utilizados por Molenkamp (1984).

El modelo analógico más frecuente es el bidimensional a base de discos circulares, aunque en los tres últimos trabajos citados los discos fotoelásticos son ovales, o en Rowe (1962) se llevan a cabo ensayos triaxiales sobre estibaciones tridimensionales de esferas. La medida de los desplazamientos de cada elemento del modelo se puede hacer de manera directa o bien empleando fotografías o por técnicas fotogramétricas y estereofotogramétricas, como las ya citadas de Butterfield y Andrawes (1972) o las del mismo Rodríguez Ortiz (1974). La medición de fuerzas de contacto se puede basar en el análisis de las isocromas producidas por la luz polarizada sobre el material fotoelástico, pero el tratamiento partícula a partícula es farragoso. Allersma (1982) mide las tensiones medias en un modelo sobre un "pyrex", machacado, material óptico-mecánicamente sensitivo, de tamaño medio 2 mm, dentro de un marco de corte simple de 5 x 20 x 20 cm. En una determinada zona del modelo de unos 6 mm, a partir de un emisor láser de He-Ne se polariza la luz en un plano que incide perpendicularmente en el modelo; un sensor mide la intensidad de la luz transmitida a través del modelo, para cada inclinación del plano polarizado (de 0 a 180 grados). Se pueden relacionar estas intensidades con la diferencia de tensiones principales y con el ángulo que forma la dirección principal media con la horizontal en cada punto.

Los modelos analógicos citados han servido para confirmar hipótesis sobre los micro-mecanismos de deformación al cargar el suelo granular. También han permitido crear nuevas hipótesis, básicamente a nivel cualitativo. Ejemplo de ello son la existencia de las cadenas de carga o fenómeno de "bridging" que se ha comentado en 2.2.2, o el de anisotropía y giro de tensiones principales inducida por la carga, y que se pudo constatar ya en los modelos fotoelásticos de Dantu (1957) o de De Josselin de Jong y Verruijt (1969). O la concepción y formulación del "tensor de estructura" que se ha comentado en el epígrafe 2.2.2. Allersma (1982) lo utilizó para intentar validar el modelo de "doble deslizamiento y rotación libre" de De Josselin de Jong (1977, 1982).

Todos los modelos analógicos mecánicos sobre suelos granulares no consideran la acción de fluidos intersticiales. En algunos casos ciertas condiciones húmedas de ensayo sólo influyen indirectamente en el rozamiento entre cilindros. Sin embargo modelos de concepción similar se han usado para el estudio del flujo laminar y

turbulento y la naturaleza exacta de las velocidades intersticiales en medio poroso saturado (ver por ejemplo Dybbs y Edwards, 1984); en este caso el “esqueleto” permanece indeformado. No parece posible incluir convenientemente el agua para simular un estado no saturado, debido a la marcada diferencia de importancia de los efectos capilares, dado el material y sobre todo las dimensiones del modelo.

2.4.2.3 NUMERICOS

Los *modelos numéricos* de ensayo cuidan de simular lo más adecuadamente posible el comportamiento del material, suponiéndolo también discontinuo. Por ello distinguen una serie de elementos o partículas que se manejan mediante algoritmos de movimiento e interacción entre ellos. Como el número de cálculos normalmente es alto, se implementan en ordenador. Con ellos se pueden llevar a cabo ensayos “numéricos” de *simulación*. No se incluyen en cambio los *métodos* numéricos que, integrando una cierta ecuación constitutiva, permiten resolver problemas generales de contorno (por ejemplo una ley elastoplástica introducida en un programa de Elementos Finitos). La ley elastoplástica existe independientemente del programa de E.F., mientras que en los modelos numéricos que aquí se consideran las suposiciones básicas están íntimamente ligadas al método numérico de resolución (para obtener la respuesta del suelo a base de “ensayos”). En los modelos numéricos no se presupone el comportamiento global del material, sino que éste se supone desintegrado en una serie de elementos con una serie de reglas básicas sencillas de interrelación.

Son conceptualmente muy parecidos a los modelos analógicos, pero son algo más versátiles por cuanto se pueden (numéricamente) satisfacer cuantas condiciones de similitud existan: se puede trabajar con los valores “reales”, físicos, de los materiales. Adicionalmente se pueden cambiar los parámetros geométricos y deformacionales de los elementos sin mayor dificultad (sin tener que rehacer el modelo analógico).

Cierto es que normalmente se recurre a una serie de simplificaciones sobre la geometría y sobre las interacciones entre los elementos (fuerzas de contacto) que

han de ser valoradas debidamente mediante la comparación con otros modelos y la observación de la realidad.

Campbell y Brennen (1982) consideran tres posibles propósitos o utilidades de las simulaciones por ordenador:

- 1) Dar pistas y sugerencias para hacer las hipótesis apropiadas en modelos teóricos (globales) y/o para validar esos mismos modelos ya propuestos.
- 1) Comparar resultados con medidas experimentales para ajustar partes del modelo mismo (interacciones partícula/ partícula o partícula/ pared).
- 1) Explorar la influencia de fuerzas nuevas (como son las debidas a líquidos intersticiales o efectos electrostáticos).

Adicionalmente se puede añadir que en los modelos numéricos se pueden llevar a cabo ensayos no abordables fácilmente en otros modelos (físicos o analógicos) en cualquier trayectoria tensional rotando los ejes principales etc. de manera relativamente sencilla. Por ejemplo se puede ver que ocurriría si el coeficiente de rozamiento entre elementos se redujera a la mitad o se anulara. También es posible aplicar las condiciones de contorno o las sollicitaciones de una manera mucho más controlada. En este punto hay que recordar que algunos resultados de experimentos físicos y analógicos dependen en parte de los aparatos de ensayo (tensión controlada, deformación controlada, marcos de carga, etc.; Molenkamp, 1985).

Dentro del campo de las Geociencias en general, los métodos numéricos discontinuos han tenido cierta aplicación. Por ejemplo en el modelado de macizos rocosos discontinuos se ha usado el de los elementos finitos incorporando *elementos junta*. Pioneros en este campo son los trabajos de Goodman (ver por ejemplo Goodman et al., 1968 y Goodman, 1975) a los que han seguido otros con mejoras posteriores (por ejemplo Carol et al., 1982). Se han aplicado al cálculo de estabilidad de taludes, de excavaciones subterráneas y de macizos rocosos en general.

Otro método muy aplicado como herramienta de estudio dentro del mismo campo es el conjunto basado en los trabajos de P.A. Cundall, que desde 1971 ha

ido aplicando el "Método de los elementos discretos" ("Distinct Element Method", D.E.M.) al modelado de macizos rocosos diaclasados. Fue desarrollado inicialmente por Cundall (1971) y mejorado por Cundall et al. (1975) y Cundall (1976). Se modela el comportamiento de conjuntos de bloques de roca en dos dimensiones, disjuntos y completamente definidos, bajo el efecto de la gravedad y de otras sobrecargas. Los bloques inicialmente se consideraron rígidos e interaccionando en las superficies de contacto entre ellos. El método de resolución numérica es fundamentalmente el de diferencias finitas, totalmente explícito a lo largo del tiempo, inspirado en los principios de relajación dinámica de Otter (1966). También se ha aplicado para modelar medios granulares a base de discos circulares, como se verá más adelante dentro de este mismo epígrafe, junto con más detalles del mismo.

El D.E.M. se ha usado para estudiar la estabilidad de taludes, cavernas, cimentaciones de presas, túneles someros, etc (Cundall et al. 1975; Ohnishi et al. 1985; Barton, 1986, incorporando dilatación en las juntas; Ishida et al., 1987; etc.). Se ha adaptado para el modelado de la interacción del flujo a altas presiones con la roca, al estudiar centrales geotérmicas (Pine y Cundall, 1985). Ultimamente se combina con métodos que introducen la deformabilidad de los mismos bloques (Lemos et al., 1985), a través del Método de los Elementos Finitos (Vargas, 1985; Williams, 1987; Mustoe et al., 1987; Hocking et al., 1987), o combinado con el Método de los Elementos de Contorno (Lemos y Brady, 1983). Incluye la posibilidad de condiciones dinámicas (Lemos et al. 1985; Scott, 1987). El D.E.M. también puede servir para estudiar la caída de bloques poliédricos aislados por laderas de montaña (Falchetta, 1985). Cañizal y Sagaseta (1988) analizan numéricamente el comportamiento de conjuntos de bloques rocosos paralelepípedicos "exentos", con contactos "cara-cara" y "vértice-cara". Nuevamente se consideran rígidos. El método de resolución de las fuerzas y los desplazamientos se basa en principios análogos a los empleados en el modelo de Rodríguez Ortiz (1974), que se describe a continuación.

Los modelos numéricos discontinuos han sido aplicados también a suelos. Sin embargo en los de tipo *cohesivo* es difícil fijar la geometría de las partículas de arcilla, y además las fuerzas de interacción entre ellas no son muy bien conocidas. Por este motivo el número de hipótesis inciertas ha de ser mayor. Uno de los pocos trabajos en este campo es el ya citado de Scott y Craig (1980). En dos dimensiones esquematizan

las partículas arcillosas como segmentos de diversas longitudes, con contactos "punta-cara" susceptibles de deslizar. Obtienen en conjunto una estructura de tipo floculado, similar a una estructura de barras, que se analiza numéricamente.

Los modelos numéricos discontinuos se han aplicado profusamente como útil de investigación en suelos granulares.

Uriel (1982) ideó un nuevo modelo reológico para representar la relación fuerza-desplazamiento en arenas. Sin simular la forma concreta de los granos, sí reproduce las características estructurales de los suelos granulares: evolución de las fuerzas intergranulares (fricción), y ángulos de contacto. Este modelo también puede encontrarse descrito en Jiménez Salas y Uriel (1983).

Dentro de los modelos que sí simulan de manera aproximada la forma concreta de los granos, en Serrano y Rodríguez Ortiz (1973) y en Rodríguez Ortiz (1974) ya se utilizó un modelo a base de discos. Primeramente se trató la generación aleatoria en dos y tres dimensiones de medios de granulometría conocida en recipientes rectangulares, analizando la influencia del número de fracciones, del tamaño del recipiente, etc., en los resultados obtenidos (distribución del número de contactos por partícula y valor medio; distribución de ángulos de contacto en relación a la vertical; porosidad de la estibación). En una segunda etapa se planteó un modelo numérico capaz de reproducir el comportamiento mecánico del conjunto bidimensional de discos generados anteriormente, confinados en un recipiente rectangular. Las interacciones entre los discos son de tipo contacto hertziano, con algunas modificaciones. Las acciones externas (carga o desplazamiento impuesto en la parte superior de la "muestra") se aplican a base de pequeños incrementos. En una situación determinada los incrementos de fuerza transmitida por un determinado contacto puede ponerse en función de las fuerzas actuales y de los movimientos relativos elementales entre los dos discos (rodamiento o deslizamiento relativo). Para cada incremento de sollicitación se puede establecer pues un sistema de ecuaciones cuyas incógnitas son los corrimientos y los giros individuales de cada partícula (similar a un método matricial de resolución de estructuras). Es necesario sin embargo que no deslice más de un contacto en cada incremento de sollicitación. De manera escalonada se llega al punto final de aplicación de carga. Se deducen interesantes conclusiones relativas a la fricción movilizada, a

las fuerzas de contacto, a los efectos del peso propio, etc. Como sea que todas las partículas están interrelacionadas al resolverse un sistema global de ecuaciones, los ordenadores disponibles sólo permitieron analizar un número relativamente reducido de partículas. La matriz "de rigidez" del sistema se debía actualizar (recalcular) frecuentemente, lo que conducía además a tiempos de cálculo apreciables.

Mayor difusión ha obtenido en este campo el ya citado "metodo de los elementos discretos" (D.E.M.) de P.A. Cundall. Análogamente al caso de bloques rocosos, las partículas básicas se consideran infinitamente rígidas, en el sentido de que no perderán su forma circular sino que al moverse se solaparán en mayor o menor medida con sus vecinas. Las fuerzas de interacción por contacto pueden hacerse en primera aproximación función del solape. Esta hipótesis de interacción puede ser aceptable si las deformaciones en los granos reales se asocia principalmente a la zona del contacto, como en realidad ocurre en un suelo granular bajo cargas moderadas (ver capítulo 3). En un instante dado, a partir de las situaciones actuales de las partículas y sus solapes, se pueden deducir las fuerzas de interacción para todos y cada uno de los contactos. El siguiente paso consiste en sumar las fuerzas que actúan sobre cada grano a través de los contactos (fuerza y momento resultante). Planteando la segunda ley de Newton se deduce la aceleración instantánea (lineal y angular) que experimentará dicha partícula bajo la acción de las fuerzas de contacto. Integrando dos veces en el tiempo las aceleraciones (para un intervalo reducido de éste que permita considerarlas como constantes), se obtendrán los desplazamientos incrementales (tanto lineales del centro de la partícula como de rotación a su alrededor). Extendiendo este proceder al total de granos se obtiene una nueva configuración geométrica que permitirá volver al primer paso, es decir al cálculo de nuevas fuerzas de contacto. El proceso se va siguiendo en el tiempo, a través de pequeños incrementos hasta que, o bien los desplazamientos progresivamente se reducen (equilibrio), o aumentan (rotura). Más detalles del método se pueden encontrar en las referencias citadas de Cundall; en Strack y Cundall (1978), en Cundall (1978), en Cundall y Strack (1979c) y en el capítulo 3 y 5 de esta tesis. El método, según lo descrito es explícito y local, en el sentido de que los desplazamientos de una partícula durante un incremento de tiempo se puede hallar conociendo sólo su situación relativa con sus vecinas, no siendo necesario plantear las leyes de movimiento para todo el conjunto de partículas simultáneamente. Esto evita tener que resolver repetidamente grandes sistemas de

ecuaciones, aunque obliga a utilizar incrementos de tiempo reducidos (ver capítulo 5).

Es un método atractivo por su sencillez conceptual y que ha sido seguido por numerosos autores para poner a punto modelos de comportamiento del discontinuo, como se verá a continuación.

En Cundall y Strack (1979a) se valida el esquema numérico y mecánico descrito por comparación directa entre los resultados del modelo numérico y los del modelo analógico de discos fotoelásticos de De Josselin de Jong y Verruijt (1969) (figura 2.4). Los diagramas de fuerza obtenidos, al intentar reproducir las condiciones y materiales de ensayo citados, se asemejan razonablemente. En Cundall y Strack (1979b) se hace lo propio con otro ensayo analógico de Oda y Konishi (1974). De estas y otras verificaciones, y de las ventajas citadas del D.E.M. (sencillez conceptual y versatilidad) se deduce que es una herramienta útil para la investigación básica de la microestructura y comportamiento de los medios granulares, como paso necesario previo a la formulación de leyes constitutivas fundamentadas en la naturaleza discontinua de estos suelos.

Las configuraciones analizadas por Cundall y colaboradores son de discos bidimensionales dispuestos entre paredes rígidas (como en la figura 2.4) o bien en una área aproximadamente circular (figura 2.19). El número de discos tratado típicamente es del orden de cientos, llegando en ocasiones a mil. Existe una versión tridimensional del modelo ("TRUBAL", Cundall y Strack 1979c) pero los problemas de entrada de datos y de visualización de resultados la hacen menos operativa y utilizada. En cualquier instante de un "ensayo" se conoce todo tipo de información. Justamente esta abundancia de datos hace especialmente necesario un buen módulo de "post-proceso" capaz de presentar y resumir la información de forma adecuada y comprensible: dibujos de la posición de los discos, de las fuerzas transmitidas por los contactos (figura 2.19), de los giros y deslizamientos, de las velocidades de las partículas, de las inclinaciones de los contactos en relación a la vertical (similar a la figura 2.5), etc. En un intento de facilitar el paso al continuo "psámmico" *

* Según Dietrich (1982) material "psámmico" sería aquel continuo de comportamiento equivalente a un conjunto discontinuo de granos rígidos

equivalente se pueden calcular unos determinados tensores de tensión y deformación promedio (en todo el modelo o en una zona del mismo).

La utilización de este modelo ha permitido detectar algunos interesantes *mecanismos interiores* al suelo. Cundall et al. (1982) resaltan los siguientes: La formación de las ya citadas cadenas de carga (epígrafe 2.2.2); la localización de los deslizamientos de contactos preferentemente en zonas entre cadenas, asociados a movimientos de giro en ellas; bajo carga desviadora los contactos que se pierden están alineados preferentemente con la dirección principal menor; al descargar tras la aplicación de un desviador, persisten ciertas fuerzas tangenciales en bastantes contactos, que antes de cargar no existían; etc. Estas observaciones, interpretadas, conducen a Cundall y Strack (1983) a formular tentativamente una partición del tensor de tensiones macroscópico del material para intentar incorporar los fenómenos observados en una ley constitutiva continua. La falta de espacio impide entrar a profundizar en tan interesante trabajo.

En Cundall et al. (1982) se especifican los “modos” de aplicación de carga al conjunto rectangular o circular de partículas: deformación controlada (impuesta por escalones) en el contorno, tensión controlada, etc. El modo “tensión controlada” en el contorno parece que convierte a un determinado número de discos en “menos resistentes” en relación a su respuesta si están embebidos en un conjunto infinito de otros discos. En Cundall y Strack (1983) se justifica este fenómeno, resaltando que en el primer estado hay más grados de libertad que en el segundo, y por ésto es menos estable. La influencia de las condiciones de contorno es notable, incluso para número de partículas rondando a las 10000, y por ello será preferible usar otras condiciones de contorno.

Recientemente se han construído modelos numéricos basados en el D.E.M. para estudiar la micro-mecánica de materiales granulares con *cementación* entre los granos. (Trent et al., 1987). Se ha modificado el método original, introduciendo la cementación como “puentes” entre determinadas partículas. Dichos puentes, que se pueden apreciar en la figura 2.20, constriñen el movimiento relativo de las partículas pero pueden romperse por fisuración o por pérdida de adhesión con las partículas. Los “ensayos” que pueden llevarse a cabo permiten evaluar la influencia relativa de

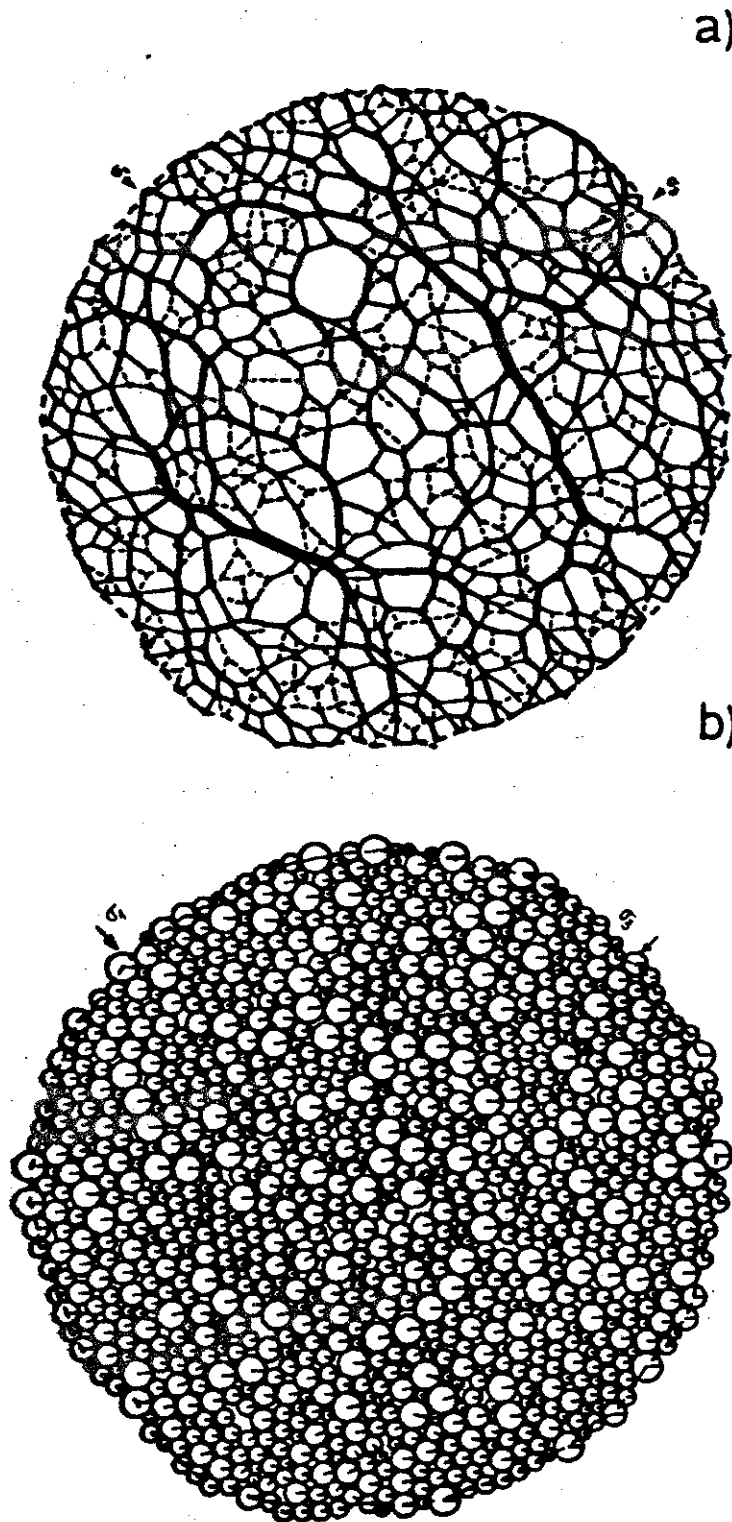


FIGURA 2.19 .- Resultado de "BALL", modelo numérico con 1000 discos sometido a rotación de los ejes principales (Cundall y Strack, 1979)
a) Configuración de las partículas.
b) Distribución de fuerzas entre partículas. Cada segmento está alineado con la fuerza en un contacto y su grosor es proporcional a su valor.

los puentes o cementaciones en la resistencia, y su evolución con ella. En ese trabajo se ha utilizado un contorno "servo-controlado" (se le impone el desplazamiento justo y necesario para conseguir la tensión deseada en el interior de la muestra) y además de tipo "periódico" (en el sentido de que el espacio más allá de él se supone con una configuración de partículas igual a la que se encuentra en el otro extremo del cuadrado; así se superan efectos indeseables producidos por la proximidad de paredes rígidas). La incorporación de las fuerzas de cementación sería un ejemplo de la relativa elasticidad del D.E.M. para incorporar nuevos efectos, dada su estructura explícita.

Métodos similares al D.E.M. también se han empleado en situaciones dinámicas, para reproducir *flujos rápidos* en materiales granulares. El comportamiento global viene gobernado por impactos breves entre partículas y no por contactos duraderos. Campbell y Brennen (1982 y 1985) analizan con un modelo bidimensional la caída, a favor de la gravedad, de una serie de discos circulares por una pendiente indefinida de inclinación variable (figura 2.21). La colisión entre partículas se supone ajustada al choque inelástico con determinada restitución de energía. Tras un impacto la partícula sigue una trayectoria "libre" rectilínea (o parabólica si se considera actuando la gravedad). Si el estado que interesa es el estacionario de equilibrio dinámico, el estudio puede circunscribirse a un elemento rectangular de altura libre y de contornos derecho e izquierdo nuevamente "periódicos": es decir las partículas que, fluyendo, abandonen el rectángulo por su contorno derecho, se supone que ingresan con la misma altura, velocidad y aceleración por el contorno izquierdo. Tras una serie inicial de ciclos de estabilización, se alcanzan unas condiciones estacionarias. Al conocerse todos los datos, pueden estudiarse entonces, en función de la "altura" sobre el plano basal, la velocidad media de las partículas, la energía media, el número de impactos, la "densidad" de partículas, etc. Según dichos autores cuando la pendiente es baja la masa de granos fluye sin discontinuidades de densidad de partículas "en altura". Pero para pendientes de 40 grados el mecanismo de movimiento cambia completamente, de manera que se detecta una capa de granos que se mueven aproximadamente "en bloque", a cierta altura sobre la base, soportados por una especie de "colchón" constituido por unos pocos granos rebotando entre la "capa" superior y la base (ver figura 2.21). Este interesante fenómeno de "fluidificación" podría ser la explicación de algunas altas velocidades y largas distancias de recorrido observadas en algunas

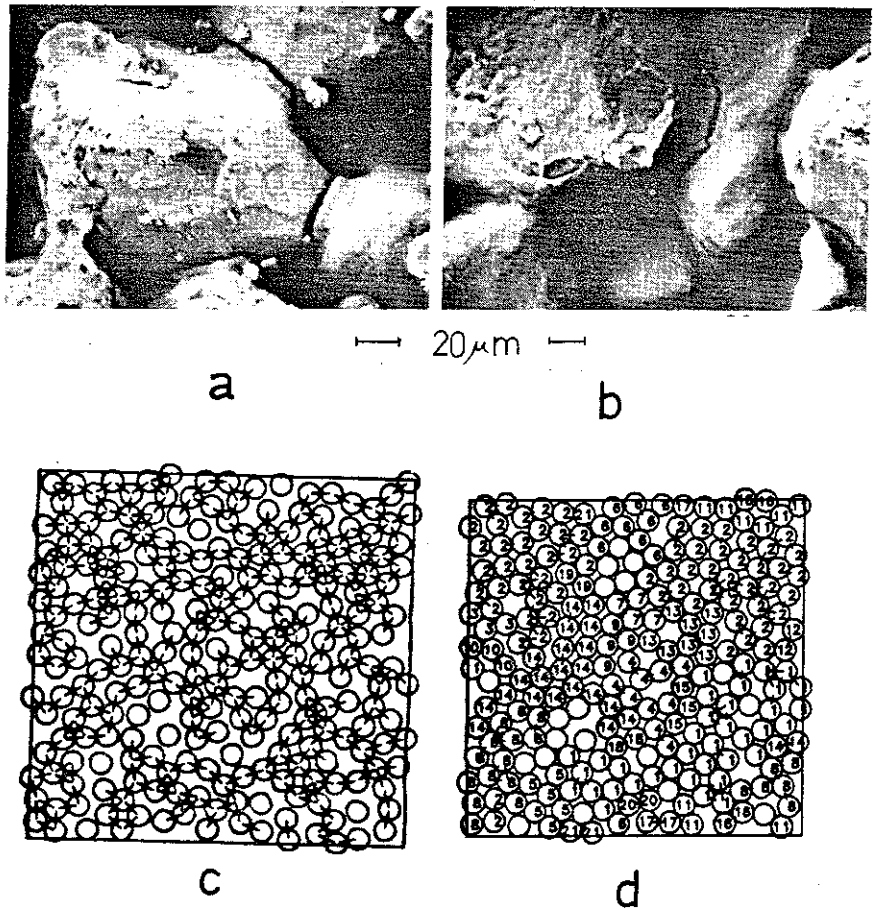


FIGURA 2.20 .- Modelo numérico basado en el D.E.M. para el estudio de la micromecánica de un material granular con cementación entre las partículas (Trent et al., 1987).

(a y b) Imágenes con microscopio electrónico de barrido de un depósito aluvial cementado. Se aprecian los puentes cementados entre partículas, algunos de ellos fisurados.

(c y d) Estado inicial y final de la simulación por ordenador (244 partículas).

coladas o avalanchas naturales. Sin embargo, como señalan los propios autores, la simulación de este fenómeno depende de las condiciones de rugosidad impuestas en la base.

Campbell y Brennen (1983) y Hawkins (1983) también simulan el flujo entre dos paredes con diferencia de velocidad impuesta (flujo de tipo "Couette") para medidas reológicas de "viscosidad" aparente.

Modelos como los anteriores, basados en un choque "instantáneo" entre partículas, pueden ser adecuados para situaciones de baja "densidad" de partículas (como en gases, líquidos o en flujos rápidos y energéticos). Si los choques son muy frecuentes o las partículas tienden a mantener los contactos (situaciones de mayor densidad) el esquema de choque "instantáneo" se vuelve inviable numéricamente e irreal "físicamente". En estos casos es más conveniente arbitrar contactos de duración finita en los cuales se susciten fuerzas de interacción variables, (generalmente proporcionales al "solape" entre partículas), que es justamente lo que hace el citado D.E.M.

Walton (1982 y 1983) usa este último método para simular la caída de una grava esquistosa por una tolva inclinada en situación no estacionaria (figura 2.22). Es de notar que introduce la posibilidad de que las partículas sean poligonales, digitalizando formas reales no circulares. Dicho autor también ha simulado el vaciado de un silo vertical por una trapa inferior, o un ensayo de corte directo en grava esquistosa (figura 2.22).

El problema del vaciado de un silo también es estudiado, vía el D.E.M., por Mroz y Zubelewicz (1982).

Williams (1987) ha trabajado en el problema general de la simulación bi y tridimensional de cuerpos deformables en contacto. El método o modelo presentado, aunque se basa en el fondo en la técnica de Elementos Finitos, se parece poco a un programa "tradicional" de elementos finitos dado el predominio de los algoritmos geométricos de detección de contactos entre los cuerpos o partículas en estudio. Williams hace especial hincapié en la necesaria estructuración de los datos para conseguir cierta eficiencia en los algoritmos. Análogamente a lo comentado

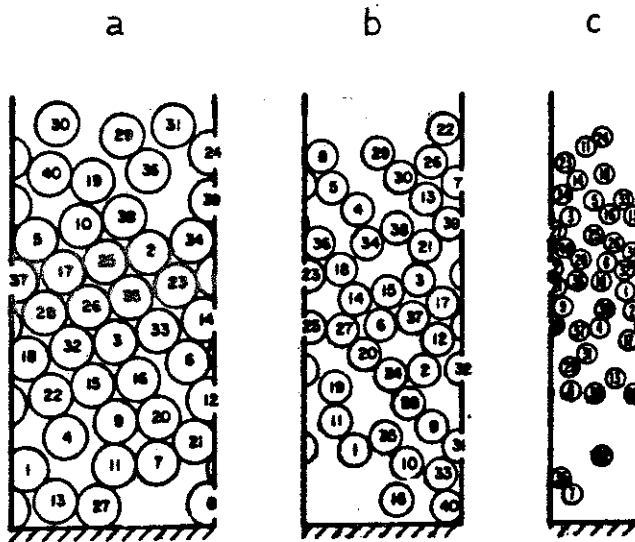
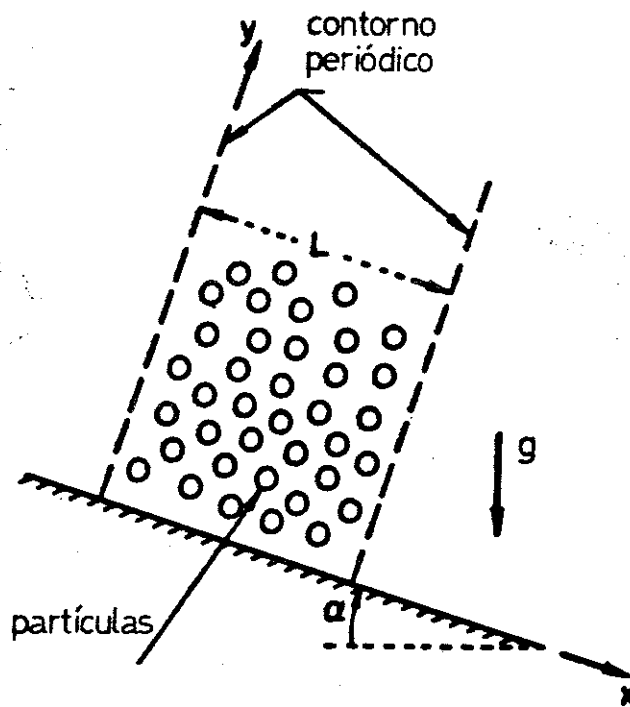


FIGURA 2.21 - Ejemplo de un modelo bidimensional de simulación del flujo de un medio granular por una pendiente indefinida, a favor de la gravedad (Campbell y Brennen, 1982 y 1985).

- a) $\alpha = 20^\circ$.
- b) $\alpha = 30^\circ$.
- c) $\alpha = 40^\circ$.

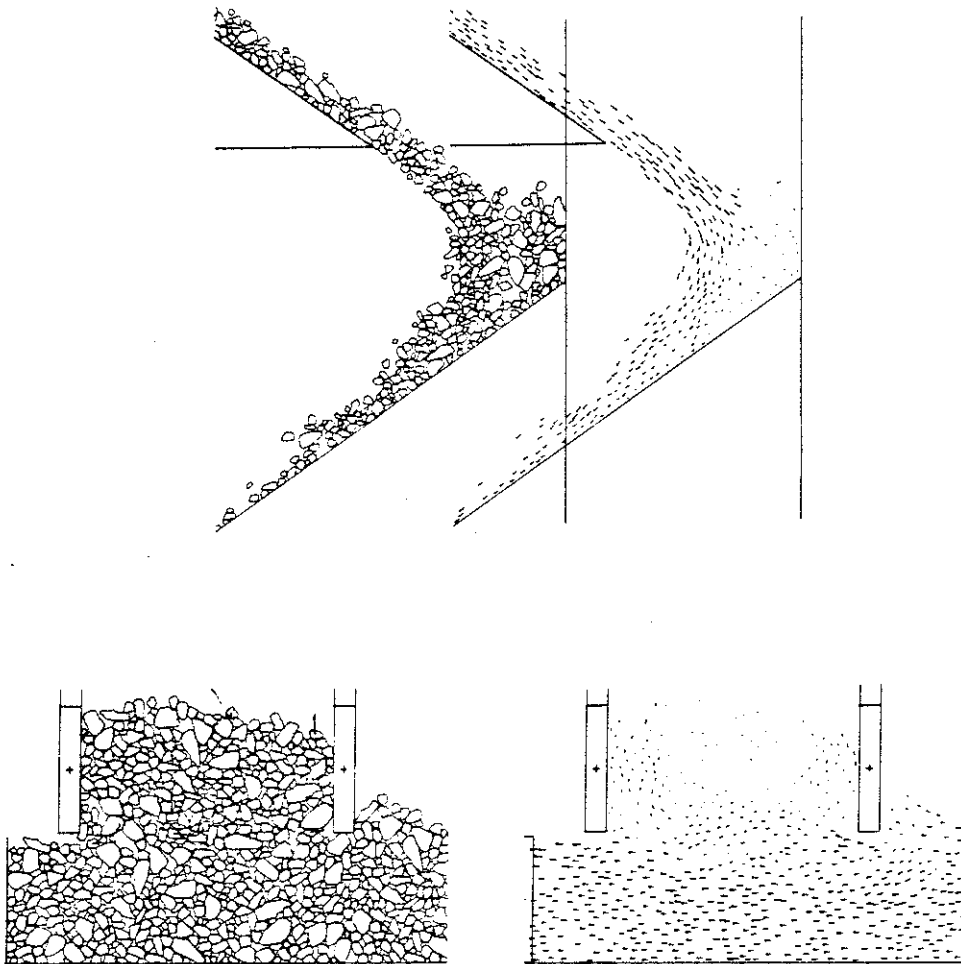


FIGURA 2.22 .- Modelo numérico de simulación del comportamiento de una grava esquistosa (Walton, 1982 y 1983). Arriba: Caída por una tolva inclinada. Abajo: Ensayo de corte directo. Izquierda: Vista de las partículas poligonales. Derecha: Velocidades instantáneas.

para los modelos D.E.M. aplicados a mecánica de rocas, se puede observar la deformabilidad propia de los elementos o partículas, incluyendo la opción de arbitrar su posible fracturación. Entre otros ejemplos se aplica al impacto simultáneo de dos "proyectiles" circulares, sobre un suelo granular formado por partículas cuadrangulares (figura 2.23). La elevada energía inicial de incidencia es amortiguada tras el impacto.

Una simulación muy parecida se encuentra en Scott (1987), pero la penetración se lleva a cabo a velocidad baja, y el modelo numérico está basado en el D.E.M. Este último autor cita los ensayos numéricos sobre material de tipo arena de Werner y Haff (1986), de enfoque similar. También de manera bidimensional estudian los efectos de múltiples impactos y rebotes de los granos de arena, favorecidos por el viento, que es un proceso importante en el movimiento y formación de las dunas.

A modo de conclusión se puede resumir que la sencillez conceptual y las grandes posibilidades de simulación de los métodos tipo D.E.M. o parecidos, los convierten en una herramienta de investigación del microcomportamiento de los materiales granulares utilizada por numerosos autores. Estudios en curso sobre la mecánica de la capa de balasto bajo la vía de ferrocarril (Estradé, 1988) utilizan este método.

El D.E.M. constituye un antecedente directo de la parte mecánica del modelo implementado en la presente tesis (ver capítulos 3 y 5).

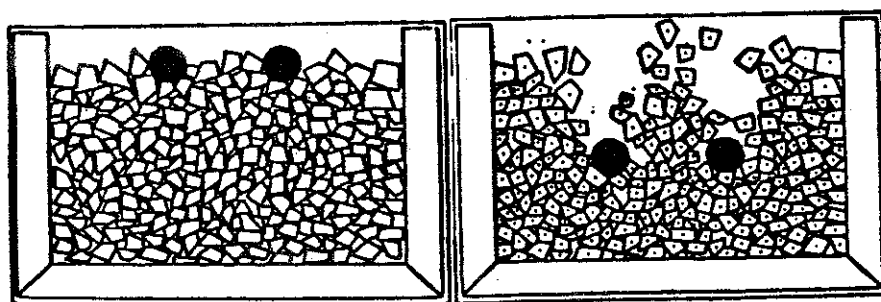


FIGURA 2.23 .- Impacto de dos proyectiles circulares sobre un suelo granular (Williams, 1987).

2.4.3 OTROS MODELOS DE SIMULACION NUMERICA. PERSPECTIVAS

De una manera muy general se podría llamar *modelado numérico* a la simulación de sistemas naturales por ordenador. Esta herramienta ha sido aplicada en diversos campos, obteniéndose significativos avances. Simular puede ser la única forma de comprender fenómenos reales de gran complejidad y difíciles o imposibles de observar o experimentar directamente.

Diversas áreas están interesadas en el comportamiento de medios "discretos". Por diversos motivos es crucial su estudio, además de en Mecánica del Suelo, en campos tan diversos como: Farmacología, agricultura, ecología, geofísica, mecánica estelar, ingeniería nuclear, matemática estadística, física molecular, procesos de manufactura industrial, etc. En mecánica estelar, por ejemplo, se ha simulado el comportamiento y conformación de los Anillos de Saturno. La simulación por ordenador a base de partículas "discretas", ha sido utilizada con éxito desde hace varias décadas para determinar propiedades macroscópicas a partir del comportamiento al nivel más microscópico: del movimiento de átomos o moléculas. Estos estudios han sido particularmente útiles para identificar cómo diversos aspectos de las fuerzas interatómicas contribuyen al comportamiento macroscópicamente observable. Así, se ha estudiado la estructura, la termodinámica y la dinámica de gases y líquidos. El enorme número de partículas que normalmente forman parte de los sistemas naturales ($\simeq 10^{23}$ moléculas) ha permitido aplicar con éxito los métodos estadísticos a conjuntos de moléculas dando lugar al nacimiento de la Mecánica Estadística y la Teoría Cinética. A partir del estudio de las leyes que gobiernan el movimiento de las partículas individuales se infiere estadísticamente propiedades globales de gran número de ellas.

El problema de determinar el movimiento individual de un conjunto de N partículas que interaccionan entre sí es conocido generalmente con el nombre del "problema de los N cuerpos", y no es abordable analíticamente por Mecánica

clásica por su complicación. La resolución numérica por simulación puede utilizar básicamente dos métodos: El de Monte Carlo y el de Dinámica Molecular (Hansen y McDonald, 1986). Ambos métodos obtienen buenos resultados trabajando con un número de partículas del orden del millar. En el primero se generan distintas configuraciones del sistema de partículas hasta llegar a construir una colección de configuraciones que cumplan determinadas reglas globales conforme a las predicciones de la Mecánica Estadística. Esta generación se realiza mediante un azar debidamente controlado. La utilización de números aleatorios explica el nombre que se le da a dicho método, recordando el de uno de los más famosos casinos del mundo. Los estados así generados son independientes entre sí y no se puede simular la evolución del sistema a lo largo del tiempo. Ello impide abordar estudios fuera del equilibrio termodinámico (Giró y Padró, 1983). Esto último sí que se puede hacer en los Métodos de Dinámica Molecular. En su aplicación normal, un determinado número de átomos o moléculas se sitúan en una célula de "contornos periódicos" como los citados en 2.4.2.3. Se supone conocido el potencial intermolecular (normalmente funciones inversas de la distancia a la sexta o decimosegunda potencia) que supone interacciones independientes entre pares de moléculas. La situación inicial no es estacionaria. Las moléculas se pueden mover "libremente" en función del potencial con sus vecinas y de las leyes de Newton. Tras un determinado "número de ciclos" la situación se puede considerar estacionaria, en equilibrio dinámico, y se pueden "extraer" propiedades termodinámicas y estructurales por promedios espaciales y temporales (Rahman, 1966; Finney, 1983; Giró et al., 1980; Balcells et al., 1986; Gubbins 1985).

La simulación por ordenador de la estructura atómica y de las propiedades de los cristales ha demostrado ser un importante medio de investigación en el estudio del estado sólido (por ejemplo Bacon y Liang, 1986). Estos estudios se basan también en la consideración de los átomos individuales que forman los metales y que ejercen entre ellos un potencial atractivo-repulsivo función (inversa) de la distancia. Por este medio también es posible estudiar las distorsiones o dislocaciones que pueden introducir determinadas impurezas o anomalías en la estructura ordinaria del metal (Serra y Bacon, 1986). En muchos casos estos estudios han puesto en evidencia la existencia de microestructuras estables no tipificadas anteriormente, y que son la explicación última de las propiedades macroscópicas de algunas maclas.

En física atómica las recientes teorías “gauge” en un retículo (“Lattice Gauge Theories”) también utilizan métodos de simulación en ordenador (Baig, 1987). Aplicado a la física del plasma, el “método de las partículas” desarrollado actualmente en Francia por el grupo de Pierre Arnaud, por ejemplo, sirve para encontrar explicaciones en ciertos campos en los que otros métodos fracasan. Los costes de ordenador son mucho más elevados, pero es el único posible en caso de turbulencias que provocan comportamientos muy complicados. En física del plasma el método de las partículas es el único que da ciertas informaciones ya que sigue perfectamente el movimiento del fluido sin las rigideces de los métodos clásicos de diferencias finitas y de los elementos finitos, concentrados en la resolución de sistemas de ecuaciones en derivadas parciales que no encajan tanto en la física del proceso.

Se trata, en todos estos modelos de simulación citados, de verdaderos *experimentos teóricos* controlados, en los cuales el laboratorio ha sido sustituido por métodos numéricos en ordenador.

Claro está que al tratarse de simulaciones no es posible obtener demostraciones en el sentido tradicional de la palabra, debiéndose hablar de “indicaciones” (Baig, 1987).

La reciente aparición de una nueva revista en este campo, “Molecular Simulation” es sólo un nuevo ejemplo del auge de estas técnicas, que va en relación directa con el desarrollo de los ordenadores. En efecto todos los métodos citados comportan un elevado coste en horas de ordenador. En casos extremos puede consumirse centenares de horas de unidad central de proceso (C.P.U.) en los mayores y más potentes ordenadores vectoriales actuales (tipo CRAY-I) incluso para número moderado de partículas, lo que puede traducirse en años de C.P.U. en ordenadores más modestos (tipo VAX o IBM). Sin embargo la reciente introducción de los *procesadores en paralelo* abre nuevas perspectivas. En estas computadoras se disponen en paralelo varias CPU's interconectadas. Cada una puede desarrollar simultáneamente un subproceso (Fox y Messina, 1987). La configuración puede ser por ejemplo de 4 potentes microcomputadores en paralelo pero es variable, llegándose en la “Máquina de Conexión” (Hillis, 1987) a disponer de cerca de 65000 pequeños microprocesadores interconectados. En algunos casos se han desarrollado

construcciones de ordenadores "ad hoc", especializados en el soporte de determinados esquemas de simulación, por ejemplo sobre la evolución de cúmulos estelares (Hut, 1987).

En la actualidad la programación de estas máquinas es relativamente complicada (Gelernter, 1987). Para aprovechar su potencia de cálculo la programación debe estructurarse en subprocesos paralelos, lo cual en algunos casos se puede corresponder bastante bien con la realidad física simulada. Según Hillis (1987) ciertos procesos físicos disfrutaban de un cierto "paralelismo intrínseco", como puede ser el fenómeno de integración de imágenes en el cerebro humano. O los cambios de presión de determinados minúsculos volúmenes de aire, interaccionando, provocado por el flujo aerodinámico en las cercanías del ala de un aeroplano. O el movimiento y las colisiones de las moléculas de aire en las cercanías de la citada ala. La mayor potencia de cálculo permitirá en estos casos considerar el aire tal como es —un conjunto de partículas interaccionando entre sí y con el ala— lo que sin duda se ajusta más a la realidad que la resolución de un determinado sistema de ecuaciones diferenciales.

Volviendo al campo de las Geociencias, el pensamiento sobre las *posibilidades de simulación* micromecánica del comportamiento del suelo también ha evolucionado con el tiempo. En Lambe y Whitman (1979) se encuentra la opinión de Lambe que en 1969 señalaba: "Por supuesto en una masa de suelo existen innumerables puntos de contacto. Por ejemplo en 1 cm^3 de arena fina el número de contactos es del orden de 5 millones. Por tanto es imposible plantear una ley tensión-deformación del suelo considerando el comportamiento en los contactos, aunque pudiéramos describir exactamente lo que sucede en cada uno de ellos". Bear (1972) es de opinión parecida: "sin embargo, a pesar de la aparente simplicidad de esta aproximación (la microscópica) es extremadamente difícil resolver el problema incluso de tres moléculas (suponiendo conocidas todas las fuerzas, lo cual es también dudoso)". A pesar de ello, según cita Rodríguez Ortiz (1974), Scott en 1969 afirmaba: "con los grandes ordenadores digitales parece potencialmente fructífera la generalización de esta técnica (modelos numéricos) a la formación y análisis de un medio granular con las partículas individuales que se deseen y determinadas propiedades de contacto". Trollope (1970) opina que las aproximaciones numéricas discretas (del tipo de su

“mecánica clásica”) son aplicables a cualquier material incluso los “continuos”, y que sólo con estos métodos se puede atacar de manera optimista el problema de prever el comportamiento completo carga-deformación de los sólidos.

Scott (1987) continúa defendiendo que “en lugar de tratar de llegar a relaciones constitutivas complejas para masas de material compuestas de bloques o granos, con la subsecuente determinación de los parámetros con ensayos de laboratorio sobre suelos reales (tarea difícil en sí misma), puede ser posible simular sencillamente el conjunto de la masa granular” mediante modelos numéricos discontinuos.

Es posible que las afirmaciones en uno u otro sentido sean excesivamente tajantes. La realidad es que a efectos “ingenierilmente prácticos” los modelos granulares discontinuos son insuficientemente válidos. Se está muy lejos de lo abogado por Scott, y es posible que no valga la pena llegar nunca a métodos discontinuos válidos que puedan servir para el diseño frente a problemas de contorno generalizados (muros, pilotes, zapatas...), como tampoco llega tan lejos la simulación por dinámica molecular en líquidos. La verdadera utilidad de los métodos discontinuos puede residir en su capacidad para explicar la razón de determinados comportamientos del suelo y la interrelación física de fenómenos presentes.

En este punto puede ser ilustrativa la siguiente cita de Bear (1972):

“... Un tema que surge es porqué elaborar y tratar el modelo conceptual, si en cualquier caso deberemos recurrir al laboratorio (experimentación) para determinar los coeficientes. La respuesta es que utilizando la aproximación con modelo conceptual se gana conocimiento del fenómeno investigado y del papel de los varios factores que intervienen. También se gana conocimiento de las contribuciones de los distintos fenómenos en los parámetros de las ecuaciones globales (estructura interna de los parámetros). Esta información será siempre de interés ...”.

Así pues, sí que es conveniente contar con una vía alternativa que, además de describir el “cómo” y el “cuanto” (cosa que se puede hacer razonablemente bien con modelos globales de tipo fenomenológico, por “ajuste de curvas” a resultados experimentales), intente dar explicaciones del “porqué”. Explicaciones que necesariamente deberán pasar por un modelo discontinuo y particular, por ser la

realidad física (el suelo) efectivamente así.

Por otro lado, el peligro de una “modelística” indiscriminada sería llegar a confundir las simulaciones con la realidad. Esta última en general es mucho más compleja que el modelo que la representa imperfectamente: “El mapa no debe sustituir al terreno (Alfred Korzyski, en Kurtovich, 1985). Los modelos deben ser contruídos y contrastados en paralelo al comportamiento real del suelo.

En este encuadre, en la presente tesis se desarrolla un modelo de simulación numérica de suelos eminentemente granulares, incorporando la fase líquida y gaseosa, a bajos contenidos de humedad.

PARTE II

**PLANTEAMIENTO DE UN MODELO MATEMATICO DISCONTINUO
DE COMPORTAMIENTO DE SUELOS FINOS NO COHESIVOS
A BAJOS CONTENIDOS DE HUMEDAD.**

CAPITULO 3

MODELO CONCEPTUAL: ESTRUCTURA, FLUJOS, FUERZAS Y MOVIMIENTOS

3.1 INTRODUCCION

El comportamiento real de un suelo (in situ o en laboratorio) sólo puede conocerse de manera puntual o parcial, a través de un número limitado de datos y medidas de tipo global.

Sin duda será interesante contar con un modelo de comportamiento de dicho suelo, modelo que será siempre una simplificación. La validez de la simplificación depende del objetivo que se pretende conseguir con el modelo.

El primer paso para conseguir un modelo de comportamiento será establecer un *modelo conceptual* a partir de la situación real, que integre los principales rasgos de la respuesta del suelo. Esto, en definitiva, es lo que se lleva a cabo en este capítulo. Con posterioridad se puede implementar el modelo conceptual de forma práctica en un modelo operativo de trabajo. La implementación de dicho modelo, en nuestro caso matemático y resuelto por ordenador, se abordará en el capítulo 5.

De manera simplificada puede decirse que muchos modelos consideran la presencia de agua de una manera parcial: o bien ignoran su existencia, o bien la suponen estacionaria. En otros, en el caso particular de estudiar el problema de

la consolidación, se considera su movimiento (flujo y drenaje) como consecuencia de la deformación del esqueleto. Por otro lado los modelos eminentemente de flujo han considerado tradicionalmente la matriz sólida como fija, rígida e indeformable. En ciertos modelos (Grismer et al., 1986 b) se considera a la fase sólida como una especie más fluyendo. A veces en los modelos que estudian conjuntamente el flujo y la deformación se dispone de tratamientos separados para ambos problemas que se acoplan con posterioridad: tras un análisis mecánico se realiza un ajuste de flujo, etc. (Lloret et al. 1987, 1988).

En la presente tesis y en esta parte segunda se concibe, se presenta, se discute y se implementa un modelo conjunto flujo-mecánico que considera simultáneamente el flujo de especies en el suelo no saturado y la deformación del mismo. Todo ello se lleva a cabo a través y a partir de la observación detallada de la geometría discontinua del material, con lo cual se integra y se valora convenientemente la importancia de la estructura mesoscópica, que, como se ha visto, es determinante en su comportamiento. Por otro lado con el modelo también se puede estudiar el estado saturado drenado.

Con este enfoque se solucionan simultáneamente en el espacio y en el tiempo los cuatro tipos de problemas distintos distinguidos por Alonso et al. (1987) dentro del contexto flujo-deformacional general:

- Flujo de agua
- Flujo de aire
- Balance de energía interna
- Campo de tensiones y deformaciones.

3.2 DISPOSICION GEOMETRICA Y ESTRUCTURA DEL SUELO

En un modelo continuo la única geometría que debe especificarse es la del contorno. Si el material es heterogéneo lo único que debe añadirse es la variación de sus propiedades con la posición dentro del continuo. El planteamiento de un modelo discontinuo de suelo conlleva el establecer de manera pormenorizada cual es el reparto de las distintas fases (sólido, líquido, gas) en el espacio. Además de las posibles acciones de contorno exterior, deberán especificarse las interacciones internas entre las fases disjuntas (por ejemplo aire y agua a través de la interfase), y aun entre elementos de una misma fase si estos son disjuntos (por ejemplo acciones entre distintas partículas sólidas individuales). Por lo tanto se ha de adoptar una forma concreta para cada una de las fases presentes en el suelo y se han de definir sus interacciones.

Las especies y fases presentes en el suelo, que se han resumido en la figura 2.1, pueden concebirse en disposiciones más o menos ideales (figuras 2.18, 3.1 y 3.2).

Para suelos finos no cohesivos puede pensarse en las *partículas sólidas* como granos de forma cualquiera, interaccionando dos a dos a través de los contactos físicos. Dichos granos tendrán una naturaleza mutuamente “no activa” en el sentido de que las fuerzas entre ellos se transmitirán de forma concentrada a través de los contactos, en lugar de ser debidas a atracciones “a distancia” (de tipo iónico, adhesivo, etc.). La forma de las partículas puede ser más o menos esférica en función del origen e historia del suelo y seguir una curva granulométrica determinada, pero lo que da realmente carácter a la estructura que formen esos granos es el conjunto de huecos o *poros* que quedan entre ellos (porosimetría) más que la citada distribución de tamaños de grano. Por otro lado los granos pueden ser agrupaciones estables de partículas menores o de componentes mineralógicos, con algún tipo de fuerza que las mantenga unidas.

El *agua intersticial* podrá contener sales y aire en disolución. En este suelo discontinuo ideal con bajo contenido de humedad, el agua, forzada por fenómenos

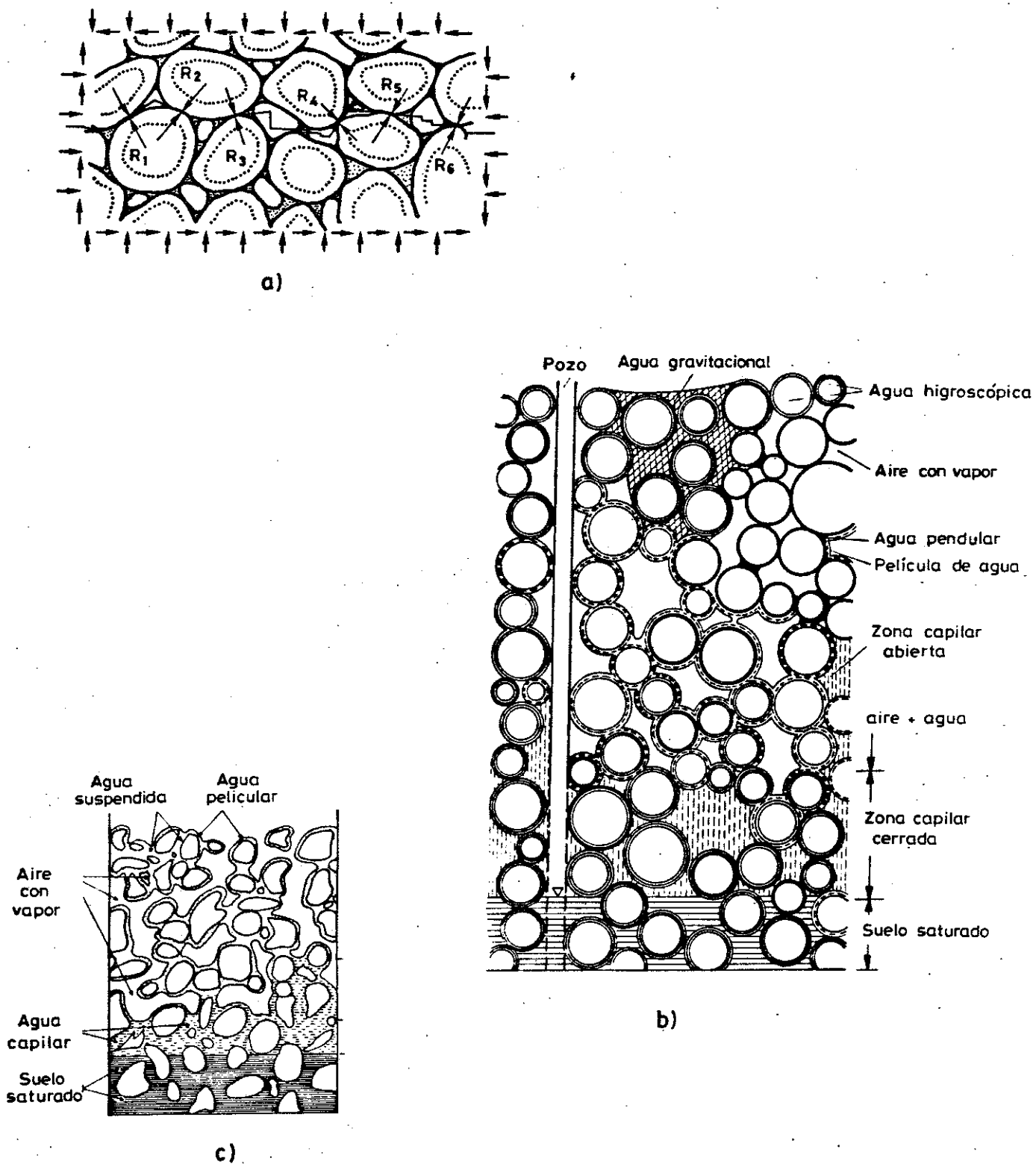


FIGURA 3.1 .- Ejemplo de disposición de las fases en un suelo ideal:
 a) Según Sparks (1969).
 b) Según Kovacs (1981).
 c) Según Custodio y Llamas (1983).

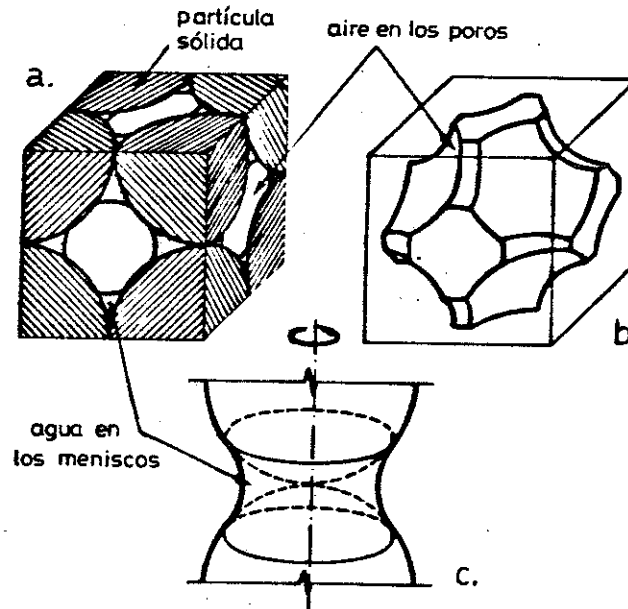


FIGURA 3.2 .- a) Disposición geométrica en un elemento de suelo ideal no saturado. Se ha usado como ejemplo una estibación cúbica regular.
 b) Forma aproximada de la fase gaseosa en un poro.
 c) Forma aproximada del menisco de agua alrededor de un contacto.

de tensión superficial, tenderá a reducir su superficie interfacial con el aire. Como se discute en detalle en el capítulo 4, la forma que tiene el agua de conseguirlo es disponiéndose alrededor de los contactos entre los granos sólidos o en cualquier angostura del suelo, formando los denominados "meniscos", con geometría y succión que también se investigará (ver figura 3.2). Adicionalmente parte del agua quedará fuera de los efectos de tensión superficial, adherida en fina película sobre la superficie de los granos, en mayor o menor grado según sea la naturaleza de los mismos y la magnitud de las fuerzas de adhesión líquido-sólido. En el epígrafe que sigue se tratará de caracterizar el espesor y propiedades de dicha película.

La parte de poros no ocupada por el agua lo estará por aire (figura 3.2, b) que puede estar húmedo con una cierta cantidad de vapor de agua. Como la conexión

entre poros es grande (dada la baja humedad) el aire se podrá mover bastante libremente de unos a otros.

3.2.1 CARACTERISTICAS DE LA PELICULA DE AGUA ADHERIDA A LOS GRANOS

En el estado de suelo no saturado parte del agua cubre la superficie de los granos en forma de una fina película o "film". Fuerzas de tipo adhesivo entre los minerales del esqueleto sólido y las moléculas de agua las retienen contra la gravedad y la "succión ambiental". Estas fuerzas son consecuencia de las cargas electrostáticas asociadas a la superficie de los granos, generalmente negativas, que pueden polarizar y orientar a los dipolos que constituyen las moléculas de agua (ver figura 3.3).

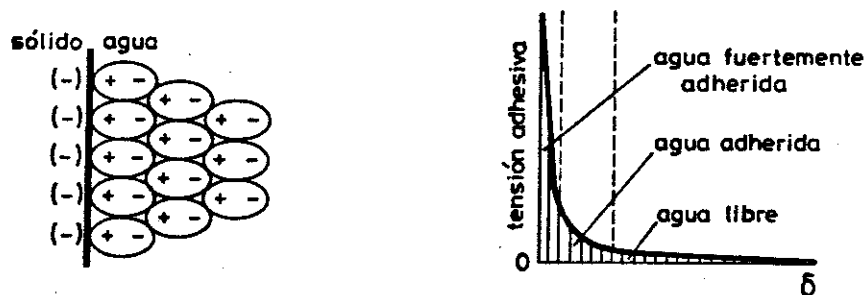


FIGURA 3.3.- Distribución de las moléculas dipolares de agua en las cercanías de los granos del esqueleto sólido (Kovacs, 1981).

No está del todo claro en qué medida este efecto está influenciado por el carácter mineralógico y químico de los granos. Hay minerales que son más hidrófilos que otros, y ciertas estructuras de algunas arcillas, junto con la presencia de algunos cationes, también modifican las características de esa película, en particular su espesor.

El efecto polarizante se transmite a sucesivas “capas” de dipolos de agua, pero su acción total se diluye marcadamente con la distancia. Este tipo de fuerzas se caracterizan generalmente en física teórica como una tensión de adhesión (P_δ) inversamente proporcional a la sexta potencia de la distancia a la superficie sólida (δ). Es decir, si C_δ es una constante dependiente del material, la relación entre la tensión de adhesión sobre un elemento diferencial de agua a una distancia δ es del tipo hipérbola de sexto orden:

$$P_\delta = \frac{C_\delta}{\delta^6} \quad (3.1)$$

El efecto total o neto, $P_{\delta TOT}$, sobre la última “capa” de moléculas de la película vendrá determinado por esta ecuación pero también por la interacción de esta última capa con las anteriores y con la fase gaseosa a continuación de ella. En este sentido Aitchison (1960), en base a unos pocos datos aproxima (según él de manera “grosera”) la relación entre $P_{\delta TOT}$ y la distancia a la interfase sólido-líquido mediante una expresión análoga a la de la ecuación 3.1, pero con el exponente del denominador igual a 2.75.

Al aumentar la “succión ambiental” se comprueba que los espesores de esas películas adheridas disminuye, porque las “últimas” moléculas habrán pasado a vapor (habrán sido “succionadas”) antes de que se haya restablecido el equilibrio dinámico entre las moléculas de agua adheridas (que en cierto número se vaporizarán) y las del vapor (que simétricamente quedarán atrapadas por las fuerzas atractivas netas, $P_{\delta TOT}$).

No es descabellado establecer una especie de equilibrio estático sobre la última capa de moléculas del film entre la succión y dicha tensión atractiva total, $P_{\delta TOT}$, debido a efectos adhesivos (ver figura 3.4). Como consecuencia de lo expresado anteriormente la relación entre $P_{\delta TOT}$ y δ , aún siendo del mismo tipo que la ecuación 3.1, tendrá un exponente distinto, b , a determinar sobre datos reales juntamente con C_δ . En resumidas cuentas se puede aceptar una dependencia de δ (ahora espesor total del film) con la succión, s , del tipo:

$$s = \frac{C_\delta}{\delta^b} \quad (3.2)$$

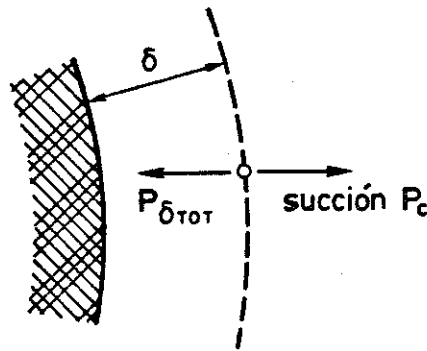


FIGURA 3.4 .- *Equilibrio entre película adherida de espesor δ y la succión.*

Kovacs (1981) mantiene el valor de seis para el exponente b , pero cita a otros autores (Juhász, Mattson, Vageler) que asumen valores distintos (entre 2 y 3). Datos reales sobre espesores de la película adherida parecen sugerir también exponentes menores de 6, como se verá más adelante dentro de esta misma sección. Se pueden encontrar en la literatura otras expresiones del espesor de la película en función de la succión: por ejemplo, Karube (1983 b) incluye una función inversa del logaritmo de la succión. Pero seleccionando las constantes adecuadas, todas resultan en una relación bastante similar: La película reduce su espesor con el aumento de la succión, marcadamente primero, y de manera más paulatina después.

Hay que resaltar que dentro de la superficie de estas películas adheridas no rige la tensión superficial (como lo hace en los meniscos), dado que el agua que engloba no puede considerarse justamente "libre" o en "masa". Esto es así porque como se ha visto existen otras fuerzas (las de adhesión) adicionales a las que actúan sobre las moléculas de agua alejadas de cualquier superficie sólida. Así estas películas presentan gran superficie al aire, y con curvatura generalmente de signo contrario a la de los meniscos, pero ello no vulnera los dictados de la tensión superficial, dado que el agua no es libre y la superficie no tiene asociada por tanto ninguna energía interfacial libre.

Igualmente parte de los estudios sobre esas películas de agua adherida vulneran leyes físicas o concepciones que se puedan tener sobre el agua "en masa", pudiéndose catalogar el comportamiento del agua en esas condiciones como de *anómalo*. Por ejemplo, mediante técnicas espectroscópicas por resonancia magnética nuclear se ha podido constatar la existencia de un film de agua líquida de unos 100 Å sobre la superficie del hielo por debajo del punto de congelación del agua, hecho ya postulado por Faraday en el siglo pasado (Clifford, 1975). Además de la presencia de estos films también es anómalo su comportamiento, que dependerá de su espesor.

Esta última consideración abre paso a un intento de cuantificación aproximada de dichos espesores, δ . Las mediciones más o menos directas de dicho valor son complicadas debido a los tiempos largos precisos para el equilibrio, por no hablar de la posible influencia perturbadora del mismo proceso de medida en la (pequeña) magnitud a medir. Clifford (1975) cita las mediciones de espesores que siguen. Sobre vidrio en condiciones cercanas a las atmosféricas, Derjaguin observó películas estables de 500–700 Å. Bangham, a humedades relativamente bajas detectó espesores de agua absorbida sobre mica de 20 Å, ó mayores según las condiciones de ensayo. Zorin, sobre vidrio, acotó el espesor entre 100 y 400 Å. Read hizo lo propio sobre sílice en el orden de los 250 Å.

Dorsey (1968) por su parte cita otros tantos valores de otros cuantos autores. Según él, Briggs, bajo una humedad del 99% (unas 14 atmósferas de succión) midió espesores de película de agua sobre cuarzo de 270 Å. También McHaffie estudió el fenómeno concluyendo que en circunstancias diversas el film puede englobar unos cientos de capas de moléculas de agua sobre vidrio (del orden de 900 Å), reduciéndose a decenas en el caso de que la superficie fuera de platino (unos 90 Å). Por otro lado Bastow consiguió espesores estables hasta de 2000 Å.

En el campo de los minerales arcillosos se estudia este fenómeno dentro del marco del modelo de la capa doble. En estos minerales la carga neta en superficie puede ser mayor, como lo es también la superficie específica, y tiene mucha importancia la disolución de iones, variando mucho el agua adsorbida. Espesores típicos de la capa doble pueden ser de 200 a 400 Å (Lambe y Whitman, 1979; Means y Parcher, 1963).

Según parece pues la naturaleza de la superficie puede afectar al espesor de la película. Sin embargo las anteriores medidas son un tanto dispersas, no especificándose debidamente las condiciones de succión (humedad) y de ensayo. En efecto, se ha constatado ampliamente el gran efecto que puede tener incluso la más mínima contaminación de la superficie por grasa o polvo, que sólo puede ser evitado con laboriosas técnicas experimentales de elaboración y limpieza de las superficies. Estos motivos conducen a Clifford y a Dorsey a cuestionar algunos de los resultados por ellos recogidos.

Una presentación de medidas algo más unificada se encuentra en Evans (1983). Sus ensayos se hicieron a través de la determinación de la superficie específica de las muestras ("sandy loam soil" e "immature sand" separadas en varias fracciones) por la técnica del recubrimiento con una monocapa de éter etilénico. Posteriormente se determinó también el volumen de agua retenido por la superficie de las partículas mediante la técnica de equilibrado de humedad sobre placa porosa a varias succiones (establecidas aumentando convenientemente la presión del aire en la campana y manteniendo la presión del agua igual a la atmosférica en la piedra porosa). Conocido el volumen de agua retenido para cada succión, se calcula el espesor medio aparente de la película de agua dividiéndolo por la superficie específica. Sus espesores resultantes oscilan entre 23 y 53 Å, y se muestran en la figura 3.5.

Dejando aparte la pequeña dispersión de resultados debido a la técnica experimental se puede comprobar que los datos se ajustan, por materiales, mejor a una hipérbola como la de la ecuación 3.2 si se supone exponente b inferior a seis. En concreto una hipérbola "razonable" para el "sandy loam" sería la que en la figura se incluye con trazo continuo (ecuación 3.2 con $b = 4.5$, $C_\delta = 16.8^{4.5}$, δ en Å, succión en MPa).

Es posible que el agua en un suelo real (con gradaciones de tamaños mayores) actúe de forma distinta. Grismer et al. (1986 b) por ejemplo, investigando el movimiento de sales y agua en suelos no saturados ("silt loam") constatan que para humedades (volumétricas) por debajo del 4% no es posible detectar transporte líquido. Ese 4%, basándose en la curva de retención de humedad, equivale a una humedad relativa del aire del 68% o una "succión ambiental" de unas 525 atmósferas.

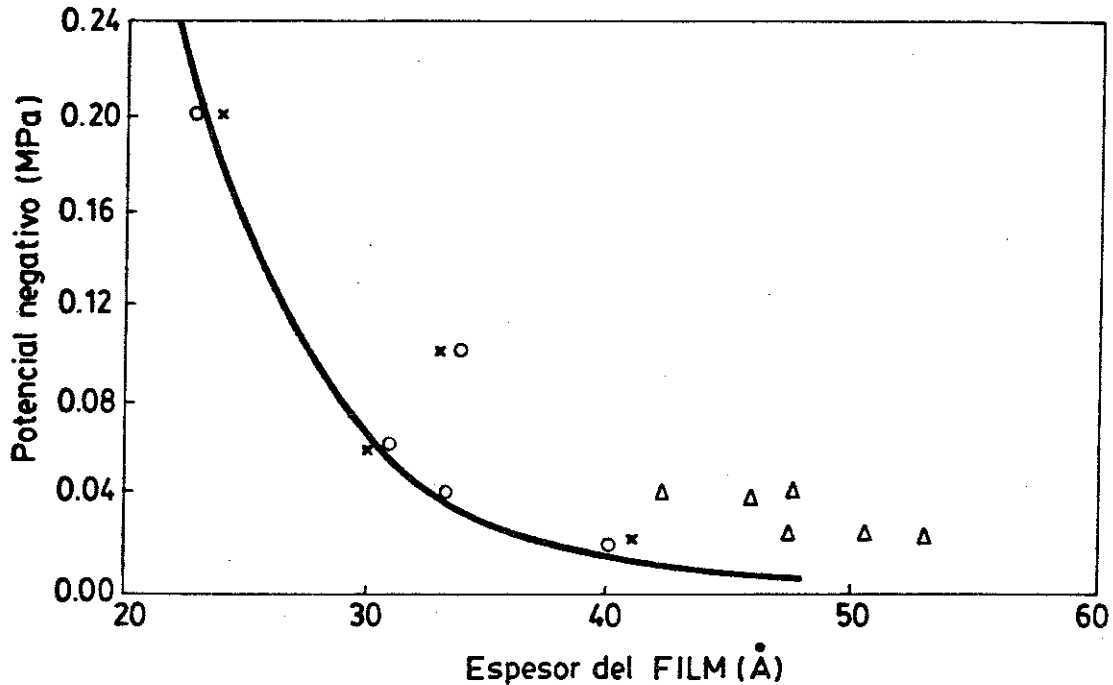


FIGURA 3.5.- Espesores de la película en función de la succión para varios materiales, determinadas en Evans (1983). En trazo continuo se incluye la ecuación 3.2 con $b = 4.5$, $C_{\delta} = 16.8^{4.5}$, δ en Å, succión en MPa.

x: "sandy loam", 0.5 a 1 mm.

o: "sandy loam", 1 a 2 mm.

Δ: "immature sand".

Según dichos autores ésto es debido a que las películas de agua son sólo de "unos pocos diámetros moleculares" de espesor y ello retarda severamente el movimiento de agua y solutos. Sin embargo estiman en estas condiciones (4% de humedad volumétrica) un espesor medio de las películas de $0.6 \mu\text{m}$, es decir 6000 \AA , que en realidad equivaldría a 2000 ó 3000 "capas" de agua.

Trabajando también con suelos reales, Kovacs (1981) utiliza el concepto de película de agua adherida para modelar la parte "superior" (succiones altas, zona de "adhesión") de la curva de retención de humedad de los suelos (relación entre la

humedad, ω , y la succión, ψ , expresada como altura positiva de columna de agua equivalente), a partir de valores geométricos y estructurales de los mismos (Diámetro efectivo, D_h ; porosidad, n , y una especie de coeficiente de forma α , que vale seis para las esferas por ejemplo). Ajusta el modelo con una larga serie de valores extraídos de curvas de retención de humedad de distintos materiales (cuarenta y cuatro, desde arcillas hasta vidrios machacados, con predominio de arenas finas) resultando en su notación:

$$\frac{\omega\psi^{\frac{1}{6}}}{1-n} = C_K \left(\frac{\alpha}{D_h}\right)^{2/3} \quad (3.3)$$

donde D_h y ψ están expresados en cm, y C_K es una constante.

Para dar forma a la anterior expresión acepta como enteramente aplicable la ecuación 3.2 con exponente $b=6$, lo que significa que está suponiendo una relación entre el espesor del film (δ , también en centímetros) y la succión (ψ) del tipo:

$$\psi = \frac{C_K^6 \left(\frac{D_h}{\alpha}\right)^2}{\delta^6}$$

o, si se prefiere,

$$\delta = \frac{C_K \left(\frac{D_h}{\alpha}\right)^{1/3}}{\psi^{1/6}} \quad (3.4)$$

Un valor promedio que puede extraerse de sus datos es $C_K \simeq 2.5 \times 10^{-3}$. Para hacernos una idea, suponiendo succiones del orden de una atmósfera y partículas esféricas de "calibre" $4 \mu\text{m}$, $40 \mu\text{m}$ y $400 \mu\text{m}$ la ecuación 3.4 resulta en espesores de película de agua adherida de unos 3200 \AA , 6900 \AA y 15000 \AA , respectivamente. Estos valores parece excesivos a primera vista, y en este sentido el modelo de Kovacs para la parte "superior" de la curva de retención de humedad (ecuación 3.3) representa un ejemplo más de modelo bien adaptado a los datos reales (y así "modela" bien y es "útil") pero basado en suposiciones no del todo exactas (en este caso que el agua retenida está toda en forma de película) y por ello no es del todo satisfactorio.

De los resultados aquí citados sobre mediciones más o menos directas del espesor del film, se deduce que existe una cierta disparidad de valores, que obedece al método

de obtención y a las dificultades experimentales. Sin duda es un tema abierto en el que se esperan mejoras por medida más directa en los próximos años. Sin embargo los datos aportados parecen indicar que el espesor de esa película adherida, debe rondar los centenares de angstroms más que los millares de ellos, y que la variación con la succión puede considerarse del tipo señalado en la ecuación 3.2. A este respecto los valores algo elevados para el espesor del film que se han recogido (Grismer et al., 1986 b; Kovacs, 1981) pueden ser debidos a que, al trabajar con suelos reales con gradaciones extensas de tamaños, no se haya tenido debidamente en cuenta la posibilidad de que el agua no esté toda en forma de película adherida, como ya se ha adelantado. En efecto, es probable que las medidas de humedad de estos autores incluyan agua en forma de meniscos alrededor de los contactos y, más importante incluso, incluyan el agua en pequeños poros todavía saturados; esos volúmenes adicionales habrían falseado los espesores medios calculados, aumentándolos.

Además de conocer el espesor de esa película de agua adherida a la superficie de las partículas, interesa conocer sus propiedades reológicas,. En particular en qué medida su comportamiento bajo esfuerzos tangenciales puede suponerse "anómalo" o por el contrario igual al del agua "libre".

Dos grupos de suposiciones sobre el comportamiento bajo gradientes de presiones de esta película se pueden resumir de la literatura:

- a) Asignar una viscosidad mayor a esas películas de agua
- b) Considerar un espesor δ_0 fuertemente adherido a la superficie y por lo tanto no fluyente.

La tensión sobre las moléculas de agua adheridas tratada por la ecuación 3.1 sería perpendicular a la pared sólida, y por lo tanto no tendría en principio componente en la dirección de un hipotético flujo suscitado por un gradiente "lateral" de presiones. Sin embargo ese gradiente debería desplazar moléculas de agua polarizadas en cierto grado a través del campo eléctrico asociado a las moléculas de la superficie sólida (que es en definitiva el que produce el espesor de film adherido). Este proceso consume energía y se opondrá al movimiento adicionalmente a la viscosidad del agua. Por este motivo el flujo dejará de ser "newtoniano", para pasar a un comportamiento similar al de un plástico de Bingham. A escala global este

comportamiento podría relacionarse con el llamado "gradiente umbral", detectado en suelos, arcillas y también en micro-capilares de vidrio y de cuarzo. Sería aquel por debajo del cual no existe movimiento de agua. Su existencia real ha sido discutida por Tavenas et al. (1983), Blümel y Tamminga (1987) Kany (1987), Pavilonsky (1987) y Kovacs (1981) entre otros. Todas estas aproximaciones al tema son a escala global: se mide el flujo resultante de una muestra de suelo, saturada en la mayoría de los casos, al someterla a un gradiente. Existen dificultades en la medida de flujos exteriores casi nulos (que a veces podrán traducirse en evaporación, en periodos largos). Pero además, a la escala microscópica de nuestro análisis, aunque no existiera flujo exterior, el flujo interior (a través de las películas adheridas en un suelo no saturado) puede ser un medio importante para corregir pequeñas diferencias de presión de agua y de succión, moviendo volúmenes de agua relativamente no despreciables, aunque macroscópicamente no detectables.

A una escala ya microscópica Karube (1983 b) aventura que el flujo a través de esos films debe ser de tipo visco-plástico. Means y Parcher (1963), hablando de la plasticidad de arcillas, suponen que cerca de las partículas, por encima de una capa de agua fuertemente adherida y no fluyente, habrá un cierto espesor de agua de alta viscosidad (como asfalto), decreciente progresivamente con la distancia hasta valores ordinarios.

Sin embargo Clifford (1975) asegura que los experimentos y mediciones concretas que dan alta viscosidad al agua en películas del orden de los millares de angstroms sobre superficies sólidas son erróneos debido seguramente a partículas de polvo o suciedad. Dicho autor, refiriéndose a cuidadosos trabajos de Churaev y otros sobre flujo de agua en micro-capilares de cuarzo, indica que la viscosidad del agua retiene su valor ordinario hasta distancias a la superficie de 70-80 Å, o que en otros casos un espesor no mayor que el indicado se puede comportar como no fluyente. Corroborando lo anterior, Bastow, en Dorsey (1968) determina que para espesores de película de 1000 Å las propiedades del agua son las mismas que las del agua libre. También cita los experimentos de Bulkley, que trabajando con aceites encuentra que si existe un espesor "no fluyente" o estacionario de fluido, éste no excede los 200-300 Å.

De todo lo anterior, Clifford (1975) concluye que para un espesor de película por debajo de los 10 Å, su estructura y comportamiento va a estar determinado por la cercanía e interacción con la superficie, y va a ser completamente distinto al del agua libre. También está claro que si se consideran capas de agua del orden de 1 μm se puede asumir que sus propiedades serán las del agua ordinaria. Aunque no se ha establecido enteramente el comportamiento del agua para rangos intermedios (10 a 10000 Å), es probable que el agua retenga sus propiedades habituales por encima de los 100 Å.

3.3 DESCRIPCION DE LOS FLUJOS DE LAS ESPECIES DEL SUELO Y CAMBIOS DE FASE

El flujo en medio poroso no saturado es un tema complicado al ser tres las fases presentes. Por este motivo el número de fenómenos implicados es grande y su caracterización diversa (disoluciones, evaporación, flujo de líquidos, flujo de gases, etc.). Las fuerzas que activan o retardan los flujos son variadas y difíciles de caracterizar (fricción, adhesión, potencial del agua, tensión superficial, etc.) No es posible un tratamiento totalmente separado del movimiento de las dos fases fluidas (líquida y gaseosa) porque, aparte de su interferencia geométrica (volúmenes relativos ocupados, permeabilidades relativas) y de su relación mecánica (presión de aire y presión de agua a través de la succión), existe la posibilidad de cambio de masas entre ambas fases a través de la interfase aire-agua (condensación o evaporación de agua y disolución de aire). Así también puede registrarse flujo de la especie agua a través de la fase gaseosa. De manera paralela, el aire podrá pasar parcialmente a disolución o bien, si se supera la concentración límite, gasificarse, volviendo a la fase original. Este fenómeno puede permitir una cierta (pequeña) circulación de aire a través de suelos muy cercanos a la saturación.

En ambas fases fluidas (líquida y gaseosa) el flujo puede tener lugar no sólo por *convección*, provocado por diferencias de presión o de potencial, sino que también puede tener lugar por *difusión*, englobando bajo tal denominación cualquier flujo

provocado por la distribución desigual de cualquier propiedad intensiva en el fluido en cuestión: por ejemplo gradientes de temperatura, gradientes de concentración química (presión osmótica) etc. Si pensamos en un soluto disuelto en el agua intersticial, aquel será arrastrado por ésta en su circulación por gradiente de potencial, fenómeno "mayoritario" o relevante, por convección. Si se llega a un equilibrio de potenciales, pueden subsistir diferencias de concentración de soluto que provocarán un flujo menos masivo, "minoritario" que, por circulación de agua y difusión de soluto, tenderá a reducir esas diferencias.

Para modelar toda esta intrincada red de fenómenos acoplados desde una aproximación macroscópica (suponiendo un continuo equivalente) se ha de recurrir con frecuencia a una cierta cantidad de hipótesis simplificadoras (que luego se contrastan con la realidad). Obviamente cualquier enfoque de este tipo prescinde de la geometría exacta del suelo y no puede tener en cuenta más que de forma igualmente indirecta la estructura del mismo. La geometría y la estructura, sin embargo, tienen máxima importancia y controlan el comportamiento del suelo tanto a nivel mecánico como de flujo. En el tratamiento discontinuo o particular que se desarrolla en el presente trabajo sí que se puede observar debidamente dicha estructura, esquematizada a través de un suelo ideal a base de partículas con una película adherida, meniscos y poros. Se pueden tener debidamente en cuenta las relaciones entre dichos "entes" (o distintos "lugares geométricos" dentro del suelo ideal) dado que se conocerá su posición y geometría a lo largo del tiempo. Como se verá en el capítulo 5, se va a utilizar un esquema explícito en el tiempo que, basado en este conocimiento del discontinuo, supone que en un lapso de tiempo suficientemente pequeño un "ente" sólo interacciona con sus inmediatos "vecinos". Por ambos motivos se puede considerar que los distintos fenómenos o tipos de flujo, más arriba descritos, siguen leyes de flujo sencillas, esquematizadas por expresiones simples, básicamente lineales.

Las mayores posibilidades de esta aproximación microscópica se truecan inmediatamente en un buen número de problemas adicionales, dado que, si difícil e incierto ha sido describir la geometría "estática" del modelo idealizado de suelo, no menos complicado va a ser concretar las pautas de movimiento (y flujo) de y entre los "entes" diferenciados. Pero una vez definidas estas "ecuaciones individuales de

flujo y cambio de fase" (objetivo de este epígrafe) otras consideraciones habituales en la aproximación "continua" van a resultar triviales. Por ejemplo, la conservación de masas o el equilibrio de tensiones globales quedarán inmediatamente satisfechos, al haberse asegurado ya en todos y cada uno de los "entes" individuales.

Los flujos que se van a describir a continuación según expresiones sencillas involucran a las especies y fases resumidas en la figura 2.1, y alcanzan a los entes que se han distinguido anteriormente dentro del suelo ideal (poros, meniscos y partículas). En la figura 3.6 aparecen esquematizados los flujos que se distinguen en esta situación. En esa figura se relacionan las fases y los entes entre sí.

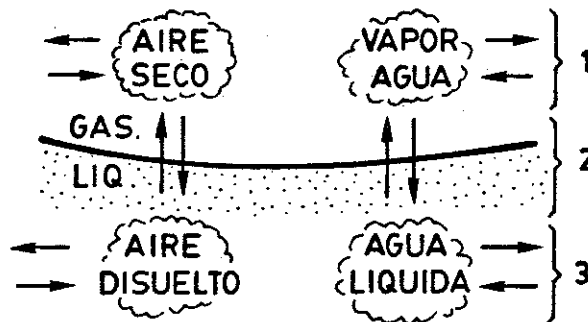


FIGURA 3.6.- *Flujos observados entre las fases del suelo ideal.*

Los flujos se establecen como intercambios o movimiento de masa de las distintas especies por unidad de tiempo, respondiendo a las correspondientes diferencias de presión o de concentración. Las formulaciones que siguen provienen de ecuaciones adaptadas de diversas fuentes, pensadas raramente para la escala particular en la que se mueve el modelo; otras ideas han sido introducidas en epígrafes anteriores.

Dentro de este esquema no se ha incluido en principio la circulación de solutos, pero llegado el caso, como se hará en un ejemplo del capítulo 6), se puede modelar

el transporte de solutos utilizando el mismo tipo de ecuaciones sencillas que las que se especificarán para el aire disuelto en fase líquida, modificando convenientemente los coeficientes de difusión. También se deberán introducir los correspondientes gradientes de potencial debidos a la presión osmótica contrariamente a lo que ha hecho en el presente modelo. Si el soluto es volátil puede también observarse su cambio de fase líquido-gas y su circulación en fase gaseosa con ecuaciones análogas a las especificadas para el vapor de agua. Para algunos de dichos coeficientes puede consultarse Weast (1974).

Otro aspecto que se ha obviado en el planteamiento del presente modelo son las condiciones no isotermas. Se reconoce generalmente la importancia del transporte de vapor en suelos de grano fino (Grismer et al., 1986 a; Raudkivi y Van U'u, 1976). Diferencias medianas de temperatura serán las principales responsables de las migraciones cíclicas de humedad bajo pavimentos o estructuras superficiales en suelos no saturados, por ejemplo. También los fuertes gradientes de temperaturas que se pueden dar cerca de centrales geotérmicas o en las inmediaciones de almacenes de residuos radioactivos, serán determinantes en el flujo de la fase gaseosa y de la fase líquida (flujo de la fase gaseosa por difusión térmica y/o por *termoforesis*; ver Rasmussen y Evans, 1987). Farouki (1986) hace un tratamiento extensivo de las propiedades de los suelos en relación a la temperatura, especialmente indicado para regiones frías. Grismer, en sus columnas de ensayo registra sin embargo condiciones isotérmicas en el sentido macroscópico (no en el microscópico o termodinámico) si hay condiciones isotérmicas exteriores.

La no homogeneidad de las temperaturas no sólo puede ser causa determinante de distintos flujos, sino que puede ser efecto de fenómenos mecánicos y de deformación. Luong (1982), por ejemplo, detecta por termografía infrarroja sobre arena real, que cargas cíclicas largas en magnitud y número de ciclos pueden llegar a incrementar (acumulativamente) la temperatura de la zona de rotura en 8°C.

Sin embargo en el modelo se van a suponer condiciones isotermas en el sentido macroscópico, sin que ello sea óbice para que en un futuro se integren condiciones no isotermas. Aunque para ello sería necesario tener en cuenta desigualdades en la cantidad de calor en los distintos entes del modelo y por ende el transporte del mismo

asociado a los flujos de fluidos y a través del medio sólido.

Ciertos detalles complementarios a lo que se va a exponer en los epígrafes 3.3.1, 3.3.2 y 3.3.3, se pueden encontrar en Gili (1986).

3.3.1 FLUJO ENTRE LOS POROS

El flujo 1 según nomenclatura de la figura 3.6 es el que se registra dentro de la fase gaseosa en dos poros distintos a través del conducto entre ellos.

El flujo de aire entre poros parece ampliamente comprobado de manera experimental. Yoshimi y Osterberg (1963) citan ejemplos para pequeños gradientes de presión de aire y grados de saturación incluso por encima de 90%. En general, en los poros además del aire "seco" (moléculas que lo integran en condiciones medias), existirá vapor de agua. Este presentará una presión normalmente cercana a la de equilibrio, que se discute en el epígrafe siguiente. En estas condiciones el vapor de agua circulará con el aire. Diversos autores (por ejemplo Kovacs, 1981) aseveran que el movimiento de vapor solo tendrá importancia relativa frente al flujo de agua líquida cuando la fase líquida esté aislada en forma de meniscos (suelo relativamente seco, que es el caso del modelo) o bajo condiciones no isotermas (que no es el caso del modelo presente, en principio isoterma).

Como se ha dicho, se distingue un flujo convectivo o masivo del aire bajo (pequeños) gradientes de presión y un flujo por difusión molecular que afectará al vapor de agua.

Para concretar el primero se asimila el conducto entre dos poros a un tubo más o menos cilíndrico, hallando un radio equivalente, R_{eq} , y una longitud equivalente, l_{eq} . Con esta aproximación, la fórmula de Poiseuille nos dará la cantidad de gas que fluirá por convección por unidad de tiempo, en términos de volumen que ocuparía dicho gas a una atmósfera de presión ($V_{eq,1atm}$), en función de la diferencia de presiones

totales de ambos poros (Δp_g):

$$\frac{\Delta(V_{eq,1atm})}{\Delta t} = \frac{\pi \Delta p_g R_{eq}^4}{8 l_{eq} \eta_a} \quad (3.5)$$

La masa de vapor de agua fluída, $\Delta M_{vap,1}$, por difusión molecular entre dos poros con distinto contenido de él por unidad de volumen (diferencia de concentración, ΔC_{vap}) puede plantearse según la ecuación de Fick de la difusión:

$$\frac{\Delta M_{vap,1}}{\Delta t} = -D_{vap} \frac{\Delta C_{vap}}{l_{eq}} \pi R_{eq}^2 \quad (3.6)$$

siendo D_{vap} el coeficiente de difusión del vapor de agua en el aire y πR_{eq}^2 el valor del área transversal de difusión.

3.3.2 CAMBIO DE FASE A TRAVÉS DE LA INTERFASE AIRE-AGUA

El “flujo” 2 según nomenclatura de la figura 3.6 es el que se establece entre la fase gaseosa de poro y la fase líquida en un menisco, a través de la interfase aire-agua (propriadamente es un cambio de fase líquido-gas y viceversa)

El agua líquida tenderá a estar en equilibrio dinámico con su vapor. Un ambiente con determinado vapor en equilibrio con su líquido puede decirse que está saturado (“humedad” relativa del 100%), y la presión que presente se llama presión de vapor en equilibrio. Este valor, $p_{v,eq}$, viene afectado por factores diversos como son la temperatura, las presiones del agua y del aire y las sales disueltas. La temperatura afecta ampliamente a la presión de vapor. Esta dependencia viene descrita por la ecuación de Clausius-Clapeyron, que bajo ciertas simplificaciones se puede escribir como:

$$p_{v,eq} = C \exp\left(\frac{\Delta H_{vap}}{R_u T_a}\right) \quad (3.7)$$

donde C es una constante, ΔH_{vap} es el calor de vaporización del agua a temperatura constante (por mol), R_u es la constante universal de los gases y T_a es la temperatura absoluta. Como se comprueba, la presión de vapor aumenta marcadamente con la temperatura, pasando de 17.5 mm de Hg para el agua a 20°C, a una atmósfera para el agua a 100°C. Siendo pues la presión de vapor bastante sensible a la temperatura, resulta que cambios de ella relativamente pequeños pueden producir gradientes y flujos de vapor apreciables. A pesar de ello y como se ha dicho, el modelo se ha planteado a temperatura constante por lo que la presión de vapor no variará por este concepto.

Si se supone que el agua líquida está sometida a una presión superior a la que le comunica su propio vapor (como es la del aire en circunstancias normales), puede pensarse en que una variación en la presión total puede afectar a la presión de vapor de equilibrio. Sin embargo, como el vapor representa una reducida fracción del gas, y como el volumen específico de un mol de agua líquida es mucho menor que el volumen específico del vapor, puede demostrarse que esta influencia es muy reducida (Bear, 1972).

La presión de vapor sobre una interfase aire-agua curvada ($p_{v,eq,s}$) es menor que la correspondiente sobre una interfase plana ($p_{v,eq,0}$) dado que las energías libres son distintas. Se puede relacionar termodinámicamente la succión con la presión de vapor de equilibrio en sus inmediaciones, obteniéndose (Edlefsen y Anderson, en Raudkivi y Van U'u 1976):

$$\frac{p_{v,eq,s}}{p_{v,eq,0}} = \exp\left(-\frac{g \psi}{R_g T_a}\right) \quad (3.8)$$

o si se prefiere

$$\psi = -\frac{R_g T_a}{g} \ln\left(\frac{p_{v,eq,s}}{p_{v,eq,0}}\right) \quad (3.9)$$

que se conoce también como ecuación "psicrométrica". En ella R_g es la constante del gas, en este caso vapor de agua, igual a la constante universal R_u dividida por la molécula-gramo del gas. La aceleración de la gravedad es g , y ψ es nuevamente la succión como columna de agua. El primer miembro de la ecuación 3.8 puede

interpretarse como la humedad relativa del aire que será inferior al 100% debido a la succión reinante.

Si se introduce en la ecuación 3.8 la relación que existe (y que se verá en el capítulo 4) entre la diferencia de presión agua-aire debido a la curvatura de la interfase (representada por su radio medio de curvatura, r_m) se obtiene la denominada ecuación de Kelvin (Barrow, 1966; Bear, 1972; Dorsey, 1968), que se puede escribir como:

$$\frac{2 \sigma_S}{r_m} = \rho_W R_g T_a \ln \left(\frac{p_{v,eq,s}}{p_{v,eq,0}} \right) = -\psi \cdot \gamma_W \quad (3.10)$$

La tensión superficial de la interfase es σ_s , y ρ_W es la densidad del agua líquida. El radio medio de curvatura r_m deberá tomarse como positivo si actúa del lado del agua. Puede sustituirse el primer miembro por la ecuación completa de Laplace (4.2) en función de dos radios de curvatura principales (ver por ejemplo Jiménez Salas y Justo, 1975).

Hilf (1956) incluye una expresión algo distinta para la presión de vapor de equilibrio en presencia de interfases curvadas:

$$\frac{p_{v,eq,s} - p_{v,eq,0}}{p_{v,eq,s}} = - \frac{2 \sigma_S}{\rho_W R_g T_a r_m} \quad (3.11)$$

Se puede comprobar que la relación 3.11 es una linealización de la expresión 3.10, y que coincide con ella para succiones no muy altas. En efecto, adoptando valores normales para el agua a 20°C ($R_g = 461.4 \frac{J}{Kg \cdot ^\circ K}$, etc.) y expresando ψ en *cm* las ecuaciones 3.8 a 3.10 se convierten en:

$$\frac{p_{v,eq,s}}{p_{v,eq,0}} = \exp(-7.25 \times 10^{-7} \psi) \quad (3.12)$$

Y la ecuación 3.11 en:

$$\frac{p_{v,eq,s}}{p_{v,eq,0}} = \frac{1}{1 + 7.25 \times 10^{-7} \psi} \quad (3.13)$$

Ambas expresiones se muestran en la figura 3.7 para un amplio rango de succiones (a efectos de comparación). Se comprueba que para succiones no muy altas coinciden, y

además la presión con succión difiere muy poco de la presión de vapor ante interfaces planas.

Finalmente la presión de vapor de equilibrio también queda reducida si el líquido tiene disuelto una cierta cantidad de soluto, según la ley de Raoult: el descenso relativo de la presión de vapor de un disolvente es igual a la fracción molar del soluto que contiene (Sienko y Plane, 1970). Como ya se ha dicho, en el modelo no se ha incluido la disolución de sales y por este motivo no observa la ley de Raoult en el cálculo de la presión de vapor de equilibrio.

Hasta aquí se han descrito los factores que influyen en la presión de vapor de agua en equilibrio en el aire de los poros del modelo. En un momento arbitrario es factible que, debido al flujo de aire e incluso debido a los movimientos de las partículas, la presión de vapor, p_v , sea distinta de la presión de vapor de equilibrio. En este caso, si la presión de vapor es transitoriamente superior a la de equilibrio es plausible que exista condensación de moléculas de agua-vapor, o evaporación en caso contrario.

En primera aproximación, e incremento a incremento de tiempo se puede plantear una ley de cambio de fase líquido-gas que afecte a una masa $\Delta M_{vap,2}$ lineal con la diferencia de presiones de vapor, con el tiempo y proporcional al área de intercambio (superficie lateral, A_{LAT} , de la interfase líquido-gas a través de la cual se registra la condensación-evaporación), del tipo:

$$\frac{\Delta M_{vap,2}}{\Delta t} = - K_{vap} (p_v - p_{v,eq}) A_{LAT} \quad (3.14)$$

La constante cinética K_{vap} dependería en última instancia del calor absorbido-desprendido en el cambio de fase y del calor disponible en el sistema aire-agua-partículas, pero como el modelo se plantea a temperatura constante y no se lleva control del calor existente, se estimará en base a otros criterios.

Una condición necesaria para que el agua de los meniscos se evapore o condense según la anterior ecuación es que no existan otros mecanismos de cambio de fase, como pudiera ser por ejemplo una especie de "ebullición" en masa o cavitación. En el capítulo 2.3 ya se ha tratado este extremo. En hidráulica se describe la

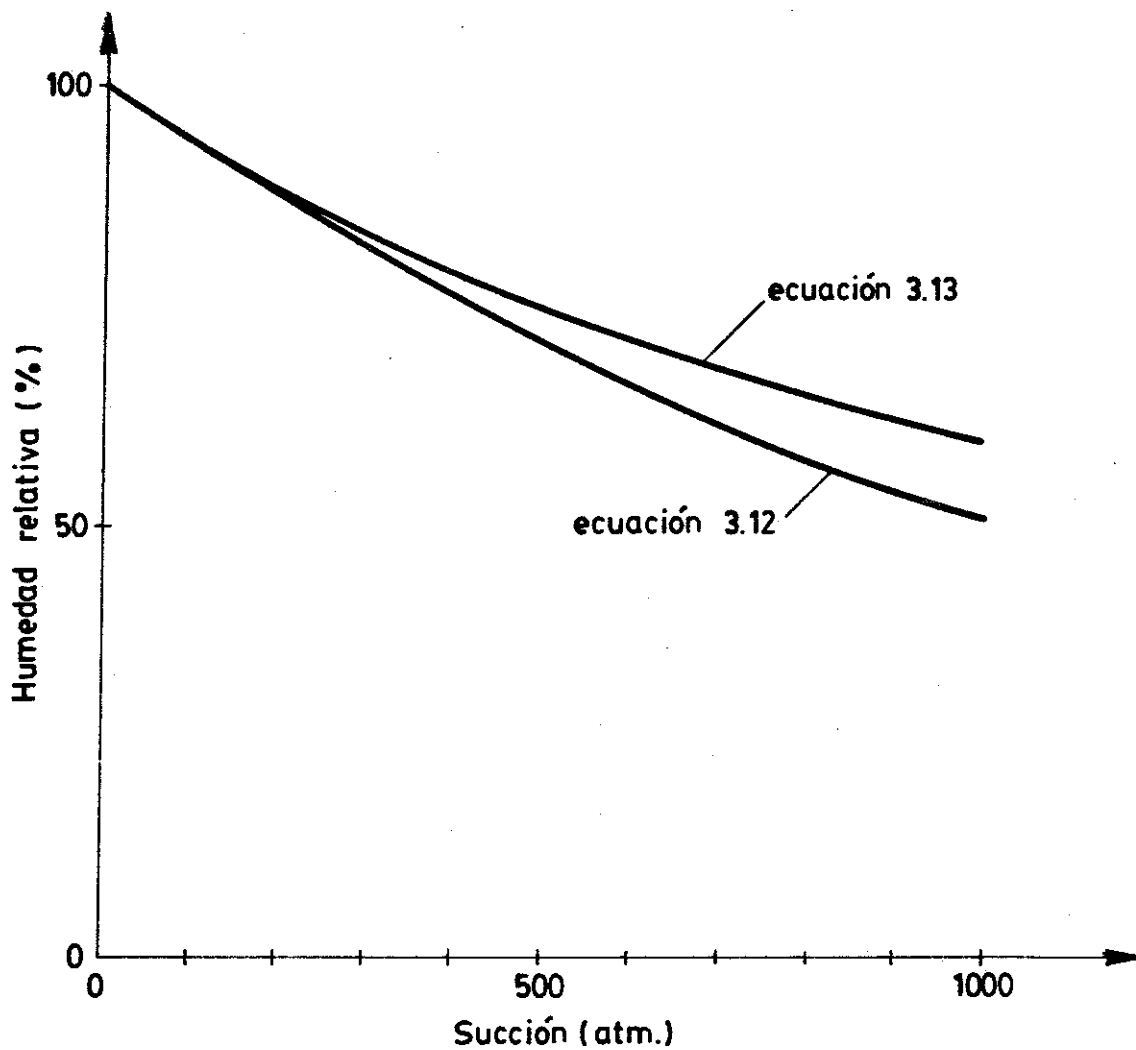


FIGURA 3.7 .- Cociente entre la presión de vapor de equilibrio con succión y la presión de vapor sin succión (humedad relativa) en función de la succión, según las ecuaciones 3.12 y 3.13 (aproximada).

cavitación como “ebullición” a temperatura ambiente, como consecuencia de que, en determinados puntos de una conducción o de una turbina, el agua alcance una presión absoluta inferior a su presión de vapor a esa temperatura. La presión de vapor de equilibrio del agua a 20°C es de 17.5 mm de mercurio, reduciéndose al 99.9% para una atmósfera de succión (ecuación 3.12). Si suponemos que el aire de los poros está a presión atmosférica, a esa succión la presión absoluta del agua líquida rondará al valor cero. Así para cualquier succión que superara aproximadamente 1 Kp/cm² se estaría en condiciones de cavitación, siguiendo el esquema (macroscópico) de hidráulica de conducciones. Sin embargo en muchos suelos reales no se registra un cambio brusco de retención de humedad a esas succiones, fundamentalmente porque el agua se encuentra ya en forma de meniscos reducidos alrededor de los contactos entre partículas y en forma de películas de agua adheridas sobre ellas. En este rango de dimensiones es posible que las fuerzas de adhesión sólido-líquido impidan en cierta medida el comportamiento del agua como “libre”, y en definitiva su cavitación. Además, el mecanismo de cavitación pasa por la formación de burbujas de vapor en el seno del líquido, que pasarán posteriormente a la fase gaseosa. En un menisco una de dichas burbujas de vapor tendría un radio muy pequeño y según la ecuación 3.10 ó 3.11 la presión de vapor de equilibrio en su interior será muy baja, con lo que puede pensarse que el vapor que la forma tenderá inmediatamente a condensarse de nuevo (Barrow, 1966). Hansen et al. (1987) incluyen sin embargo esta posibilidad: “La deficiencia de presión (del agua en los meniscos) está limitada por la ocurrencia de cavitación”, según sus propias palabras.

En la literatura se encuentran valores altos de agua “a tracción” sin “romper” o cavitación: Kirkham y Powers (1972) citan una resistencia en tensión del agua (experimental) de 40 atmósferas; Aitchison (1960) incluye medidas de la resistencia a tracción del orden de 200 atmósferas para el agua desaireada, o de 6 a 40 atmósferas para el agua con cierta cantidad de aire disuelto; Jiménez Salas y Justo (1975) recogen valores debidos a Briggs de 223 atmósferas para agua desaireada a 27°C. También Dorsey (1968) trata la cuestión de la ruptura del agua a tracción. Según él, hasta 1940 se habían utilizado principalmente dos procedimientos para determinar experimentalmente la máxima tensión a la cual se podía someter al agua. El primero utilizaba una columna de mercurio, similar a un barómetro. Se basaba en la medición de la longitud de la columna que podía ser soportada por una fina película de agua

adherida entre el mercurio y el vidrio (limpios) en la parte superior del tubo. Así, O. Reynolds a principios de siglo midió valores de hasta tres atmósferas. El otro procedimiento de medida se debe a M. Berthelot y a H.H. Dixon. El agua se encierra en un recipiente hermético, llenándolo casi. Calentándolo cuidadosamente, el líquido se expansiona, hasta que ocupa todo el volumen, ejerciendo una moderada presión sobre sus paredes. A continuación se enfría lentamente. Durante un tiempo el líquido, con una cierta cantidad de aire disuelto, sigue ocupando todo el volumen, a costa de verse sometido a tracción. En los experimentos de Dixon (citados también por Hilf, 1956), con fibras de madera en el interior del recipiente, la tracción llegó a ser de 160 atmósferas. Repentinamente, tras un cierto chasquido o pequeña explosión, el líquido se separa de las paredes, volviendo a ocupar el volumen sin tensión apropiado para la temperatura. Dorsey concluye que la rotura del agua a tracción parece iniciarse en el contacto sólido-líquido, no en el seno del mismo; excepto cuando este último contenga una cierta cantidad de gas, en cuyo caso la rotura parece estar asociada con la presencia en ese punto de una burbuja. El gas puede ser también la principal causa de las roturas iniciadas en el contorno sólido-líquido. Puede decirse que la rotura o cavitación a temperatura ambiente se asocia a condiciones dinámicas de circulación de agua a altas velocidades por tuberías, como en los experimentos de O. Reynolds con tubos de sección variable o en las conducciones hidráulicas: en todo caso en recintos de dimensiones suficientes para poder considerar el agua como "libre". En este punto se puede recordar que en determinados sistemas vegetales, por ejemplo en las cañas de bambú, el agua "sube" por capilaridad hasta alturas cercanas al hectómetro, a través de los conductos microscópicos de la planta.

Como cita Aitchison (1960), algunos autores han mantenido ciertas dudas en relación a la posibilidad del desarrollo de esas tensiones en el agua del suelo. Sin embargo concluye que no parece que existan argumentos satisfactorios contrarios al uso del modelo capilar (que implícitamente implica la tracción del agua) para definir las relaciones entre las tensiones transmitidas al suelo, dependientes de la geometría relativa de las tres fases.

En ensayos de laboratorio con suelos a succión es usual emplear la técnica de "traslación de ejes", que consiste en aumentar la presión de aire en el contorno de la muestra, manteniendo el agua a presión atmosférica. Así se consigue una diferencia

entre ambas presiones igual a la succión pretendida. En lugar de tener el agua una presión subatmosférica (tracción) de varios Kp/cm², se mantiene, por ejemplo, a una atmósfera de presión absoluta. Como sea que no se han detectado diferencias sustanciales de comportamiento (humedad, deformabilidad, resistencia) al trabajar con “succiones naturales” o con “traslación de ejes”, se puede inferir que no se registra cavitación en el agua de la muestra de suelo no saturado.

Adicionalmente hay que resaltar que muchas situaciones de interés ingenieril se asocian a succiones o diferencias de presión de agua no muy grandes. Así, un suelo eminentemente no cohesivo o granular con succiones del orden de una atmósfera estará en un estado claramente no saturado, y, dependiendo de su granulometría y estructura puede estar bastante seco. Dicho de otro modo, puede representarse dentro de dicho rango de succiones un espesor importante de suelo (del orden de diez metros) a partir del nivel freático. Así muchas investigaciones recientes se concentran en esos valores de succión (Lloret, 1982; Josa, 1988). También la aplicación de este modelo se va a circunscribir a succiones subatmosféricas.

Por otro lado el agua del suelo tendrá una cierta cantidad de aire que habrá pasado a disolución o bien en la atmósfera (cuando el agua estaba en forma de nubes o de lluvia) o bien en superficie (durante la escorrentía) o bien en el mismo terreno no saturado. El valor límite de equilibrio (también dinámico) para esta disolución de aire viene dado por la Ley de Henry que relaciona la presión parcial del aire “seco” en los poros, $p_{a,par}$, con la fracción molar del aire disuelto en los meniscos, χ_a (mediante la constante $C_H \simeq 66400 \text{ atm}$):

$$p_{a,par} = C_H \cdot \chi_a \quad (3.15)$$

En primera aproximación puede deducirse la concentración de equilibrio (en términos de masa por unidad de volumen, C_{aire}), como

$$C_{aire,eq} = 1.609 \frac{p_{a,par}}{C_H} \rho_w \quad (3.16)$$

Los desequilibrios locales y transitorios alrededor de ese valor por causa de flujos de agua y de aire tenderán a cancelarse mediante el conveniente cambio de

fase (disolución o paso a gas). Puede utilizarse razonablemente una ecuación de tipo exponencial (Dorsey, 1968):

$$\frac{C_{aire} - C_{aire,0}}{C_{aire,eq} - C_{aire,0}} = 1 - \exp\left(-\beta_H \frac{A_{LAT}}{V_W} \Delta t\right) \quad (3.17)$$

siendo V_W el volumen de agua receptora y β_H una constante cinética de cambio de fase. Nuevamente se tiene que incurrir en una serie notable de simplificaciones dado que la fórmula y la constante inicialmente se pensaron para la disolución de gases en una fina película de líquido, suponiendo además que ésta era homogeneizada continuamente y que no existía evaporación. Sin embargo también Hilf (1956) la utilizó para fines similares en suelos.

3.3.3 FLUJO ENTRE LOS MENISCOS

Se denota como flujo 3, según nomenclatura de la figura 3.6, el que tiene lugar entre dos meniscos de la fase líquida a través de la película de agua sobre la partícula, y que involucra al agua líquida y al aire disuelto.

Este tipo de flujo es menos evidente y requiere una somera introducción. Para estados altos de humedad Yoshimi y Osterberg (1963) razonan que el flujo de agua líquida se registrará preferentemente a través de la parte de "conductos capilares" llenos de agua (por ser de diámetro efectivo menor). Sin embargo, para estados más secos esta fase continua de agua "en masa" es presumible que no exista. Para estados bajos o intermedios de humedad, cuando hay más agua que la puramente adherida pero sin llegar a formar "camino" continuos, se ha visto que los espesores de película crecen existiendo cierta tendencia a considerar que por encima de los 100Å se comporta como libre bajo gradientes de potencial. En efecto, ha de existir algún mecanismo, además del de circulación de vapor de agua, para que el agua se mueva entre meniscos hasta que la curvatura de todos ellos sea aproximadamente la misma: haciendo salvedad de las diferencias de cota y de otras fuerzas (la osmótica, por ejemplo), la ecuación de Laplace (4.2) lleva en principio y con presiones de aire y

agua constantes, a curvatura media de la interfase constante (Lloret, 1982; Yoshimi y Osterberg, 1963). Kovacs (1981) concibe varios mecanismos de este tipo (figura 3.8). En sus esbozos los tubos capilares tienen sus paredes "forradas" por "films" de agua sobre las partículas. Algunos de dichos mecanismos de transferencia de humedad pasan por desprendimientos súbitos de masas de agua (gotas), que buscan de este modo lugares de potencial menor. No se justifica o no se contempla así la también deseable transferencia de humedad "en horizontal" (en un plano de $z = cte.$). Otros mecanismos transfieren el agua a través de los "films", de manera más continua. Karube (1983 a) y Di Martino (1961) también observan la circulación de agua a través de las películas de agua. Igualmente, en Evans (1983), se incluye esta circulación, a través de los "films" de agua adheridos a los labios de juntas de roca no saturada.

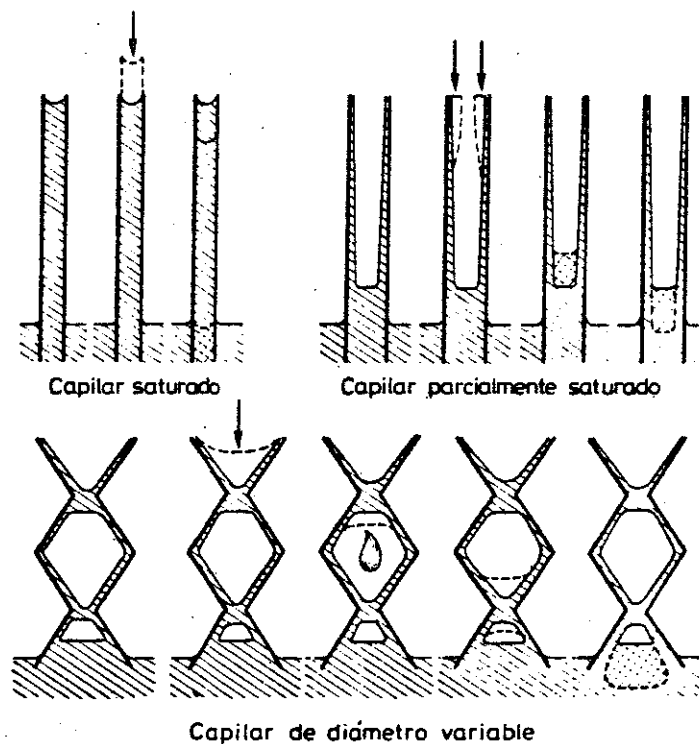


FIGURA 3.8.- Modelos dinámicos de posibles formas de movimiento de agua a través de los poros en un suelo no saturado (Kovacs, 1981).

Por todo ello en el presente modelo se ha supuesto que a través del espesor de la película sobre las partículas se puede establecer un flujo "transversal", bajo gradientes de potencial del agua de los meniscos que comunica, sea cual sea su orientación respecto a la vertical.

Así, entre dos meniscos vecinos comunicados por una película en un instante determinado puede suponerse exista un gradiente hidráulico, I , función de su diferencia de presiones de agua y de su diferencia de cota sobre un plano arbitrario de referencia (todo expresado en columna de agua equivalente y dividido por l_c , camino recorrido por el flujo). El caudal fluído entre los meniscos por convección (volumen de agua por unidad de tiempo) puede aproximarse por la fórmula cúbica de Poiseuille:

$$\frac{\Delta V_W}{\Delta t} = \frac{\gamma_W}{3 \eta_W} I l_T \delta^3 \quad (3.18)$$

donde η_W es la viscosidad que se adopte para el agua y l_T es un determinado ancho del "film" sujeto a flujo. Esa agua fluída "arrastrará" una cierta cantidad de aire disuelto, $\Delta M_{ad,1}$, proporcional a su concentración. Como se ha comentado, puede incluirse la posibilidad de que un cierto espesor "basal" de película (δ_0) quede inmóvil sustituyendo el término δ en la ecuación 3.18 por $\delta - \delta_0$.

El aire disuelto podrá equilibrar su concentración C_{ad} entre meniscos mediante una transferencia de masa ($\Delta M_{ad,2}$) por difusión molecular ajustada según la ecuación de Fick:

$$\frac{\Delta M_{ad,2}}{\Delta t} = - D_{ad} \frac{\Delta C_{ad}}{l_c} l_T \delta \quad (3.19)$$

siendo D_{ad} el coeficiente de difusión del aire disuelto en agua, y $l_T \cdot \delta$ el valor del área transversal de difusión.

3.4 FUERZAS Y MOVIMIENTOS

Como se ha establecido en el epígrafe 3.2 se concibe el suelo ideal como un conjunto de partículas discretas, interaccionando mayormente a través de los contactos físicos entre ellas.

El objetivo de este epígrafe es la caracterización de las fuerzas de interacción suscitadas alrededor del contacto entre dos partículas, en función de su posición relativa en un instante determinado.

El estudio de los fenómenos de contacto entre partículas es fundamental en la Mecánica de Suelos. El comportamiento de cada contacto será el primer eslabón para construir, una ley tensión-deformación "global" del suelo. El estudio mecánico del contacto entre partículas es la base de distintos modelos discretos, algunos de los cuales han sido citados en el epígrafe 2.4.2.3. Cabe resaltar el modelo de Rodríguez Ortiz (1974) y los debidos a Cundall (Cundall, 1971; Cundall y Strack, 1979...). Considerando los distintos contactos entre partículas, consiguen modelar el comportamiento mecánico de un conjunto de discos o esferas. En la presente tesis, adicionalmente, se observan los fenómenos de flujo y las fuerzas provocadas por los meniscos de agua.

El paso de una posible ley fuerza-desplazamiento en el contacto a un comportamiento global es dificultoso dado que existe un gran número de contactos en un suelo real: se calcula que en un centímetro cúbico de arena fina pueden registrarse cinco millones de ellos; o que en un centímetro cuadrado pueden registrarse del orden de diez mil.

Sin embargo la deformación total del suelo será resultado más de movimientos de reordenamiento entre las partículas (por deslizamientos relativos entre ellas) que de la deformación propia o distorsión interna de cada una. En efecto, para las tensiones aplicadas normalmente en la práctica y en el laboratorio (hasta 70 Kp/cm² según

Rowe, 1971), las fuerzas transmitidas por los contactos no se acercan, en general, a las necesarias para plastificar o romper las partículas. Por ejemplo, para una tensión aplicada de 7 Kp/cm^2 la fuerza media por contacto en una arena media puede ser de la décima de pondio (Marsal, 1973). Para que se registre un cierto machaqueo o fracturación de los granos se deben aplicar ya tensiones mucho mayores, típicamente de varias decenas a centenares de Kp/cm^2 (variando en función de la uniformidad y tamaños de granos, de la estibación, de la forma de las partículas, de su resistencia, etc.; Billam, 1972). Aunque las partículas sean muy rígidas o se deformen poco bajo las cargas normales, el "esqueleto mineral" puede ser bastante deformable debido a reordenamientos de la estructura, que adquiere así primordial importancia. Sigue siendo imprescindible el conocimiento del comportamiento del contacto, especialmente frente a sollicitaciones de corte, porque el deslizamiento tangencial va a ser el principal vehículo de reordenamiento entre partículas, junto con el giro o rodadura de unas partículas sobre otras.

En el contacto entre partículas se distinguen en el presente modelo fuerzas eminentemente mecánicas, por acción directa de la superficie de un grano sobre la del otro, y fuerzas debidas a la presencia de los meniscos de agua a su alrededor. Estas últimas son debidas al efecto neto atractivo o de "cohesión aparente" que va a introducir el agua, merced a la deficiencia de presión en el interior del menisco y a la tensión superficial en la interfase aire-agua. Se estudian y cuantifican en el capítulo 4.

En el presente modelo se considera que el agua que rodea al contacto es expulsada de la zona de solape físico entre los granos. Sin embargo, algunos modelos ideales de suelo establecen que el contacto entre granos no es directo, sino que se realiza a través de las películas de agua adheridas a las partículas. Karube (1983 a y b) así lo supone para partículas esféricas incluso de tamaño limo. Si bien ésto puede ser cierto en determinadas estructuras de minerales arcillosos, medidas del área de contacto grano-grano demuestran que dicha área es reducida en relación al área total ($\approx 0.03\%$), y la presión de contacto es suficiente como para expeler la película de agua adsorbida (Bowden y Tabor, 1964, 1986; Lambe y Whitman, 1979). La presencia de agua, sin embargo, puede afectar de manera indirecta al comportamiento del contacto, por ejemplo a través del coeficiente de fricción como se verá más adelante.

También sería un factor determinante en el desgaste de las superficies de contacto, apartado que entraría dentro de los fenómenos "tribológicos" (mecánicos, térmicos y químicos), cuyo estudio queda fuera de los objetivos de esta tesis.

La presencia de agua también afectaría a hipotéticas fuerzas de adhesión sólido-sólido que pudieran atraer a las partículas entre sí (sin mediar carga externa alguna). Dichas fuerzas son relevantes y llegan a "soldar" partículas colisionantes en determinadas gradaciones micrométricas tipo polvo o impalpables en suspensión en el aire (Fichman y Pnueli, 1985). En la misma línea George et al. (1985) contemplan el caso de formación de soldaduras o puentes sólidos en los contactos entre partículas como resultado: a) de altas temperaturas; b) de tensiones grandes de compresión sobre el material granular (proceso de "sinterización" o "sintéresis"); c) o incluso como resultado de migración hacia los contactos de materia más fina (que pudiera ser de naturaleza arcillosa, formando puentes de arcilla, o de naturaleza algo cristalina, consiguiendo una cierta cementación entre granos). Estas uniones o puentes modificarían drásticamente la relación fuerza-acercamiento aportando una rigidez adicional a la de un contacto limpio entre superficies disjuntas. En el presente trabajo no se van a tratar este tipo de uniones, que aunque muy interesantes en casos concretos, introducirían una problemática adicional que se considera más adecuado relegar a etapas posteriores.

Las fuerzas mecánicas transmitidas por el contacto físico entre partículas vienen generadas por las tensiones externas aplicadas en el contorno y por las interacciones internas ya citadas provocadas por los meniscos de agua. Como se ha argumentado, las fuerzas mecánicas transmitidas van a ser relativamente bajas en relación a las necesarias para la rotura de los granos. Por este motivo se puede suponer que afectan a una zona restringida alrededor del contacto mismo. Además su actuación se puede suponer en cierta medida elástica (recuperable), aunque la deformación sea no lineal, dentro del tratamiento de las fuerzas de contacto que se conoce como "contacto hertziano".

La teoría de Midlin sobre este tipo de contactos idealizados entre superficies se desarrolló a partir de 1949 por Midlin, Deresiewicz y otros. Incluye áreas de solape circulares o elípticas, con o sin deslizamiento (total o parcial).

Dicha teoría se usa, por ejemplo, para estudiar las propiedades básicas de juntas de roca (Gerrard, 1985) y actualmente es aún tema de investigación y nuevos desarrollos (Szalwinski, 1985). Aspectos parciales de la misma son de utilidad en resistencia de materiales (por ejemplo Pisarenko et al, 1979).

El contacto elástico de dos esferas de radios R_1 y R_2 y de constantes elásticas isotrópicas iguales (E : módulo elástico; ν : coeficiente de Poisson) bajo una fuerza normal N (figura 3.9) resulta en un solape circular de radio a :

$$2 a = \left[\frac{12 (1 - \nu^2)}{E} N \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right]^{1/3} \quad (3.20)$$

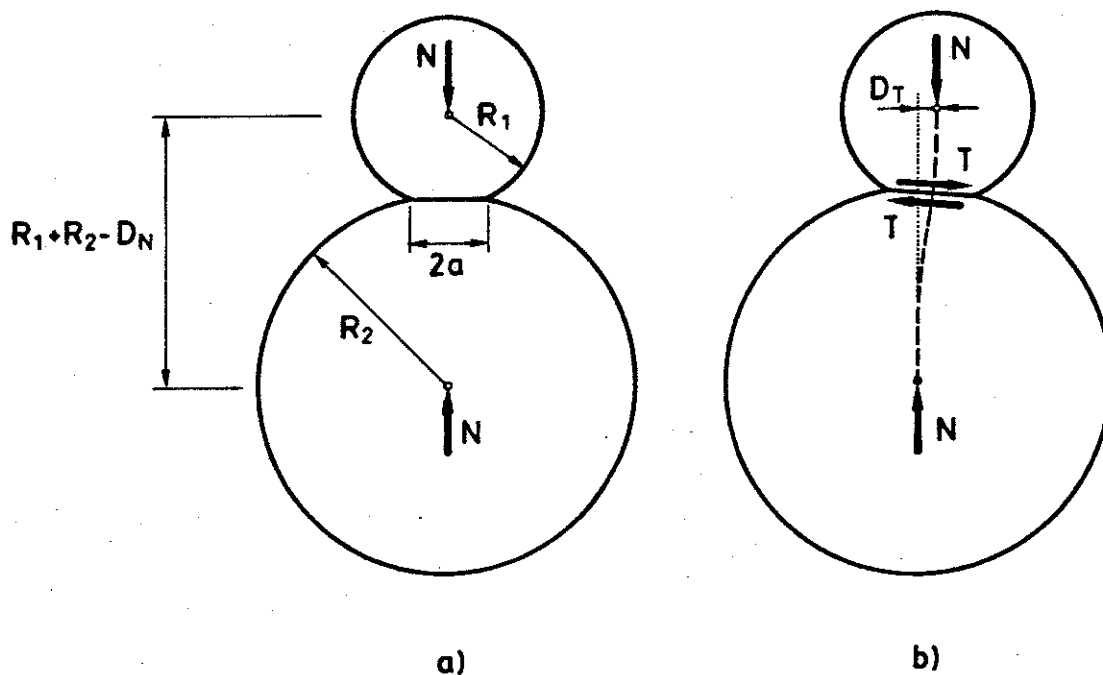


FIGURA 3.9 .- Contacto hertziano entre dos esferas.

Si los radios son iguales y el coeficiente de Poisson se toma igual a 0.3, valor

hasta cierto punto "típico":

$$2 a \simeq 1.76 \left(\frac{N R}{E} \right)^{1/3} \quad (3.21)$$

La tensión normal media puede calcularse como:

$$\sigma_{N,med} = \frac{N}{\pi a^2} \quad (3.22)$$

El acercamiento de los dos centros de las esferas a partir del instante inicial de tangencia, D_N , es

$$D_N \simeq 1.231 \left[\left(\frac{N}{E} \right)^2 \cdot \frac{2}{R} \right]^{1/3} \quad (3.23)$$

Es decir la relación entre N y D_N es no lineal. En efecto, si se relaciona la fuerza N con el desplazamiento D_N , de manera que

$$N = K_N \cdot D_N \quad (3.24)$$

resulta

$$K_N \simeq \frac{E \cdot a}{1.365} \quad (3.25)$$

Así pues K_N depende del área de contacto y en definitiva de N .

El coeficiente de deformación normal incremental o tangente K'_N sería:

$$K'_N = \frac{\Delta N}{\Delta D_N} = \frac{E \cdot a}{1 - \nu^2} \quad (3.26)$$

Si se aplica una fuerza T , perpendicular a N , aplicando "corte" en las cercanías del contacto, los centros de las esferas se desplazarán D_T (ver figura 3.9 b). Si no se llega al deslizamiento tangencial de conjunto (aunque sí pueden existir microdeslizamientos en la periferia del área de contacto), dicho desplazamiento es elástico, y puede ponerse en función de la fuerza a través de un coeficiente de

deformación K'_T también incremental o tangente. El valor de este último cuando la fuerza tangencial tiende a cero es

$$K'_T = \frac{\Delta T}{\Delta D_T} = \frac{2 E \cdot a}{(2 - \nu)(1 + \nu)} \quad (3.27)$$

La deformabilidad relativa normal/“a corte” del contacto, dentro del régimen elástico, puede deducirse comparando las expresiones 3.26 y 3.27 para diversos valores de ν :

$$\frac{K'_T}{K'_N} = \frac{2(1 - \nu)}{2 - \nu} \quad (3.28)$$

Se comprueba que es menos deformable en el sentido normal ($K'_N > K'_T$). Si $\nu = 0.5$, el cociente vale 2/3. Para un valor “típico” $\nu = 0.3$ el cociente llega a 0.823. Ambos coeficientes serían iguales sólo para el caso extremo de $\nu = 0$.

En un suelo real, sin embargo, aunque puedan asimilarse localmente los granos a casquetes esféricos, la deformabilidad del contacto vendrá totalmente determinada por las *microasperezas* que puedan presentar las superficies. En efecto estas serán las que entrarán realmente en contacto físico y serán sus radios y constantes las que contarán (Calladine, 1972; Lambe y Whitman, 1979). Más arriba se apuntaba que las fuerzas transmitidas por los contactos en suelos de grano fino y para cargas ingenierilmente normales no eran suficientes como para plastificar o romper el grano en su conjunto. Sin embargo sí que son suficientes para plastificar las *microasperezas* superficiales, como señala Rowe (1971) o como cuantifica Rodríguez Ortiz (1974). Resulta así una deformabilidad aparente mucho mayor que la que se pudiera inferir suponiendo contacto hertziano entre partículas, o incluso suponiendo contacto de ese tipo entre las asperezas periféricas.

El conocimiento de la deformabilidad “real” del contacto entre los granos de un suelo deberá pues observar la sucesión de comportamientos que se han señalado en el párrafo anterior y que se muestran esquemáticamente en la figura 3.10. Se entiende fácilmente que es imposible un seguimiento exacto de los fenómenos elastoplásticos y de rotura que se involucran en las sucesivas fases (que en realidad se solapan). La caracterización geométrica de las asperezas y su deformación es prácticamente inabordable.

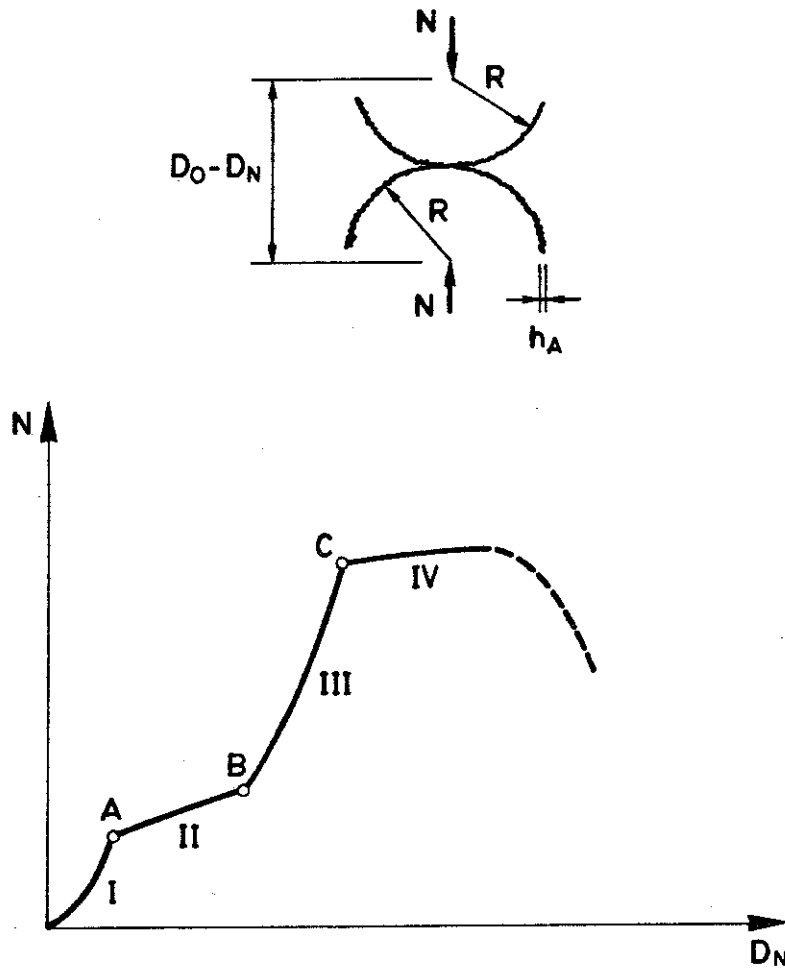


FIGURA 3.10 .- Fases de deformación normal de un contacto entre partículas rugosas de suelo, con micro-asperezas h_A (esquema ideal):
 I: fase en la que predomina la deformación elástica de las asperezas.
 II: fase en la que predomina la plastificación de las asperezas superficiales.
 III: fase en la que predomina la deformación elástica de las partículas en contacto.
 IV: fase en la que predomina la plastificación global de las partículas.

Sólo para contar con unos órdenes de magnitud relativos, e incurriendo en toda suerte de simplificaciones se trata a continuación un caso particular. En él dos partículas de material cuarcítico, esféricas tienen las siguientes características geométricas (ver figura 3.10; R_A = radio asperezas)

$$\begin{aligned} R_1 &= R_2 = R = 20 \mu m \\ \frac{h_A}{R} &= \frac{1}{25} \\ h_A &= 0.8 \mu m \simeq 2 R_A \end{aligned} \quad (3.29)$$

y las siguientes características mecánicas (valores típicos para el cuarzo):

$$\begin{aligned} \nu &= 0.3 \\ E &= 7 \times 10^5 \text{ Kp/cm}^2 \\ \sigma_{m,ult} &= 1 \times 10^5 \text{ Kp/cm}^2 \end{aligned} \quad (3.30)$$

donde $\sigma_{m,ult}$ sería la tensión media de plastificación del material (Lambe y Whitman, 1979; Mitchell, 1976). Aplicando las fórmulas 3.21 a 3.23, desde el instante del primer contacto se ha ido aumentando la carga N hasta que las asperezas han entrado en plastificación (punto A), la cual prosigue hasta su total desaparición (punto B). A partir de ahí se cambia a régimen elástico sobre las esferas R (manteniendo la carga N), régimen que se prolonga hasta el punto C. En la figura 3.11 se presenta en ejes logarítmicos la relación N versus D_N , construída a partir de los puntos A, B y C (que se señalan) y de otros intermedios. En algunas ordenadas se indican las tensiones isotrópicas que se deberían aplicar a una estibación cúbica regular de esferas de radio R para obtener en cada contacto la fuerza N :

$$\sigma_{ISO} = \frac{N}{4 R^2} \quad (3.31)$$

Este valor es obviamente una nueva generalización, pero sirve para dar un orden de magnitud de los esfuerzos macroscópicos en que se mueve cada fase. De manera orientativa se incluye también la curva que representaría el contacto hertziano ideal entre las esferas sin rugosidad (trazo discontinuo). Resalta la diferencia que existe

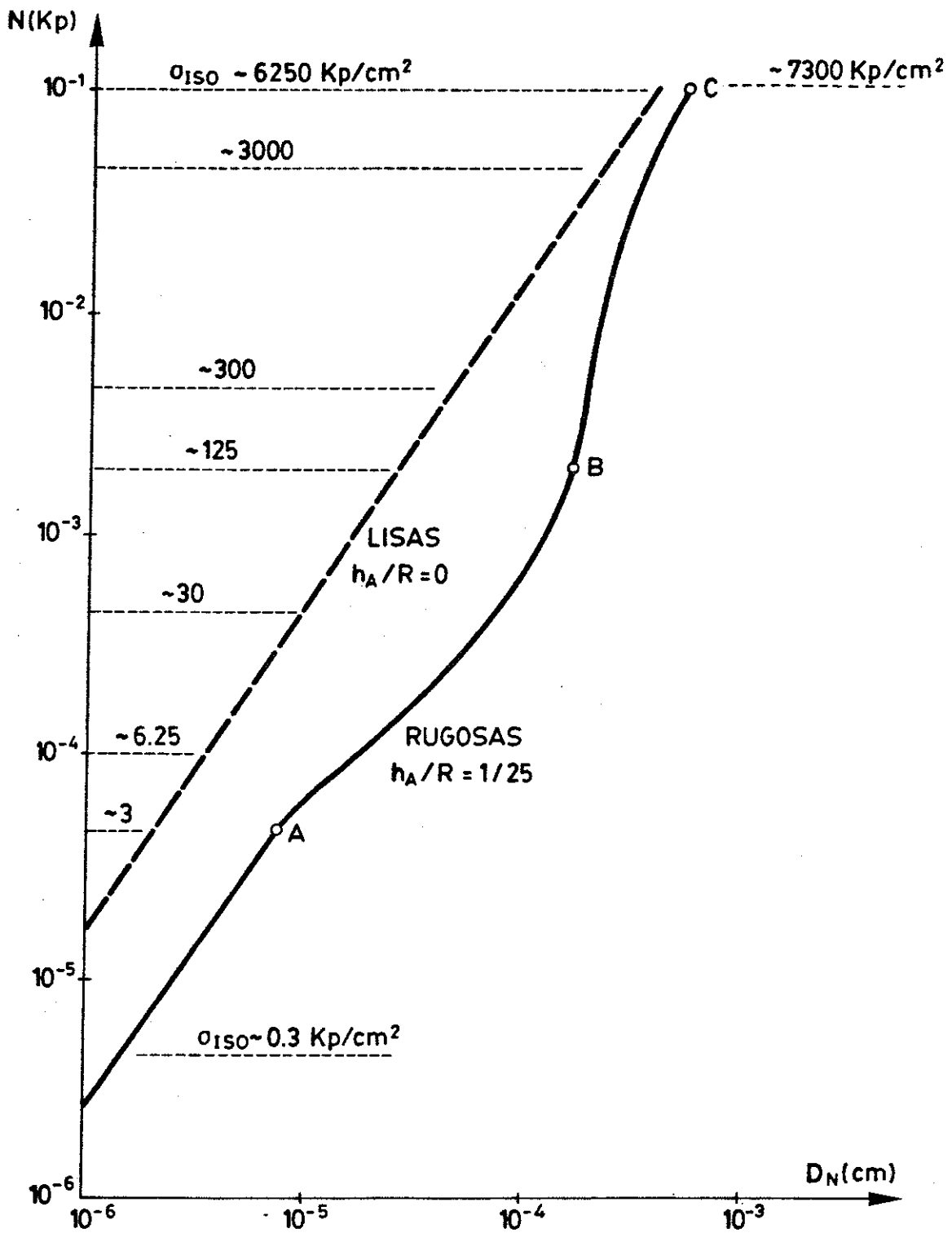


FIGURA 3.11 .- Ejemplo tentativo de relación fuerza normal-desplazamiento en un contacto entre partículas rugosas (explicaciones en el texto).

entre ambas aproximaciones (escalas logarítmicas) y por ende la necesidad de tener en cuenta de alguna manera la rugosidad (que realmente existirá) si se quiere estimar la deformación real del contacto. Es posible, para determinados rangos de tensiones de trabajo ($\simeq \sigma_{ISO}$), en base a gráficas como la de la figura 3.11, adoptar relaciones simplificadas $N - D_N$. En particular, rectas a 45° en la figura equivalen a relaciones como la 3.24 con K_N constante.

La fuerza normal transmitida por el contacto va a ser la que gobernará el deslizamiento tangencial en el contacto, que como se ha dicho es el principal mecanismo de reordenamiento del esqueleto sólido en suelos granulares. En efecto, el valor de la fuerza de corte, T , (ver figura 3.9) para el cual dos superficies en contacto deslizan (más allá de la pequeña deformación elástica D_T que pueden registrar antes de hacerlo) es función directa de la fuerza normal transmitida a través del contacto. Esta dependencia fue resaltada ya por Leonardo da Vinci hacia el año 1500, y recuperada por Amontons en 1699 y se conoce como leyes de Amontons o leyes básicas de la fricción de sólidos en contacto. Son dos (Mitchell, 1976):

1. La fuerza tangencial, T_{max} , que se ha de aplicar para que dos superficies deslicen es proporcional a la fuerza normal transmitida, N , según un coeficiente de fricción o rozamiento μ :

$$T_{max} = \mu N \quad (3.32)$$

relacionado con un ángulo de rozamiento básico o verdadero

$$\tan \phi_\mu = \mu \quad (3.33)$$

2. La resistencia al deslizamiento entre dos superficies planas es independiente de la forma y del tamaño de las caras enfrentadas.

Una explicación satisfactoria de las anteriores leyes, experimentalmente comprobadas, fue inicialmente aventurada por Terzaghi en 1920 y recogida por Bowden y Tabor posteriormente (ver por ejemplo Bowden y Tabor 1964,1986), y se conoce como la *teoría de la fricción por adhesión* (Lambe y Whitman, 1979). Otra vez son las asperezas y las micro-ondulaciones, inevitables en las superficies enfrentadas,

la vía de explicación. Como se ha dicho el área de contacto físico es mucho menor que el área total. La tensión normal transmitida a través de esos contactos físicos es alta, e incluso para N moderadas se llegará a plastificación de las asperezas. Un equilibrio de fuerzas revela que el área de contacto físico, A_C , será

$$A_C = \frac{N}{\sigma_{m,ult}} \quad (3.34)$$

En esa área los dos labios se unen íntimamente, llegándose a formar uniones químicas, pudiéndose decir que se “adhieren”.

La resistencia al corte por la fuerza T proviene de esas uniones. Si se supone que la resistencia al corte por esas adherencias es $\tau_{m,ult}$, obtenemos

$$T_{max} = A_C \cdot \tau_{m,ult} = N \frac{\tau_{m,ult}}{\sigma_{m,ult}} \quad (3.35)$$

Siendo las dos tensiones últimas propiedades intrínsecas del material para un rango extenso de valores de N y de otras variables, su cociente es un valor sensiblemente constante y que se corresponde con el coeficiente de fricción, μ (ecuación 3.32).

Para muy bajas tensiones normales puede darse la circunstancia de que las asperezas aún no plastifiquen de manera generalizada. En esas circunstancias el área A_C según la teoría del contacto hertziano sería proporcional a $N^{\frac{2}{3}}$ (ecuación 3.20), en lugar de lineal con N (ecuación 3.34); y por este motivo el coeficiente μ según la definición 3.32 sería mayor a menor N . Adicionalmente, a esas tensiones bajas, determinadas imbricaciones a nivel de aspereza podría aumentar el valor de μ aparente. Esta sería la explicación de algunos valores de μ altos a tensiones bajas. Se insiste en que en condiciones normales sí se alcanzarán condiciones de plastificación, y se entrará de lleno en el campo de validez de la teoría de la fricción por adhesión.

Las condiciones de limpieza de las superficies en contacto influye también en el valor aparente del coeficiente de fricción, dado que una cierta “contaminación” puede interferir el proceso adhesivo descrito. En la figura 3.12 se reflejan los trabajos de Bromwell y de Dickey sobre cuarzo recogidos por Mitchell (1976) y por Lambe y Whitman (1979).

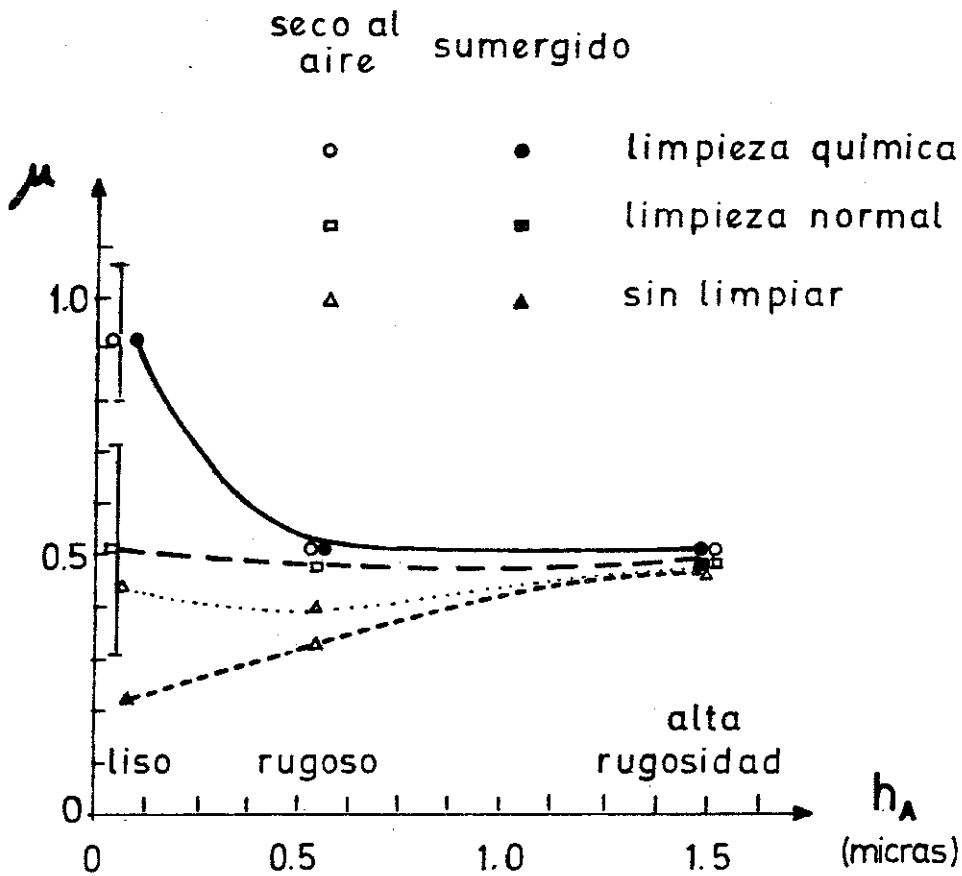


FIGURA 3.12.- Coeficiente de fricción del cuarzo, μ , en función de la rugosidad media, h_A , y del estado de las superficies en contacto (original de Bromwell y Dickey, recogido en Lambe y Whitman, 1979).

Según la figura, el agua aporta un cierto efecto “antilubricante” sobre superficies contaminadas (aumenta μ , seguramente al desplazar el agua al contaminante), como también detectaron Horn y Deere (1962) cuando los minerales son de estructura cristalina masiva (cuarzo, feldespato, calcita, etc.)

Es notable la aparente dispersión que existe en los valores del coeficiente de fricción determinados por diversos autores, incluso para un mismo material. Para el cuarzo pueden encontrarse valores de ϕ_μ entre 7 y 24° (Horn y Deere, 1962) ó de 22 a 31° (Rowe, 1962, 1971). Los responsables son, como se ha dicho, las condiciones de

limpieza, de humedad, la rugosidad y sobre todo las condiciones y método de ensayo: partículas esféricas en contacto puntual, tamaño de las mismas, superficies extensas, un solo contacto o varios, etc.

Como puede aceptarse que las partículas de los suelos naturales tendrán una cierta rugosidad y no estarán químicamente limpias, en base a las anteriores explicaciones y fundamentalmente a la figura 3.12, es razonable tomar como valor medio del coeficiente de fricción $\mu = 0.5$ para materiales de tipo cuarcítico, tanto en condiciones secas como húmedas (Mitchell, 1976).

Adicionalmente a la influencia puramente mecánica (coeficiente de fricción), el agua y otros posibles elementos contaminantes pueden tener otros mecanismos de actuación que cabe denominar físico-químicos (Martín Viñas, 1973). En efecto, puede actuar sobre los enlaces químicos de las superficies de los granos, debilitándolos, resultando en una disminución de la resistencia al corte (ecuación 3.35). Jiménez Salas y Justo (1975) invocan la *rotura diferida* de las "puntas" o rugosidades, admitiendo que en las superficies de los granos existen suficiente número de microfisuras en condiciones de cuasi-equilibrio. Según las teorías de Griffith su progresión no es instantánea, sino que es muy lenta en el tiempo, a velocidad finita (que puede estar influida por la presencia de agua u otros contaminantes). Este fenómeno podría ser el responsable parcial de ciertos aumentos de compresibilidad de algunos materiales en condiciones húmedas (aunque conviene distinguir este aumento de los colapsos súbitos por disipación de succión) y también de las deformaciones diferidas de origen no hidrodinámico, que también se registran en materiales granulares.

Para una situación húmeda como la del modelo conceptual que se maneja, podrá adoptarse (para tener en cuenta estos fenómenos) un valor del coeficiente de rozamiento "promedio" reducido, pero sensiblemente constante, confiando el desarrollo de las deformaciones diferidas en el tiempo a carga constante a otros subterfugios, como los *amortiguamientos* que se verán a continuación.

Las relaciones fuerza-desplazamiento en los contactos tanto en el sentido normal como en el tangencial, no son instantáneas. En el impacto perfectamente elástico

entre dos cuerpos se registra una *pérdida de energía* que normalmente se explica por la propagación de ondas elásticas de deformación en el seno de las dos masas que chocan. La plastificación de las asperezas en el sentido normal “retrasará” en el tiempo el acercamiento de las esferas sólidas, significando en la práctica una pérdida de energía por este concepto. Si en la “descarga” de un contacto entre partículas se arbitra una rama de descarga con un coeficiente K_D distinto a K_N , también se estará disipando energía por histéresis carga–descarga. Como se acaba de ver, en el sentido tangencial también se registran fenómenos diferidos. Cuando un contacto desliza tangencialmente se disipa energía “por fricción” por un valor igual a la fuerza tangencial multiplicado por el corrimiento tangencial deslizado.

Todos estos mecanismos de *disipación de energía* se corresponden con la realidad física: dos cuerpos al entrar en contacto, y mediando las condiciones oportunas, no se quedan oscilando o vibrando indefinidamente alrededor de una posición de equilibrio, sino que tienden hacia ella de una manera amortiguada. La energía disipada total puede suponerse que se pierde en calor.

Una forma adecuada y tradicional de tener en cuenta debidamente este diferimiento de deformaciones en el tiempo (tanto en el sentido normal como en el tangencial) es suponer que en el contacto actúan algún tipo de *fuerzas de amortiguamiento viscosas* (es decir proporcionales a las velocidades relativas).

En los métodos de relajación dinámica que se han comentado al principio del epígrafe, esta disipación de energía además de una realidad física es una necesidad numérica. Como se usa un tratamiento cinemático y dinámico para modelar un problema cuasi–estático es preciso que las velocidades sean suficientemente pequeñas. En caso contrario el crecimiento desmesurado de la energía cinética alejaría al esquema numérico del equilibrio final (energía cinética nula) resultando según el caso en oscilaciones periódicas alrededor del punto de equilibrio (o bien alrededor de otro punto); o incluso, en circunstancias extremas, en inestabilidad numérica (Cundall, 1971).

En el presente modelo conceptual de suelo existe una justificación física de las fuerzas viscosas en el contacto aún más importante: el tener presente la “resistencia”

del agua de los meniscos a acomodarse a una nueva configuración geométrica a medida que las esferas van acercándose normalmente o van deformándose tangencialmente. Si es éste el origen primordial que se les da a las fuerzas viscosas en el contacto, su actuación se prolongará mientras exista menisco, independientemente de si se ha "roto" el contacto físico entre partículas o si existe deslizamiento tangencial entre ellas.

Invocando nuevamente a la realidad física subyacente es razonable pensar que el amortiguamiento en los contactos sea aproximadamente de tipo crítico. Es decir que conduzca a la posición de equilibrio sin apenas oscilación.

Adicionalmente puede pensarse en otras acciones, además de las fuerzas que se han descrito hasta aquí, que retarden el movimiento absoluto de las partículas. Estas pudieran ser las ejercidas por otras partículas no consideradas; por ejemplo, en un modelo en el cual los centros de las partículas estuvieran todos en un plano, podrían representar la acción de retardo ejercida por partículas fuera del plano del modelo sobre las anteriores. O bien la resistencia de la fase gaseosa a ser desplazada por las partículas en movimiento. Esto puede tenerse en cuenta de manera aproximada con unos amortiguamientos *globales*, también de tipo viscoso, actuando sobre la partícula y proporcionales a su velocidad absoluta.

Como fuerza másica puede considerarse, si es el caso, el peso de la partícula actuando según la gravedad.

Como comentario final al recuento de fuerzas presentes merece la pena señalar que la contribución de la resistencia al movimiento por *rodadura* de una superficie sobre otra (debida al momento producido por desplazamiento "en paralelo" de la línea de acción de la fuerza normal en el contacto) es pequeña (Rodríguez Ortiz, 1974; Lambe y Whitman, 1979).

Bajo este panorama de fuerzas, la situación de *equilibrio* en un modelo discontinuo como el que está planteando tendrá como condición necesaria que la suma de ellas y de sus momentos sea nula en cualquier subdominio del mismo y que se satisfagan unas ciertas condiciones de contorno. Sin embargo estas ecuaciones no son suficientes, dado que en general se podrán encontrar diversas situaciones que

cumplan las anteriores condiciones. La solución será aquella situación a la que se haya llegado desde la inicial de partida, a través de una serie de estados intermedios de cuasi-equilibrio que conformen un camino físicamente viable.

Esto es lo que se lleva a cabo numéricamente con un método explícito de relajación, que se describe en el capítulo 5.

CAPITULO 4

DESCRIPCION GEOMETRICA DEL MENISCO AISLADO

En el presente capítulo se estudia y discute la disposición de la fase líquida alrededor de las angosturas o contactos del esqueleto sólido. Esta situación será la predominante en un suelo en el cual la humedad sea suficientemente baja como para conseguir que la fase líquida no sea ya continua. Tras estudiar la interfase de doble curvatura (epígrafe 4.1) y su entronque con la fase sólida (ángulo de contacto, 4.2) se procede a fijar la geometría pormenorizada de lo que se denomina aquí "menisco aislado" (4.3), uno de los entes fundamentales del comportamiento del suelo en ese estado. El menisco aislado es también primordial para ensamblar el modelo numérico de comportamiento (capítulo 5), junto a las ecuaciones básicas de flujo y mecánicas (capítulo 3).

4.1 INTERFASE CURVA ENTRE LA FASE LIQUIDA Y LA FASE GASEOSA

Las sustancias mutuamente inmiscibles presentan contornos abruptos de cambio de especie. En el caso de que las sustancias sean de fases distintas (sólido, líquido, gas) estos contornos se pueden llamar superficies interfaciales o interfases.

Las moléculas interiores a una fase se ven afectadas por fuerzas de interacción molecular de cualquier tipo que pueden suponerse más o menos uniformes en todas direcciones. Cerca de la interfase las moléculas son sometidas por las moléculas de otra sustancia (y ejercen sobre ellas) unas atracciones que serán, en general, distintas a las que reciban del lado de su misma sustancia (figura 4.1). Esto provoca una disimetría que, en el caso de que la sustancia sea un líquido en equilibrio, conducirá a que la resultante de todas las fuerzas de atracción sobre esas moléculas sea perpendicular a la superficie interfacial y viceversa. Así la interfase misma y las moléculas cercanas a ella, tal vez una ó dos capas, constituyen una zona de comportamiento distinto a la del resto del líquido "en masa" o "libre".

Esto ha llevado a diversos autores (por ejemplo Fredlund y Morgenstern, 1977) a considerar la interfase aire-agua de un suelo como una fase diferenciada dentro del mismo.

Este desequilibrio de atracciones tenderá a *modificar* la superficie interfacial hasta un estado de equilibrio, lo que de hecho significa que en la práctica se le puede asociar una energía libre interfacial, W_s .

Algunas moléculas de la superficie serán atraídas hacia el interior si ello es posible, reduciendo el valor total de la superficie hasta llegar a un cierto equilibrio. Así la energía superficial libre de la interfase se manifiesta externamente como una *tensión interfacial*, σ_s , o resistencia de la interfase a ser aumentada. Concretamente se puede definir como la cantidad de trabajo (variación de la energía superficial libre)

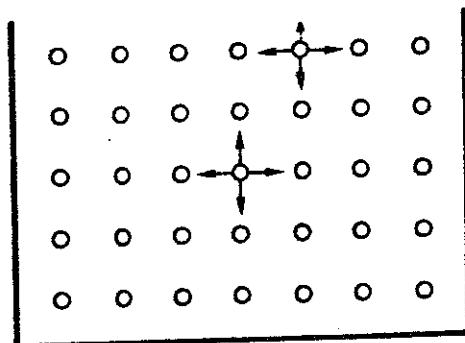


FIGURA 4.1.- Desequilibrio de las interacciones moleculares cerca de la superficie interfacial.

que se debe suministrar al sistema para ampliar la superficie interfacial, A , en una unidad.

$$\sigma_s = \frac{dW_s}{dA} \quad (4.1)$$

Para una temperatura determinada, el número de moléculas por unidad de superficie interfacial en equilibrio es constante, y así se comprueba que la tensión interfacial, σ_s , tiene un valor característico para cada par de sustancias y es independiente del área total. Su dimensión es de energía dividida por superficie, o lo que es lo mismo, fuerza dividida por longitud. El nombre de *tensión superficial* se reserva, en rigor, para la tensión interfacial existente entre una sustancia y su propio vapor, por ejemplo agua y vapor de agua (Bear 1972). Extensivamente se aplica dicha denominación a otros casos (Lloret, 1982), por ejemplo para el caso de agua líquida en contacto con aire.

Para ese par de sustancias la tensión superficial varía con la temperatura, en menor grado con la presión del aire y también debido a incluso pequeñas contaminaciones de la interfase por otras sustancias. Con el aire a presión atmosférica vale 0.00742 Kp/m a 20°C y 0.00675 Kp/m a 60°C (Weast, 1974), siendo la variación

aproximadamente lineal con la temperatura (Kovacs, 1981).

La interfase agua-aire bajo la tensión superficial actuará como si de una lámina o membrana "elástica" se tratara, adoptando una configuración dada de acuerdo con los contornos sólidos a los que se deba adaptar. En un caso general puede suponerse que la configuración de un elemento diferencial de interfase, de área igual a $dl_1 \times dl_2$, sea de doble curvatura (figura 4.2).

Para que el sistema esté en equilibrio debe ser mínima la energía libre total, W (aquella que bajo ciertas condiciones puede transformarse en trabajo). La energía libre susceptible de variar en este sistema está compuesta por la energía superficial asociada a la interfase (W_s) y las energías provenientes de los términos de presión de los potenciales del agua y del aire (W_{p_w} y W_{p_a}). El mínimo se alcanzará cuando, imponiendo un desplazamiento virtual infinitesimal arbitrario y normal a la superficie, dr , el cambio en la energía libre, dW , sea nulo.

$$dW = dW_s + dW_{p_w} + dW_{p_a} = 0$$

De la figura, y haciendo uso de la ecuación 4.1 se deduce

$$dW_s = \sigma_s \times dA = \sigma_s dl_1 dl_2 dr \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

$$dW_{p_w} = -p_w dl_1 dl_2 dr$$

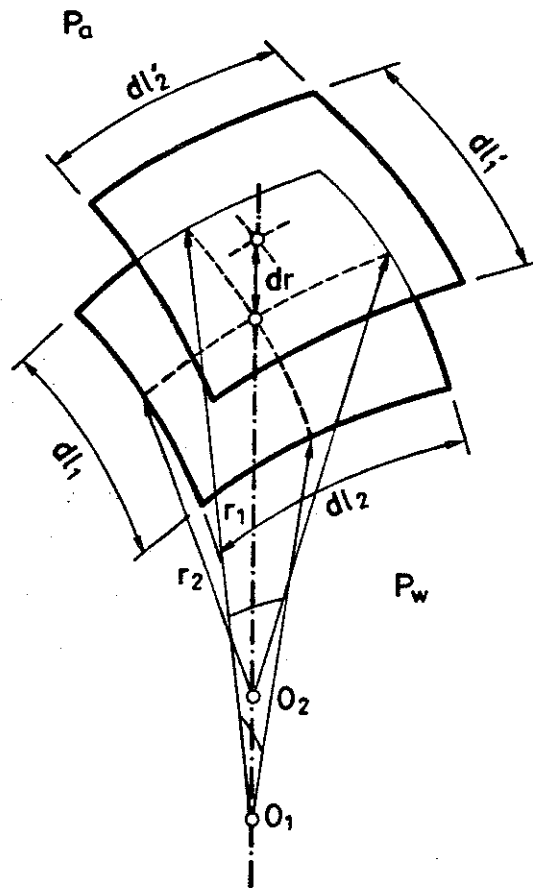
$$dW_{p_a} = p_a dl_1 dl_2 dr$$

$$dW = dl_1 dl_2 dr \left[\sigma_s \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) - p_w + p_a \right] = 0$$

La única solución para cualquier desplazamiento dr es

$$p_w - p_a = \sigma_s \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (4.2)$$

que es la relación deducida por Laplace y Young y que generalmente se conoce como ecuación de Laplace de la presión capilar (aunque algunos autores la denominan de Kelvin).



$$dl'_1 = \left(1 + \frac{dr}{r_1}\right) dl_1$$

$$dl'_2 = \left(1 + \frac{dr}{r_2}\right) dl_2$$

$$dl'_1 \times dl'_2 \simeq \left(1 + \frac{dr}{r_1} + \frac{dr}{r_2}\right) dl_1 \times dl_2$$

$$dA = dl'_1 \times dl'_2 - dl_1 \times dl_2 = dl_1 \times dl_2 \times dr \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right)$$

FIGURA 4.2 .- Elemento diferencial de la interfase con energía superficial libre.

El término entre paréntesis del segundo miembro no es sino el doble de la *curvatura media*, definida en geometría para un punto de una superficie como la semisuma de las dos curvaturas normales principales en ese punto.

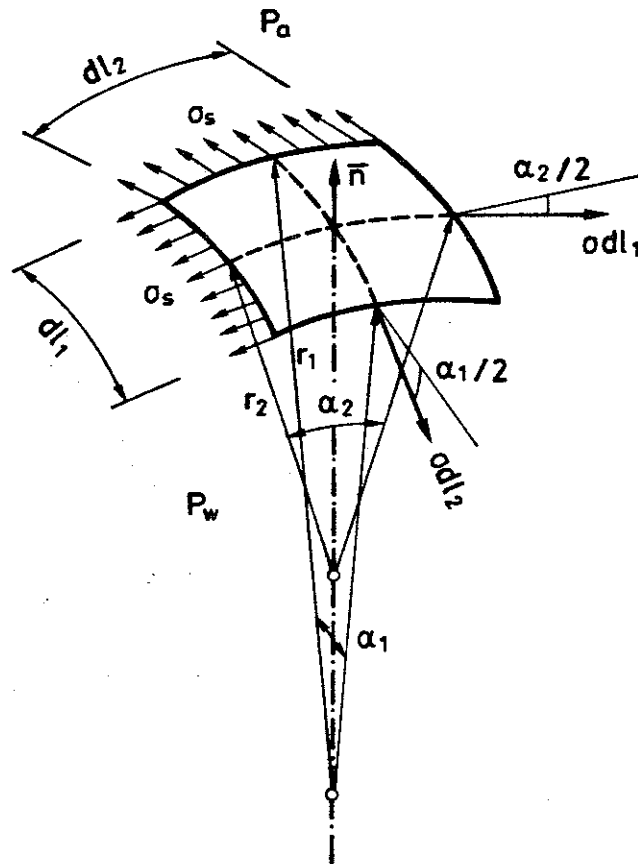
Convencionalmente se toman como positivas las curvaturas hacia la fase más densa. Es decir, los radios de curvatura deberán introducirse con signo positivo en la expresión 4.2 cuando r_1 ó r_2 estén en la fase más densa, y con signo negativo en caso contrario. Así para las curvaturas de la figura 4.2 dicha expresión establece una presión para el agua por encima de la presión del aire debido a la energía libre superficial. Por ejemplo una gota de agua en un medio sin gravedad o en caída libre (despreciando el rozamiento del aire) mantendría una presión de agua constante. Suponiendo constante la presión del aire lo será también su diferencia. Según la ecuación de Laplace, la curvatura media en todos sus puntos será constante por lo que la gota tendrá forma de esfera, que además es el cuerpo geométrico exento de mínima superficie para un volumen dado.

Contrastando con esta deducción “energética” de la ecuación de Laplace, es posible también su obtención indirecta por equilibrio de fuerzas, suponiendo que en la figura 4.2 una fuerza por unidad de longitud igual a la tensión superficial actúa en el límite del elemento $dl_1 \times dl_2$ y tangente a su superficie (figura 4.3). Imponiendo el equilibrio de fuerzas según la normal a la superficie resulta:

$$(p_w - p_a) dl_1 \times dl_2 - 2 \sigma_s dl_1 \sin \frac{\alpha_2}{2} - 2 \sigma_s dl_2 \sin \frac{\alpha_1}{2} = 0$$

Sustituyendo los valores de los senos por los calculados en la figura 4.3, se obtiene inmediatamente la ecuación 4.2 como la que satisface el equilibrio de la membrana elástica de curvaturas r_1^{-1} y r_2^{-1} .

Se ha de recalcar sin embargo que la tensión superficial no existe realmente como fuerza física sino que es únicamente el equivalente matemático o la consecuencia indirecta de una energía libre asociada a la interfase.



$$2 \sin \frac{\alpha_1}{2} \approx \alpha_1 = \frac{dl_1}{r_1}$$

$$2 \sin \frac{\alpha_2}{2} \approx \alpha_2 = \frac{dl_2}{r_2}$$

FIGURA 4.3 .- Elemento diferencial de interfase en "equilibrio" bajo la acción de la tensión superficial.

4.2 CONTACTO DE LA INTERFASE LIQUIDO-GAS SOBRE LA FASE SOLIDA

El agua libre en un suelo en el cual la humedad sea suficientemente baja presentará interfases con el aire que contactarán con el esqueleto sólido en multitud de puntos. Allí se dará la confluencia de las tres fases, y entre cada par de ellas puede suponerse una superficie interfacial con una tensión interfacial característica. En algunos casos el "entronque" entre las tres fases se caracteriza por un ángulo de contacto de la interfase líquido-gas sobre el sólido. Este ángulo determinará la conformación final del menisco aislado, y por este motivo se estudia en este epígrafe.

4.2.1 CONTACTO ENTRE LAS TRES FASES

Se acepta comúnmente que la estructura (densidad, etc.) de un líquido en las cercanías de un sólido puede diferir de la del líquido libre debido a: interacciones de tipo Van der Waals, fuerzas de adhesión, capa doble, etc. Por este motivo según Derjaguin (en Clifford, 1975), la tensión superficial y otras propiedades del líquido varían. Así la forma de la interfase líquido-gas en la vecindad del sólido será distinta de la que adoptaría de acuerdo a la ecuación de Laplace algo más lejos. Cualquier consideración sobre el entronque de las tres fases (figura 4.4 a) dependerá de si la escala a la que estudiamos el fenómeno es superior o inferior al rango de actuación (δ) de las fuerzas de adhesión sólido-líquido.

A pesar de ello es común estudiar el ángulo de contacto, θ_c , utilizando nuevamente el enfoque de equilibrio de fuerzas a partir de las tensiones interfaciales (figura 4.4b; Kovacs, 1981). Se plantea el equilibrio de las fuerzas sobre el "extremo" de la interfase líquido-gas (última molécula?), suponiendo concentradas allí todas las posibles fuerzas de adhesión (A , que se supone también normal al sólido y de valor necesario para igualar a las componentes normales de la tensión superficial, σ_s). Llamando σ_{as} a la tensión interfacial gas-sólido y σ_{ws} a la tensión interfacial líquido-sólido, la componente tangencial resulta en

$$\cos \theta_c = \frac{\sigma_{as} - \sigma_{ws}}{\sigma_s} \quad (4.3)$$

Conocida como ecuación de Young, establece que el coseno del ángulo de contacto viene definido por el cociente entre la energía liberada al formar una unidad de superficie líquido-sólido desplazando al gas, y la energía necesaria para formar una unidad de superficie líquido-gas.

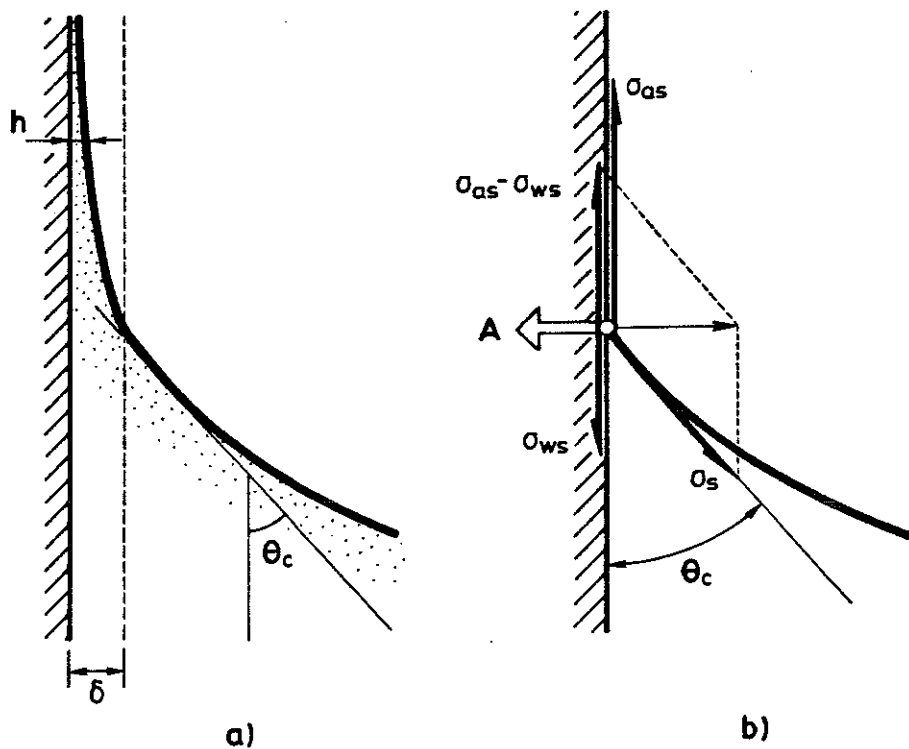


FIGURA 4.4.- Ángulo de contacto entre la interfase líquido-gas y el sólido.

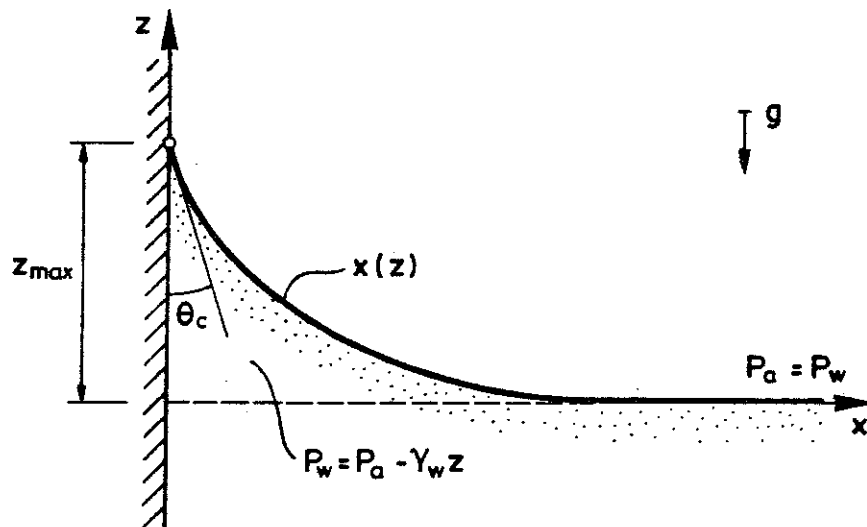
4.2.2 CONFORMACION DE LA INTERFASE

Lógicamente este análisis simplificado del contacto entre interfases, a escala global, puede verse modificado por microrrugosidades o contaminación de la superficie del sólido. Sin embargo puede resultar muy útil a esa escala, puesto que conociendo el ángulo de contacto y la ecuación de Laplace podremos determinar la diferencia de presión, la posición y la configuración de la interfase en determinadas situaciones. Dicha configuración dependerá muchísimo de las condiciones "de contorno" locales (geometría del sólido, o presión de líquido impuesta, o volumen de líquido a ubicar en determinado intersticio, etc). Como preparación al estudio del menisco de agua aislado entre partículas sólidas (epígrafe 4.3), se van a ver aquí algunos ejemplos sencillos de disposición del agua en las cercanías de superficies sólidas.

La tendencia general del líquido a reducir su interfase con el aire se verá condicionada por fuerzas externas actuando sobre su masa, (presión, potencial gravitatorio). En general puede pensarse en una tendencia a una situación de mínima energía libre total (es decir, la que se puede libremente transformar en trabajo) total mínima. Como ya se ha visto una gota aislada de agua tenderá a una forma esférica. Si descansa sobre una superficie sólida horizontal encontrará el equilibrio en una especie de casquete, a pesar de que una mayor extensión resultaría en energía potencial menor (pero en mayor área interfacial). Si la misma agua cae de forma continua partiendo de un caño de sección cualquiera acabará adoptando una sección circular. Si está en condiciones estáticas en un recipiente, la mínima interfase con el aire y la mínima energía potencial conducirán a una superficie plana y horizontal.

Cerca de las paredes del recipiente existe un contacto entre las tres fases y el ángulo de contacto ha de ser θ_c . Gracias a la tensión superficial el agua ascenderá desde la superficie horizontal (que tomaremos de $z = 0$) hasta un punto z_{max} (figura 4.5 a; Kovacs, 1981).

La presión hidrostática es decreciente con z y la presión del aire puede



a)

$$\text{Condiciones diferenciales: } \begin{cases} \frac{1}{r_1} = -\frac{\frac{d^2x}{dz^2}}{[1+(\frac{dx}{dz})^2]^{\frac{3}{2}}}; & r_2 = \infty \\ p_w - p_a = \sigma_s \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) = \frac{\sigma_s}{r_1} = -\gamma_w z \end{cases}$$

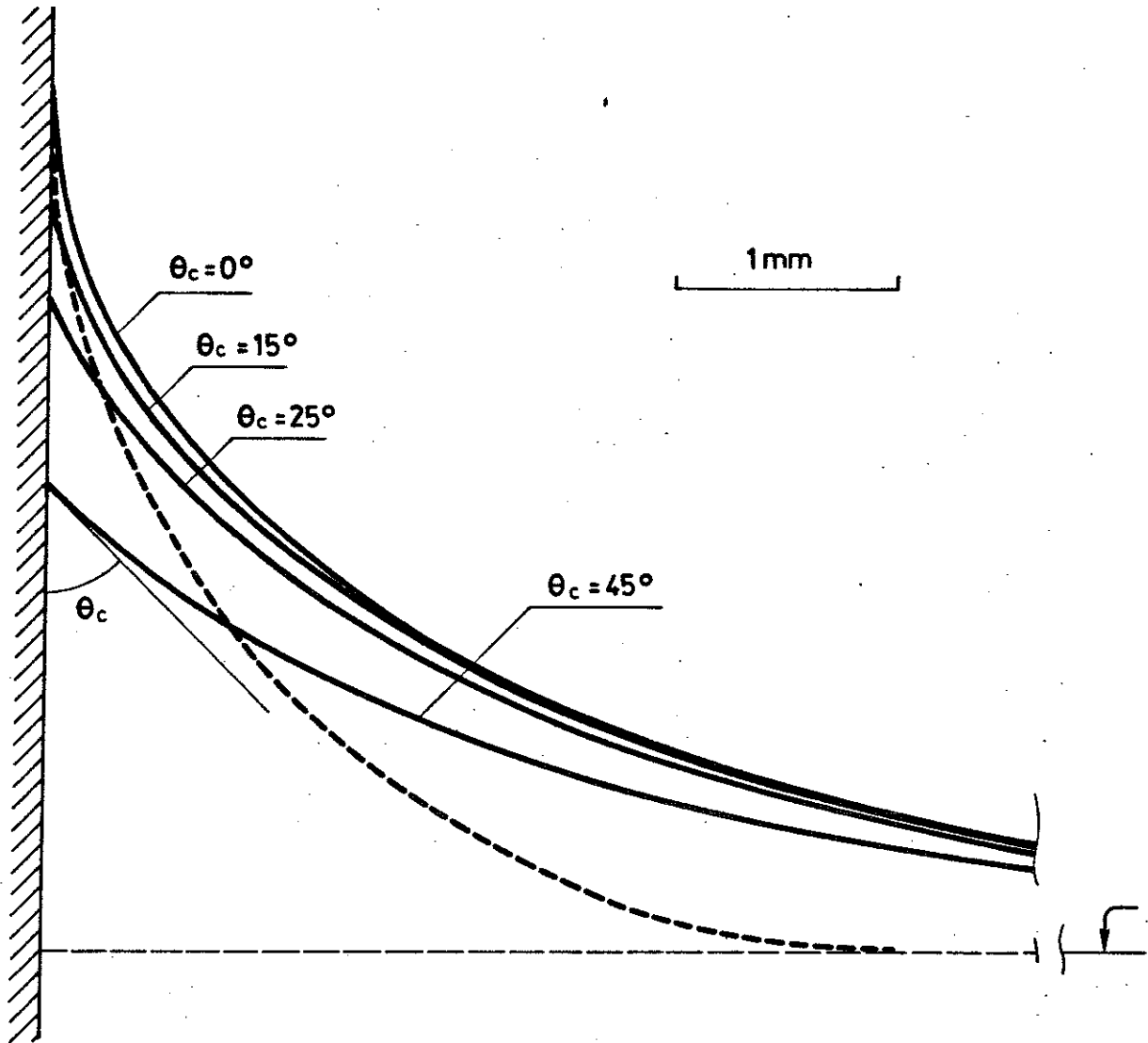
$$\text{Condiciones de contorno: } \begin{cases} x = 0; & \frac{dx}{dz} = -\tan \theta_c \\ z = 0; & \frac{dx}{dz} = -\infty \end{cases}$$

FIGURA 4.5.- Sección vertical de la interfase aire-agua cerca de un contorno sólido. Planteamiento.

considerarse constante. Relacionando su diferencia con la curvatura media según la ecuación de Laplace, resulta una ecuación diferencial que integrada con las condiciones de contorno que se detallan permite obtener la ecuación $x(z)$ de la interfase, y en particular el ascenso máximo:

$$z_{max} = \sqrt{\frac{2 \sigma_s}{\gamma_w} (1 - \sin \theta_c)} \quad (4.4)$$

donde γ_w es el peso específico del agua. En la figura 4.5 b se representa la interfase para varios ángulos de contacto. Como se puede apreciar las soluciones no se parecen a un arco de circunferencia. En trazo discontinuo se incluye la circunferencia que es tangente a $z = 0$ y a la pared del recipiente por el punto de ascenso máximo para



b)

FIGURA 4.5 (Cont.) .- Sección vertical de la interfase aire-agua cerca de un contorno. Solución.

ángulo de contacto nulo. Difiere notablemente de la interfase con $\theta_c = 0$, y además con su curvatura constante no restituye la presión hidrostática decreciente.

De una manera similar puede deducirse la forma de la interfase entre dos paredes cercanas. En la figura 4.6 se presentan varios casos con ángulo de contacto nulo y paredes progresivamente más cercanas. Paralelamente en trazo discontinuo aparecen las circunferencias tangentes en el punto mínimo de la interfase (no circular) y también con las paredes. Prácticamente a partir de una rendija de tres milímetros las circunferencias coinciden con las soluciones. Las alturas h_c corresponden a

las calculadas imponiendo equilibrio vertical de fuerzas entre la tensión superficial actuando en el contacto, por una parte, y el peso de un prisma de líquido de altura h_c y espesor unidad, por otra, según la fórmula:

$$h_c = \frac{\sigma_s \cos \theta_c}{\gamma_w l} \quad (4.5)$$

siendo l el semiancho de la rendija.

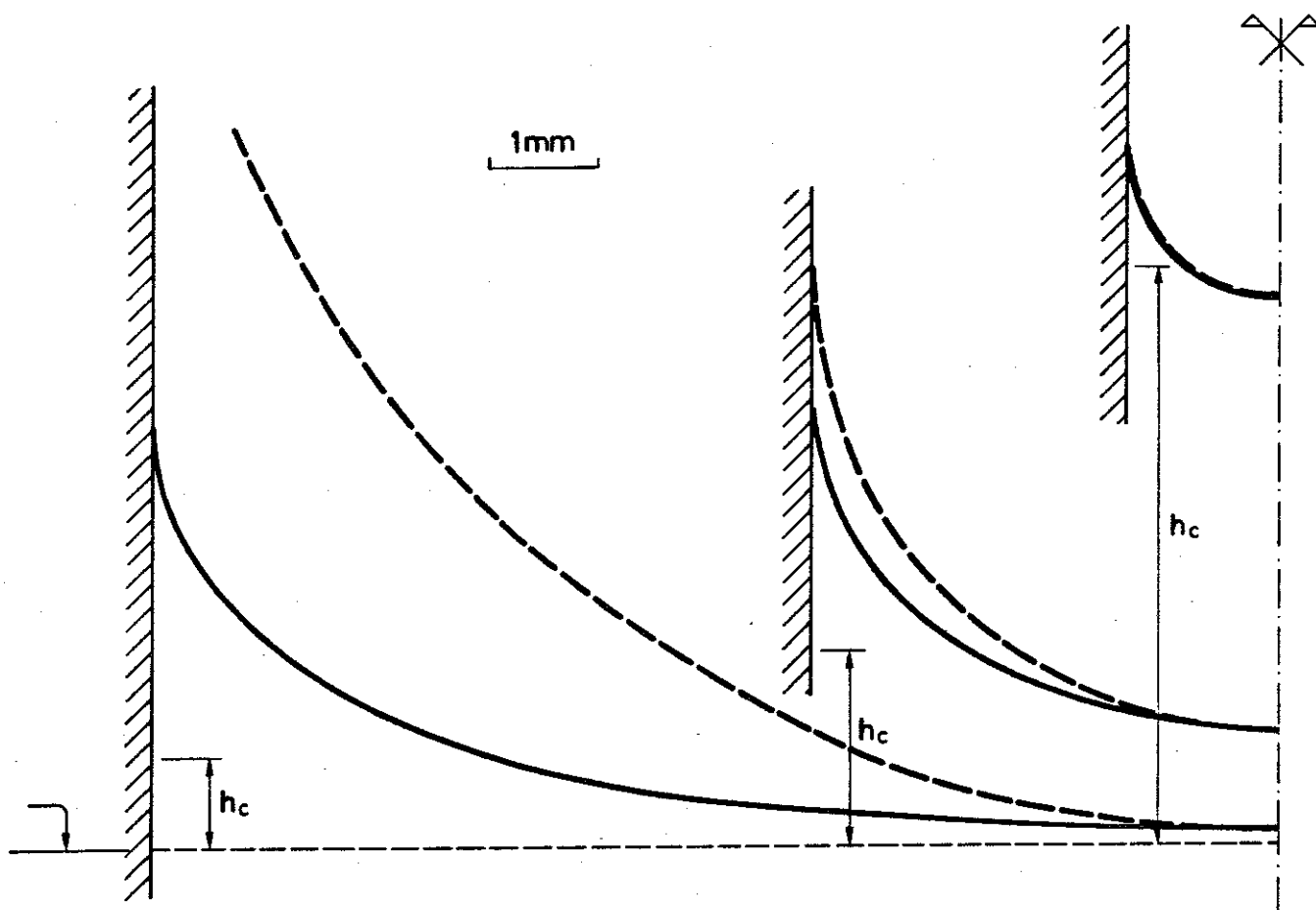


FIGURA 4.6 .- Sección vertical de la interfase aire-agua entre dos paredes verticales

La ascensión de un líquido por un capilar es una conocida consecuencia de la tensión superficial (figura 4.7a). Como la sección del capilar cilíndrico es constante,

la interfase líquido-gas es de forma constante a cualquier nivel de ascensión, por lo que su área será constante, y las presiones de ambos lados, p_w y p_a , aproximadamente también, de acuerdo con la ecuación (4.2). El líquido va ascendiendo por el capilar, con la pared del cual tiene mayor afinidad que el aire, hasta alcanzar el equilibrio cuando la energía libre total, W , sea mínima. Los términos de la energía libre susceptibles de variar con el ascenso son: la energía superficial líquido-sólido, W_{ws} ; la energía superficial gas-sólido, W_{as} ; y la energía proveniente del término gravitatorio del potencial del agua, W_g (energía potencial). El equilibrio (energía mínima) se alcanza cuando imponiendo un desplazamiento dz , arbitrario, el cambio en la energía libre, dW , es nulo.

$$dW = dW_{ws} + dW_{as} + dW_g = 0$$

El cambio en la energía potencial de la columna al aumentar una rebanada dz es justamente igual a la energía potencial de esa rebanada:

$$dW_g = d(\text{masa}) \times g \times h = \pi r^2 dz \rho_w g h_c$$

Como:

$$dW_{ws} = \sigma_{ws} dA_{ws} = \sigma_{ws} 2 \pi r dz$$

$$dW_{as} = \sigma_{as} dA_{as} = \sigma_{as} (-2 \pi r dz)$$

Resulta

$$dW = [(\sigma_{ws} - \sigma_{as}) 2 \pi r + \pi r^2 \gamma_w h_c] dz = 0$$

La única solución para el ascenso capilar para cualquier desplazamiento dz , es:

$$h_c = \frac{2 (\sigma_{as} - \sigma_{ws})}{\gamma_w r}$$

Si se quiere obtener en función de la tensión superficial líquido-gas basta aplicar la ecuación de Young (4.3), para obtener

$$h_c = \frac{2 \sigma_s \cos \theta_c}{\gamma_w r} \quad (4.6)$$

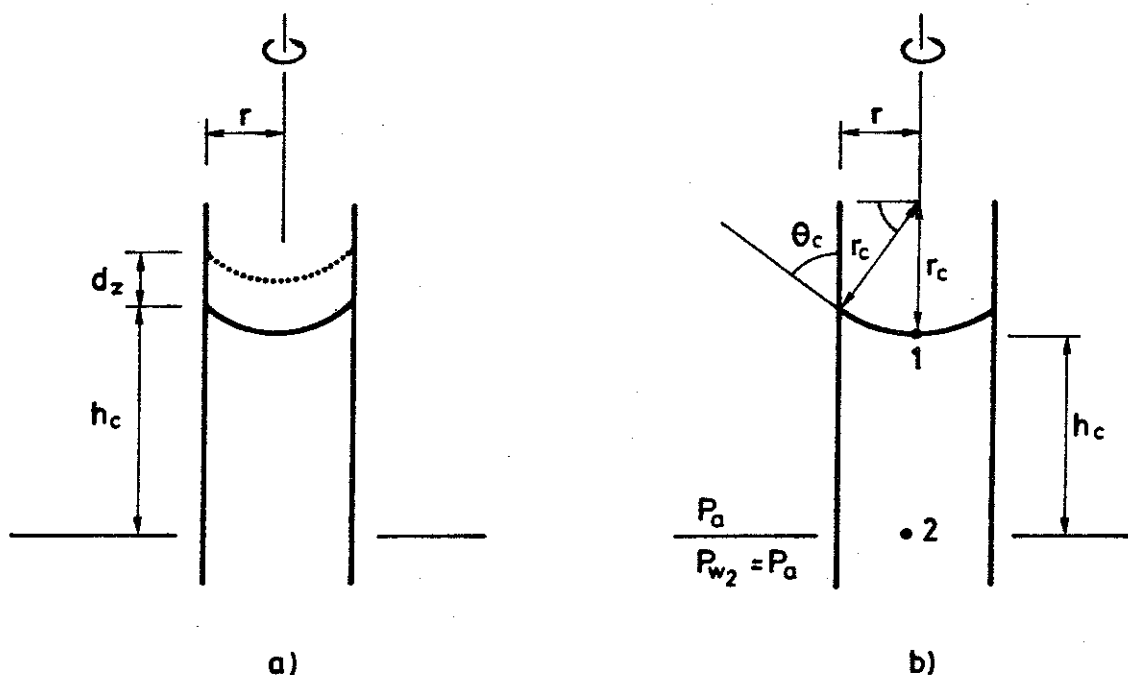


FIGURA 4.7.- Ascensión de un líquido por un capilar de radio r .

Comparando esta ecuación con la 4.5 se constata que la doble curvatura duplica el valor del ascenso. Nótese que la sustitución $\sigma_{as} - \sigma_{ws} = \sigma_s \cos \theta_c$ tiene aquí un sentido puramente de relación de energías superficiales y no un sentido geométrico directo.

De nuevo, es posible deducir la ecuación 4.6 con un enfoque mecánico a base de equilibrar fuerzas o presiones. En la figura 4.7 b, aproximando el menisco de la interfase por un casquete esférico invertido podemos calcular los radios de curvatura principales en el punto 1:

$$r_1 = r_2 = -r_c = -\frac{r}{\cos \theta_c}$$

de acuerdo al convenio de signos ya expresado. Aplicando la ecuación 4.2 obtenemos la presión en el punto 1, que además debe ser igual a la presión en el punto 2 menos el peso de la columna h_c

$$p_{w_1} = p_a - \frac{2 \sigma_s \cos \theta_c}{r} = p_a - \gamma_w h_c$$

de donde se deduce inmediatamente la ecuación 4.6. En algunos textos h_c se encuentra a menudo igualando la componente vertical de la tensión superficial σ_s actuando bajo un ángulo θ_c sobre el perímetro de contacto menisco-capilar ($2 \pi r \sigma_s \cos \theta_c$), con el peso de la columna de agua h_c ($\pi r^2 h_c \gamma_w$). Estos dos últimos enfoques son matemáticamente equivalentes pero conceptualmente menos satisfactorios.

En todo caso tomando los valores más corrientes para el agua a temperatura ambiente se puede establecer la siguiente fórmula aproximada (Kovacs,1981):

$$h_c = \frac{0.30 \text{ cm}^2}{2 r} \quad (4.7)$$

En suelos reales la ascensión capilar estará relacionada con la dimensión típica de los conductos en su interior, es decir con la estructura. Terzaghi y Peck (1967) empíricamente establecen:

$$h_c = \frac{C_o}{e D_{10}} \quad (4.8)$$

donde C_o es una constante a determinar para cada suelo que suele oscilar entre 10 y 50 mm^2 , e es el índice de poros, y D_{10} es el diámetro "pasa" 10% de la curva granulométrica. Para un limo fino el ascenso capilar puede llegar a ser de más de medio metro. En una arena fina, del orden de setenta centímetros, bajando hasta la decena si es gruesa. Steensen-Bach et al.(1987) por ejemplo aproximan la anterior relación con $C_o/e \simeq 30\text{mm}^2$, en consonancia con la ecuación 4.7.

Estas fórmulas pueden dar resultados ajustados para algunos suelos granulares bastante homogéneos pero pueden desviarse bastante en otros muchos casos. En este sentido Custodio y Llamas (1983) recalcan que la interpretación del ascenso capilar como una succión o aspiración producida por el material poroso es aceptable para elevaciones capilares pequeñas, pero es absurda para materiales arcillosos en los que la elevación capilar puede superar los diez metros, a veces hasta treinta. No se trata en efecto de una succión sino de un esfuerzo aplicado a cada molécula. Los tiempos necesarios para alcanzar el ascenso final por imbibición son ,por otro lado, dilatados. Pueden ser días o semanas para una arena; del orden de tres meses si es fina; y llegar a diez meses o superar el año en el caso de limos.

4.2.3 VALOR DEL ANGULO DE CONTACTO

Mucho se ha discutido sobre el valor del ángulo de contacto, θ_c . Como se ha razonado sobre la figura 4.4, su determinación y su misma existencia dependerá en algunos casos de la escala a la que se considere el fenómeno, y de las fuerzas de adhesión. Su determinación experimental puede venir falseada por la no correspondencia modelo-realidad. Este sería el caso si se determinara θ_c midiendo la ascensión capilar y despejando $\cos \theta_c$ de la ecuación 4.5 ó 4.6. Como se ve en la figura 4.7, si el capilar o rendija es demasiado ancho, el valor de $\cos \theta_c$ sólo será un medio o factor para ajustar un modelo (no suficientemente aproximado) a la realidad (h_c). Las micro-rugosidades o la contaminación de la pared sólida también pueden influir en este sentido.

A menudo se suponen condiciones *dinámicas* (movimiento del contacto interfase-sólido) en las consideraciones sobre el ángulo de contacto aparente. Cuando una gota de agua resbala por un plano inclinado la parte superior deja tras de sí una película de agua. En ese punto en realidad la interfase no contacta al sólido y puede suponerse $\theta_c \simeq 0^\circ$. En la parte inferior el agua moja al sólido en su avance. En el punto de contacto las fuerzas de adhesión podrán modificar localmente la interfase, pero además está claro que la velocidad de la gota, su flujo interno y el gradiente de z modificarán las presiones del agua también, y no es adecuado formular un θ_c , característico de condiciones de equilibrio.

La variación del ángulo de contacto ha sido un medio por el que tradicionalmente se ha explicado, al menos en parte, la histéresis que presenta el suelo en su retención de humedad en episodios de drenaje-imbibición (efecto "gota de agua"). Por este motivo Fenzy (en Arquíé, 1973) utilizó un ángulo no nulo (30°) dentro del proceso de imbibición. La diferencia de humedad directamente atribuible a este efecto ha ser relativamente reducida. Por otro lado no es necesario el concurso de ángulos de contacto variables para explicar diferencias en la actuación de la tensión superficial, puesto que el suelo, con sus conductos tortuosos y de "diámetro" variable,

podrá presentar superficies con inclinaciones diversas respecto a la vertical, resultando en componentes verticales de la tensión superficial (considerada como fuerza) mucho más variables (figura 4.8). En este caso el equilibrio para una misma succión puede encontrarse no sólo dentro de una misma "ondulación" de un capilar, sino también en una angostura completamente distinta. Este fenómeno se puede denominar "efecto tintero" y no precisa de ángulos de contacto variables (Kovacs, 1981). Los distintos tamaños de capilar pueden representar distintas agrupaciones de partículas más o menos finas.

Suponiendo cambios de humedad suficientemente lentos, a largo plazo se puede pensar que siempre existirán películas sobre las superficies sólidas, por lo que en este trabajo se adopta, a efectos geométricos y de cálculo de las interfases, un ángulo de contacto (superficie aire-agua con sólido) *nulo*. Este es un valor ampliamente utilizado para la interfase aire-agua sobre la mayoría de los minerales que forman las partículas de suelo (Kovacs, 1981; Kirkham y Powers, 1972; Williams, 1967; Dorsey, 1968; Clifford, 1975; Arquí, 1973; Evans, 1983; Custodio y Llamas, 1983, pag. 555).

4.3 DISPOSICION DE LA FASE LIQUIDA COMO MENISCOS ENTRE PARTICULAS

Establecidos en anteriores apartados los principios generales de conformación de la interfase, en el presente epígrafe se estudia la "tipología" *menisco aislado*, que será la más representativa en el modelo de suelo no saturado a bajos contenidos de humedad que se desarrolla.

En dicha situación de humedad la fase líquida no presenta continuidad, y el agua tiende a disponerse en los intersticios entre partículas en un intento de reducir al máximo su área de interfase con el aire. Esto es así porque la tensión interfacial agua-sólido, σ_{ws} , es despreciable frente a las demás. (ver figura 4.4). Además la superficie interfacial aire-agua tendrá una curvatura media de acuerdo a la ecuación de Laplace (4.2). Si despreciamos el pequeño gradiente de presión que puede haber en

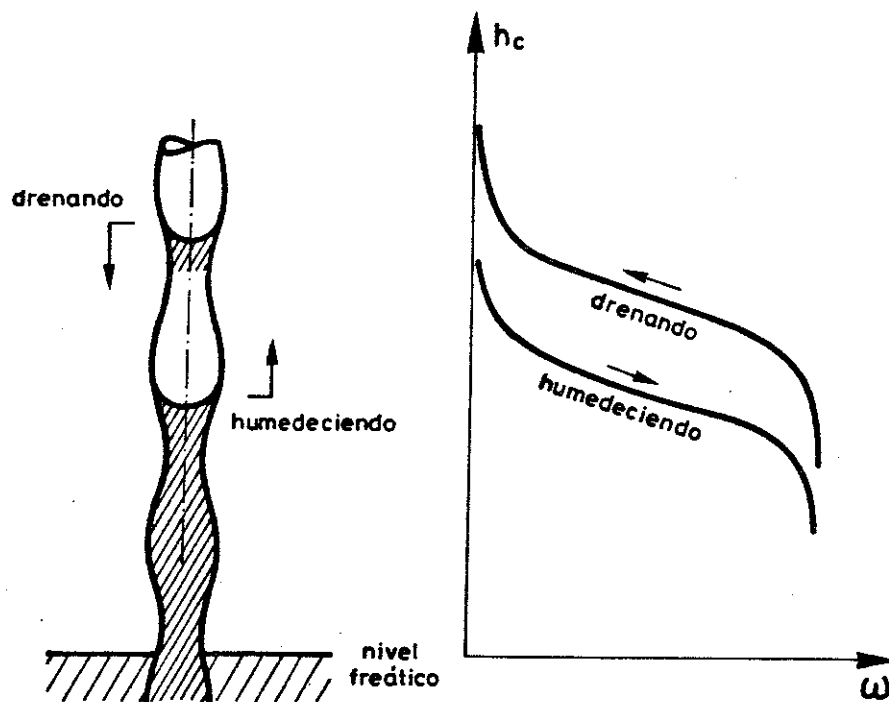


FIGURA 4.8 .- Histéresis en la retención de humedad (adaptado de Kovacs, 1981).

uno de dichos minúsculos intersticios resultará una superficie interfacial de curvatura media constante.

Salvando las irregularidades propias de las partículas cerca del contacto, la disposición del agua a su alrededor tendrá una cierta simetría de revolución, y por tanto un radio de curvatura (r_1) hacia el interior del líquido (es decir de signo positivo en esa ecuación). Si el estado general del agua en el suelo es de deficiencia de presión en relación al aire (succión: $p_a > p_w$), de acuerdo a dicha ecuación el otro radio de curvatura (r_2) deberá ser de signo negativo (es decir con curvatura hacia el aire), resultando una disposición del volumen de agua en forma de "llanta de automóvil" (figura 4.9).

La palabra *menisco* viene del latín, significa oquedad, y sirve para designar, entre otras cosas, la forma de la interfase aire-agua al ascender por un capilar. Por extensión en diversos trabajos (y en esta tesis) se utiliza para designar esa particular

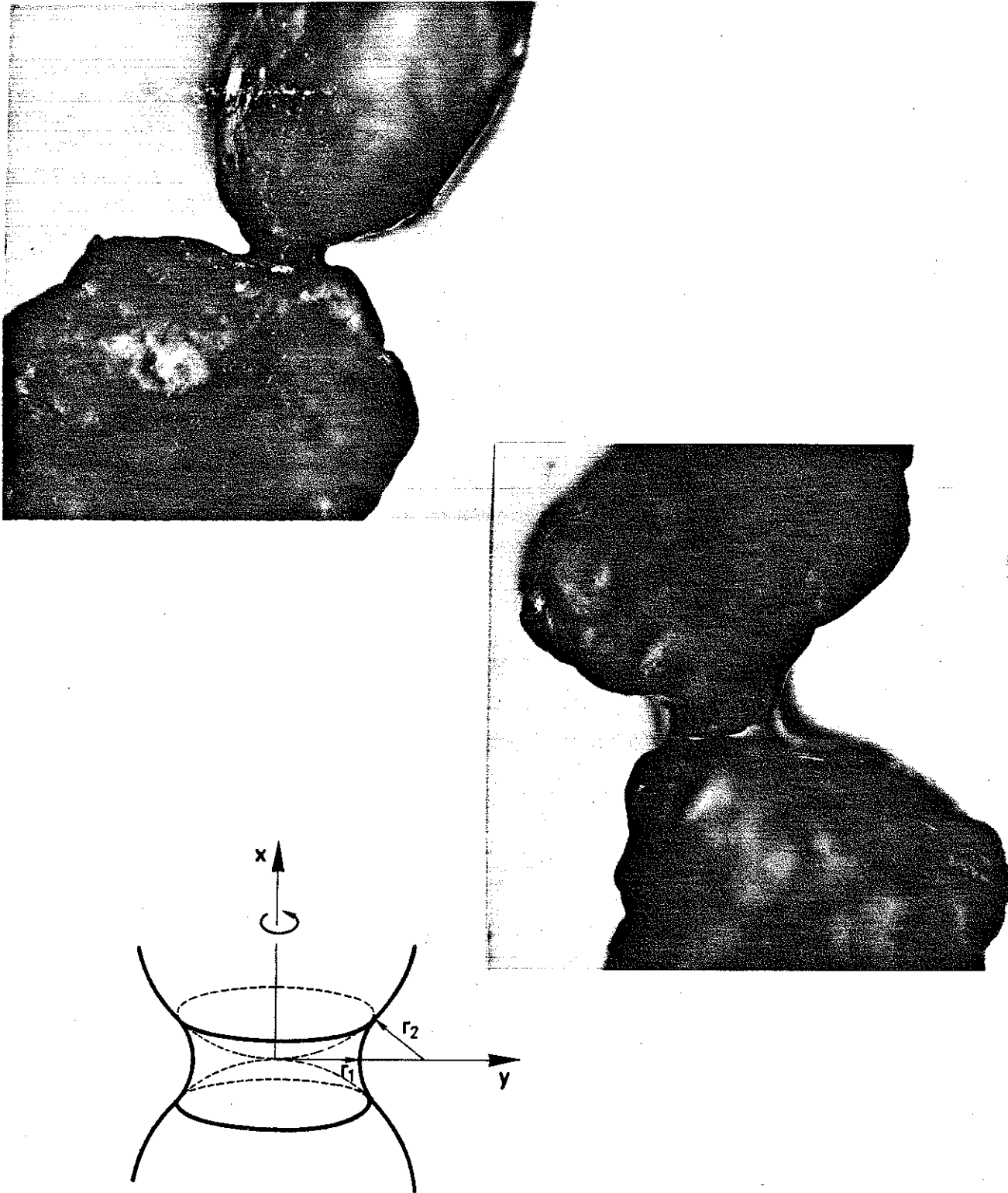


FIGURA 4.9 .- El menisco aislado alrededor de un contacto entre partículas.

disposición del agua en un volumen con interfase de doble curvatura alrededor de un contacto entre partículas.

La geometría exacta del menisco, en particular de su interfase con el aire, deberá observar entre otros los siguientes principios:

- a) Angulo de contacto con las partículas sólidas nulo.
- b) Energía libre del "sistema" mínima.
- c) Curvatura media constante en todos sus puntos, de acuerdo a la diferencia de presión del agua y del aire.

El primer principio puede interpretarse como una condición de contorno que debe satisfacerse. Las dos restantes se traducen en unas condiciones diferenciales (mínimo condicionado) que deberá cumplir la interfase. La solución sería una familia de superficies. Se escoge una superficie dentro de la familia si se conoce por ejemplo el volumen de agua que debe encerrar (es decir el volumen de agua del menisco); o bien, si se impone una succión determinada, se obtendrá otra superficie.

En todo caso la disposición en forma de "llanta de automóvil", aparte de ser real (como se ve en la figura 4.9), concuerda a grandes rasgos con los anteriores principios. En efecto, es tangente al sólido. Como sea que la interfase que tiene mayor energía libre asociada es la líquido-gas, coherentemente el menisco presenta un área agua-aire reducida, tendiendo a la *mínima* (tema que se justificará en epígrafes posteriores. Por otro lado otro término importante de la energía libre es la asociada a la presión de agua. También este término será reducido, al estar el agua del menisco "a tracción" (presión de agua menor que la presión de aire, de acuerdo a la succión). Los radios de curvatura r_1 y r_2 deberán combinarse en cada punto para que la curvatura media sea constante.

Conviene justificar brevemente lo que se ha dicho en el último párrafo. Este va a ser el objeto de los próximos epígrafes. En el 4.3.1 se formaliza la curvatura media de una superficie. A continuación (4.3.2) se va a plantear el problema de las superficies de curvatura constante. En el epígrafe 4.3.3 se determina la superficie

exacta, de curvatura constante (“pseudocatenoide”), que corresponde a la “llanta de automóvil” de la figura 4.9. En el siguiente (4.3.4), se aproxima la anterior superficie mediante un menisco toroidal (entre esferas tangentes e iguales) que ha sido usado por diversos autores (4.3.5). Finalmente en 4.3.6 se generaliza el menisco toroidal (para esferas de distinto radio, no necesariamente tangentes), y en 4.3.7 se resaltan algunas posibles desviaciones y limitaciones al modelo menisco aislado.

4.3.1 CURVATURA MEDIA DE UNA SUPERFICIE

Una expresión general de una superficie en coordenadas paramétricas u, v puede ser $\vec{r}(u, v)$. Por un punto cualquiera de ella, P, pueden pasar infinitas curvas, cada una de ellas con una particular curvatura $\vec{K} = k \cdot \vec{m}$ (\vec{m} : vector “normal” de la curva en cuestión; k : inverso del radio de curvatura). Si se proyectan dichas curvaturas sobre el vector normal a la superficie, \vec{n} , se obtiene la denominada curvatura normal K_n .

Se puede demostrar (Fedenko, 1981; Departamento de Métodos Matemáticos, 1985) que todas las curvas con tangente común en P tienen idéntica curvatura normal, y por ello una determinada K_n se asocia a una dirección sobre la superficie en P mas que a una curva. Se conocen como direcciones principales aquellas con máxima y mínima curvaturas normales ($K_1 = 1/r_1, K_2 = 1/r_2$). Dichas direcciones diagonalizan la matriz del operador principal de la superficie en el punto P:

$$\underline{A} = \frac{1}{E G - F^2} \begin{pmatrix} FM - GL & FN - GM \\ FL - EM & FM - EN \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

siendo E, F y G los tres factores de la primera forma cuadrática fundamental de la superficie:

$$\begin{aligned} E &= \partial_u \vec{r} \cdot \partial_u \vec{r} \\ F &= \partial_u \vec{r} \cdot \partial_v \vec{r} \\ G &= \partial_v \vec{r} \cdot \partial_v \vec{r} \end{aligned} \quad (4.10)$$

y siendo L , M y N los tres factores de la segunda forma cuadrática fundamental de la superficie:

$$\begin{aligned} L &= -\partial_u \vec{n} \cdot \partial_u \vec{r} \\ M &= -\partial_u \vec{n} \cdot \partial_v \vec{r} \\ N &= -\partial_v \vec{n} \cdot \partial_v \vec{r} \end{aligned} \quad (4.11)$$

Los autovalores de la matriz \underline{A} son pues las curvaturas principales K_1 y K_2

La curvatura media, H , será el promedio de las dos curvaturas principales, y como la traza es un invariante:

$$H = \frac{K_1 + K_2}{2} = -\frac{1}{2} \text{traza}(\underline{A}) = \frac{EN + GL - 2FM}{2(EG - F^2)} \quad (4.12)$$

4.3.2 SUPERFICIES DE CURVATURA CONSTANTE. SUPERFICIES MINIMAS

La superficie con la que se está intentando caracterizar al menisco se puede considerar de curvatura media constante. Este caso es el que se va a estudiar aquí.

Si aproximamos la interfase aire-agua alrededor del contacto entre dos sólidos como una superficie de revolución (figura 4.9) alrededor de un eje ficticio entre los dos centros de las dos partículas, supuestas esféricas, la ecuación 4.12 puede simplificarse (Spivak, 1979; Marqués, 1984). En efecto, suponiendo que la superficie se genera por revolución de la curva $y = y(x)$ alrededor del eje x , se puede parametrizar la superficie como

$$\vec{r}(x, \alpha) = (y(x) \cos \alpha, y(x) \operatorname{sen} \alpha, x)$$

Aplicando las definiciones 4.9 a 4.11 se obtiene

$$H = \frac{1 + y'^2 - y \cdot y''}{2y(1 + y'^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (4.13)$$

Aceptando también una cierta simetría por encima y por debajo del eje y (figura 4.9) y siendo imprescindible que las derivadas primera y segunda sean continuas para que lo sea H , podemos imponer unas condiciones iniciales a la curva $y(x)$ en $x = 0$, como por ejemplo

$$y(0) = h \quad ; \quad y'(0) = 0 \quad (4.14)$$

(es decir la curva tiene un extremo en $x = 0$)

La condición c más arriba establecida supone $H = cte$ en 4.13, que se convierte en una ecuación diferencial que nos fija la curva $y(x)$ en función de sus derivadas.

Para intentar resolverla, efectuaremos el cambio de variables:

$$g(y) = \frac{1}{\sqrt{1 + y'^2}} \quad (4.15)$$

Es fácil ver que en estas condiciones 4.13 equivale a:

$$d(y g) = 2 H y dy \quad (4.16)$$

que una vez integrada y haciendo uso de las condiciones 4.14 se convierte sucesivamente en:

$$\frac{y}{\sqrt{1 + y'^2}} = H (y^2 - h^2) + h \quad (4.17a)$$

$$y'^2 = \left(\frac{y}{H (y^2 - h^2) + h} \right)^2 - 1 \quad (4.17b)$$

$$x = \int \frac{H (y^2 - h^2) + h}{\sqrt{(y^2 - h^2) [(1 - H h)^2 - H^2 y^2]}} dy \quad (4.17c)$$

Esta última expresión una vez integrada nos permitiría conocer la forma de la curva generadora conformada bajo una curvatura media H dada, y con una dimensión

en el “ecuador” ($x = 0$) igual a $2h$ (esta dimensión controla, en definitiva, el volumen de agua encerrado por la interfase).

Desafortunadamente la integral es de tipo elíptico, no resoluble más que en una serie de casos particulares.

El primer caso particular se presentaría para $H = 1/h$, resultando como solución $y = \sqrt{h^2 - x^2}$. Es decir una esfera de radio h , que no interesa para nuestros propósitos, puesto que el agua estaría a mayor presión que el aire.

El segundo caso particular tendría $H = 1/2h$. Es fácil ver que conduce a un cilindro de radio h ($y \equiv h$), solución que presenta el mismo inconveniente que la anterior.

Otro caso particular que merece mención aparte es el de $H = 0$. Una rama entera de la geometría diferencial se dedica al estudio de las superficies con curvatura media nula, llamadas superficies “mínimas” o “minimales” (de revolución o no), según terminología introducida por Lagrange en 1760.

La razón de este nombre es que, de todas las superficies que tienen a una determinada curva cerrada C como contorno, la que tiene área total mínima satisface $H = 0$ en cualquier punto.

El interés de estas superficies en nuestro caso es grande puesto que para valores pequeños de H , aunque no nulos, (succiones moderadas), las superficies de la interfase podrán parecerse a las superficies mínimas. En el límite cuando el agua y el aire estén a la misma presión, la interfase será una de ellas.

Ejemplos de superficies mínimas son el plano y el helicoides (figura 4.10). También lo son la superficie de Scherk y la de Enneper. De todas ellas las únicas con ciertos visos de interés físico para el caso que nos ocupa son la a) y la e) y en menor grado la c). La única superficie mínima de revolución, además del plano, es el catenoide (figura 4.10) que se obtiene por revolución de una catenaria (Do Carmo, 1976). En efecto, si imponemos $H = 0$, de la ecuación 4.17b resulta inmediatamente

la solución (catenaria):

$$y = h \cosh\left(\frac{x}{h}\right) \quad (4.18)$$

4.3.3 EL PSEUDOCATENOIDE

Como ya se ha dicho, cuando la diferencia de presiones sea no nula ($H \neq 0$) la interfase del menisco se asemejará al catenoide.

En concreto interesan los casos $H < 0$, en los cuales el radio de curvatura hacia el interior del menisco r_1 sea mayor, en valor absoluto, que el radio de curvatura r_2 (con círculo osculador en el plano $x - y$ figura 4.9, y hacia fuera del menisco, por lo que además deberá emplearse con signo negativo). Estos serán los casos en los que, según la ecuación 4.2, el agua se encontrará a tracción.

En estas circunstancias, de la ecuación 4.17 (a y b) se puede acotar el valor de la función $y(x)$ (ver figura 4.11):

$$h \leq y \leq \sqrt{h \left(h - \frac{1}{H} \right)} = y_{max} \quad (4.19a)$$

$$\lim_{y \rightarrow y_{max}} y' = +\infty \quad (4.19b)$$

La condición 4.19b deja bien claro que si existiera una solución analítica a la ecuación 4.17 no podría parecerse a un coseno hiperbólico. Como ya se ha dicho, tal ecuación no es integrable pero sí que se puede resolver numéricamente por incrementos y aproximaciones sucesivas para conformar una superficie bajo una curvatura dada (o lo que es lo mismo bajo una succión dada) y que se adapte a unas superficies sólidas determinadas. A pesar de lo dicho al inicio del párrafo, a dicha superficie se le llamará en lo sucesivo "pseudocatenoide". El único punto singular aparece en el

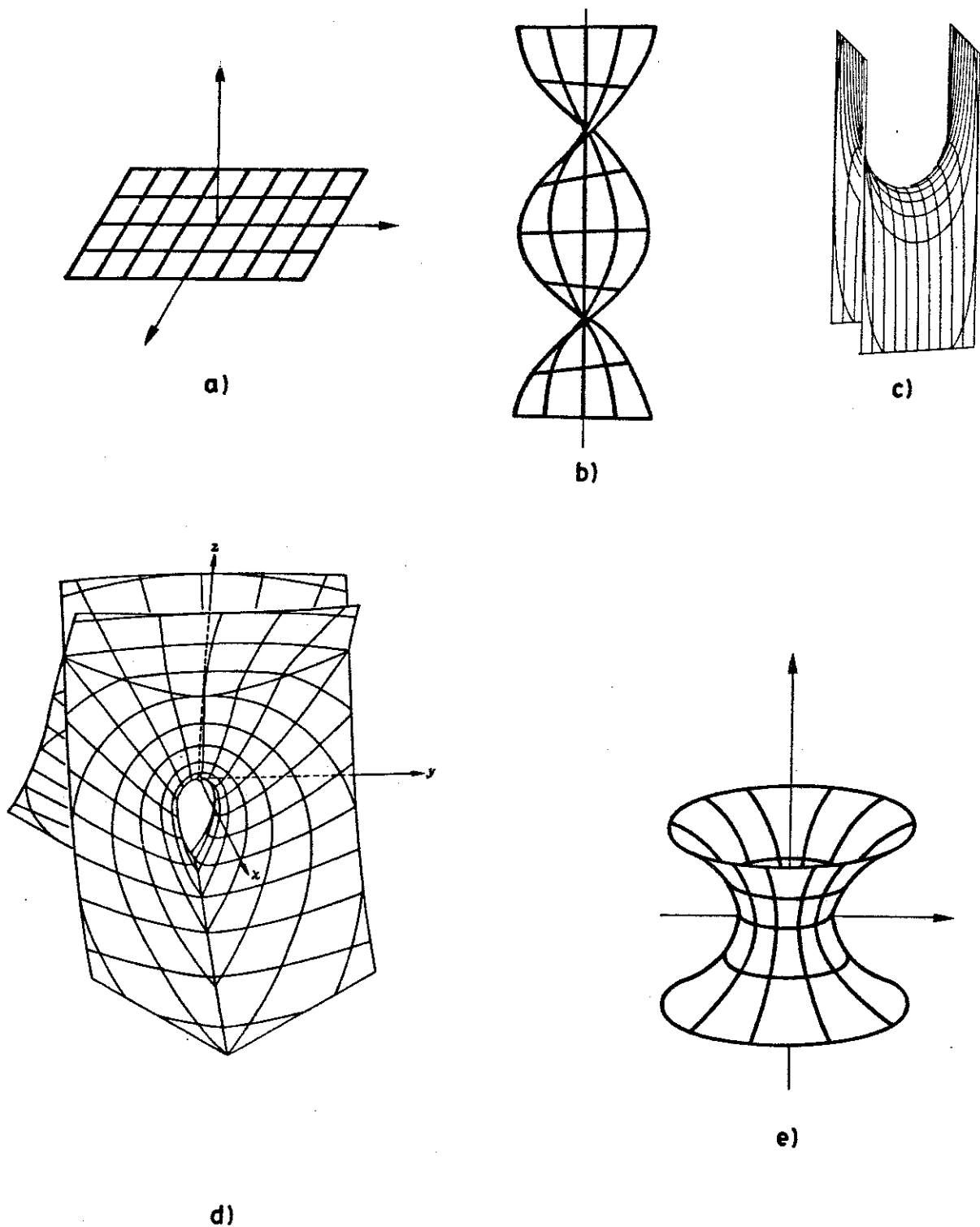


FIGURA 4.10.- Algunas superficies mínimas ($H = 0$):

a) Plano $z = cte.$

b) Helicoide $\vec{r}(u, v) = (a \sinh v \cos u, a \sinh v \sin u, a u)$

c) Una célula de la superficie de Scherk $e^x \cos x = \cos y$

d) de Enneper $\vec{r}(u, v) = (u - \frac{u^3}{3} + uv^2, v - \frac{v^3}{3} + vu^2, u^2 - v^2)$

e) Catenoide $\vec{r}(x, \alpha) = (h \cosh \frac{x}{h} \cos \alpha, h \cosh \frac{x}{h} \sin \alpha, x)$

inicio de la curva ($y = h$), donde $y' = 0$. Puede resolverse conociendo el otro radio de curvatura (r_2). En efecto como en $y = h$ se cumple $r_1 = h$, entonces

$$r_2^{-1} = r_1^{-1} - 2H \quad (4.20)$$

Este esquema numérico ha sido utilizado para encontrar la forma del menisco entre dos partículas esféricas de radio $2 \times 10^{-3} \text{ cm}$ y tangentes. En la figura 4.12 se presentan los casos de "succión local" igual a $0.9Kp/cm^2$ (a), $0.5Kp/cm^2$ (b), y nula (c). Para este último caso el arco obtenido es en realidad un auténtico catenoide. Las diferencias entre los valores del arco obtenidos numéricamente y los valores analíticos según la ecuación 4.18 son menores del 0.003%.

4.3.4 EL MENISCO TOROIDAL

En un intento de encontrar superficies tratables analíticamente y similares al pseudocatenoide, se ha investigado el hiperboloide de una hoja y el toro. El hiperboloide puede expresarse como:

$$y^2 + z^2 = a^2 x^2 + b^2 \quad (4.21)$$

siendo el eje x el de revolución.

Aplicando las ecuaciones 4.10 a 4.13 se puede evaluar su curvatura media como (caso $a = 1$):

$$H = \frac{x^2}{(b^2 + 2x^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (4.22)$$

Se considera no adecuada para adaptarse al pseudocatenoide, dado que la curvatura al principio ($x = 0$) es nula, luego varía rápidamente y finalmente se mantiene casi constante.

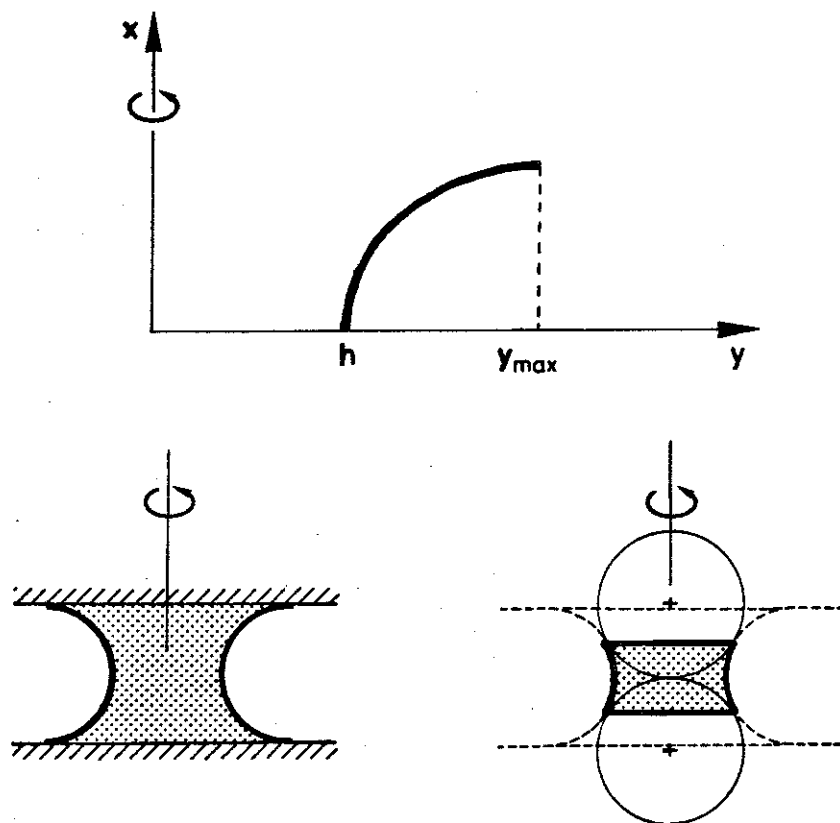
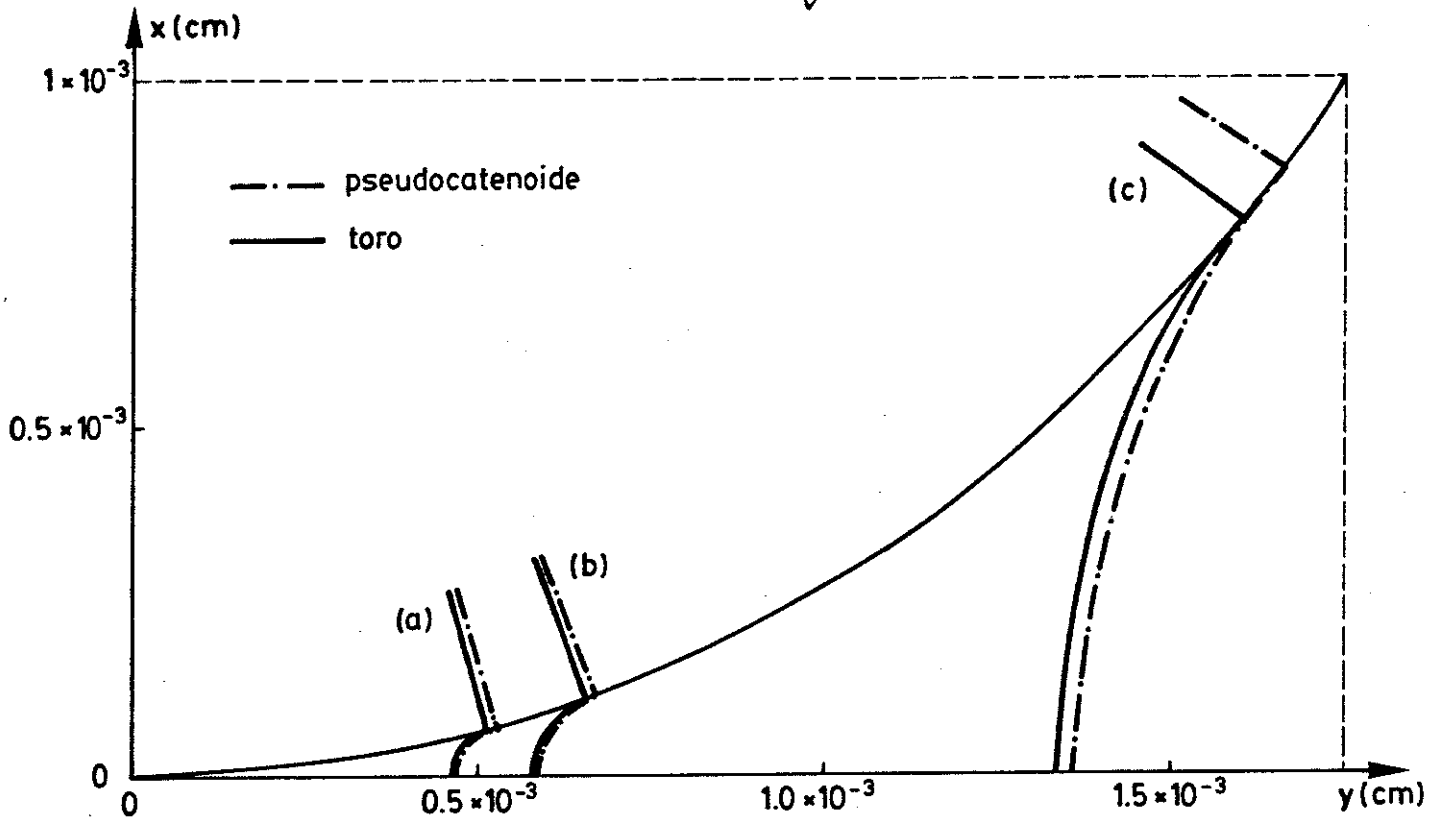
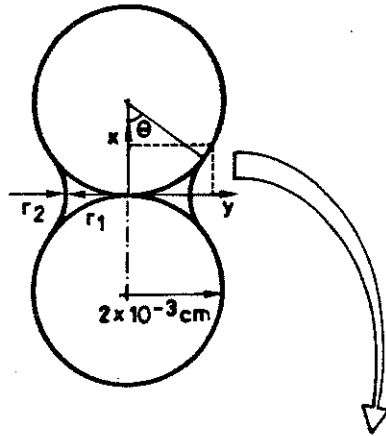


FIGURA 4.11 .- Solución exacta del menisco en el caso $H < 0$ (pseudocatenoide).

Un toro es un anillo que resulta de rotar (con radio de giro a) una circunferencia (de radio b) alrededor de un eje, en nuestro caso el de las x . Su expresión en paramétricas es ($0 < b < a$, radios constantes):

$$\begin{aligned}
 x &= b \sin u \\
 y &= (a + b \cos u) \sin v \\
 z &= (a + b \cos u) \cos v \\
 0 &\leq u \leq 2\pi \\
 0 &\leq v \leq 2\pi
 \end{aligned}
 \tag{4.23}$$



	a		b		c	
	PSEUDOCATENOIDE	TORO	PSEUDOCATENOIDE	TORO	CATENOIDE	TORO
$P_{wo} - P_a$ (Kp/cm ²)	-0,9	-0,9 (*)	-0,5	-0,5 (*)	0	0 (*)
r_1 (* cm)	$4,69 \times 10^{-4}$	$4,63 \times 10^{-4}$	$5,88 \times 10^{-4}$	$5,79 \times 10^{-4}$	$1,363 \times 10^{-3}$	$1,333 \times 10^{-3}$
r_2 (* cm)	$7,01 \times 10^{-5}$	$6,99 \times 10^{-5}$	$1,185 \times 10^{-4}$	$1,18 \times 10^{-4}$	$1,363 \times 10^{-3}$	$1,333 \times 10^{-3}$
θ mojado (°)	15,20	14,94	19,65	19,23	55,62	53,3
volumen menisco (cm ³)	$-0,42 \times 10^{-10}$	$0,4 \times 10^{-10}$	$-1,07 \times 10^{-10}$	1×10^{-10}	$-34,8 \times 10^{-10}$	$31,7 \times 10^{-10}$

(*: Estas magnitudes están particularizadas al plano "del ecuador" del menisco, es decir $x=0$)

FIGURA 4.12.- Solución numérica del menisco entre dos esferas sólidas tangentes para tres succiones.

La parte interior de tal superficie se asemeja a la "llanta de automóvil" de la figura 4.9. Su curvatura media,

$$H = \frac{1}{2} \left(\frac{\cos u}{a + b \cos u} + \frac{1}{b} \right) \quad (4.24)$$

evidentemente tampoco es constante, pero varía moderadamente en zonas cercanas al "ecuador" ($u \rightarrow 0$). Los inversos de los dos sumandos interiores al paréntesis son los correspondientes radios de curvatura principales. Uno de ellos sí que es constante.

Esta superficie tiene la ventaja de su *simplicidad* y de que se puede adaptar bien al *pseudocatenoide* y a la tangencia sobre las esferas sólidas. En la figura 4.12, paralelamente a los pseudocatenoides se ha representado en trazo continuo las correspondientes porciones de toro que presentan igual succión en su "ecuador" y que son tangentes a las dos esferas sólidas. En la tabla de la figura pueden apreciarse también algunas (pequeñas) diferencias geométricas. Se podrían tomar como comparación al catenoide otros toros que encerrarán un volumen de menisco similar al de las pseudocatenoides. Estos toros (no representados por su práctica coincidencia con los pseudocatenoides) tendrían en su "ecuador" una succión menos de tres centésimas de atmósfera distinta a la expresada en la tabla para los casos a, b y c.

La curvatura no constante del toro puede dar lugar a diferencias de presiones de agua evaluadas con la curvatura real y la ecuación de Laplace (4.2) en distintos puntos de la superficie. Concretamente, en el punto de contacto entre el toro y la esfera de la figura 4.12, el agua tendría una presión, p_{w1} , menor que la presión en el "ecuador" (p_{w0} , la de la tabla de la figura 4.12). La diferencia es de 0.12 Kp/cm² para el caso a, 0.09 Kp/cm² para el b, y 0.02 Kp/cm² para el c.

Si se trata de evaluar la *fuerza de unión neta* que ejerce el menisco entre las dos partículas que lo delimitan (que llamaremos fuerzas de capilaridad*), la presión no constante puede dar lugar a resultados (ligeramente) distintos. Esto es lo que se ha tratado de ilustrar en la figura 4.13. La fuerza de capilaridad está compuesta de

* en algunas ocasiones también se denominará de "sobrecontacto", puesto que tiende a juntar a las dos partículas que une

dos sumandos: uno debido al agua en deficiencia de presión en el interior del menisco (cuya acción se integra en una determinada superficie “de corte”); y el otro debido a la acción de la tensión superficial (interpretado como fuerza por unidad de longitud) a lo largo de una línea intersección de la interfase y la superficie “de corte”. Si se “corta” por uno u otro nivel del menisco y si se considera una u otra presión de agua, se consiguen las fuerzas notadas como F_w , F_o , F_m y F_1 . La primera de ellas correspondería a un corte según el plano “ecuatorial” del menisco. La tercera a un corte “a ras” de esfera, con la presión de agua variable, función de la curvatura de la interfase (toro) a ese nivel. La segunda y la cuarta son meramente unas cotas inferior y superior a F_m . Se ha incluido el rango total de ángulo de mojado ($0^\circ < \theta < 90^\circ$) para reflejar que la fuerza de capilaridad (o de “sobrecontacto”) oscila entre límites finitos ($2\pi\sigma_s R$ y $\pi\sigma_s R$), aunque, como se verá, el modelo menisco aislado deja de tener validez física y conceptual mucho antes.

Las diferencias (pequeñas) de presión de agua en el menisco y de fuerza de capilaridad a uno u otro nivel del menisco toroidal reflejados en los dos últimos párrafos son consustanciales o vienen provocadas por la falta de constancia de la curvatura media (ecuación 4.24). Por lo tanto, si se quiere trabajar con un menisco toroidal como aproximación al pseudocatenoide, conscientes de estas diferencias, se deberán adoptar los valores de presión de agua (succión) y de fuerzas de capilaridad (p_{wo} y F_w respectivamente, figura 4.13) en un punto o nivel fijo y convenido. En nuestro caso este nivel será el “ecuador” del menisco, definido como plano perpendicular al eje de revolución por el punto del toro más próximo a dicho eje.

En el anejo A1 se presentan las relaciones geométricas para el menisco toroidal aislado bajo estos supuestos (caso particular, en el cual las partículas son iguales, esféricas de radio R , y tangentes). También se incluyen como consecuencia de la geometría, las relaciones de ésta con la succión y la fuerza capilar o de “sobrecontacto”.

El ángulo θ , con el mismo significado que en las figuras 4.12 y 4.13, es el que sirve para formular las ecuaciones allí incluidas. Es interesante, por examen directo de dichas ecuaciones, resumir las siguientes relaciones cualitativas (en las cuales las

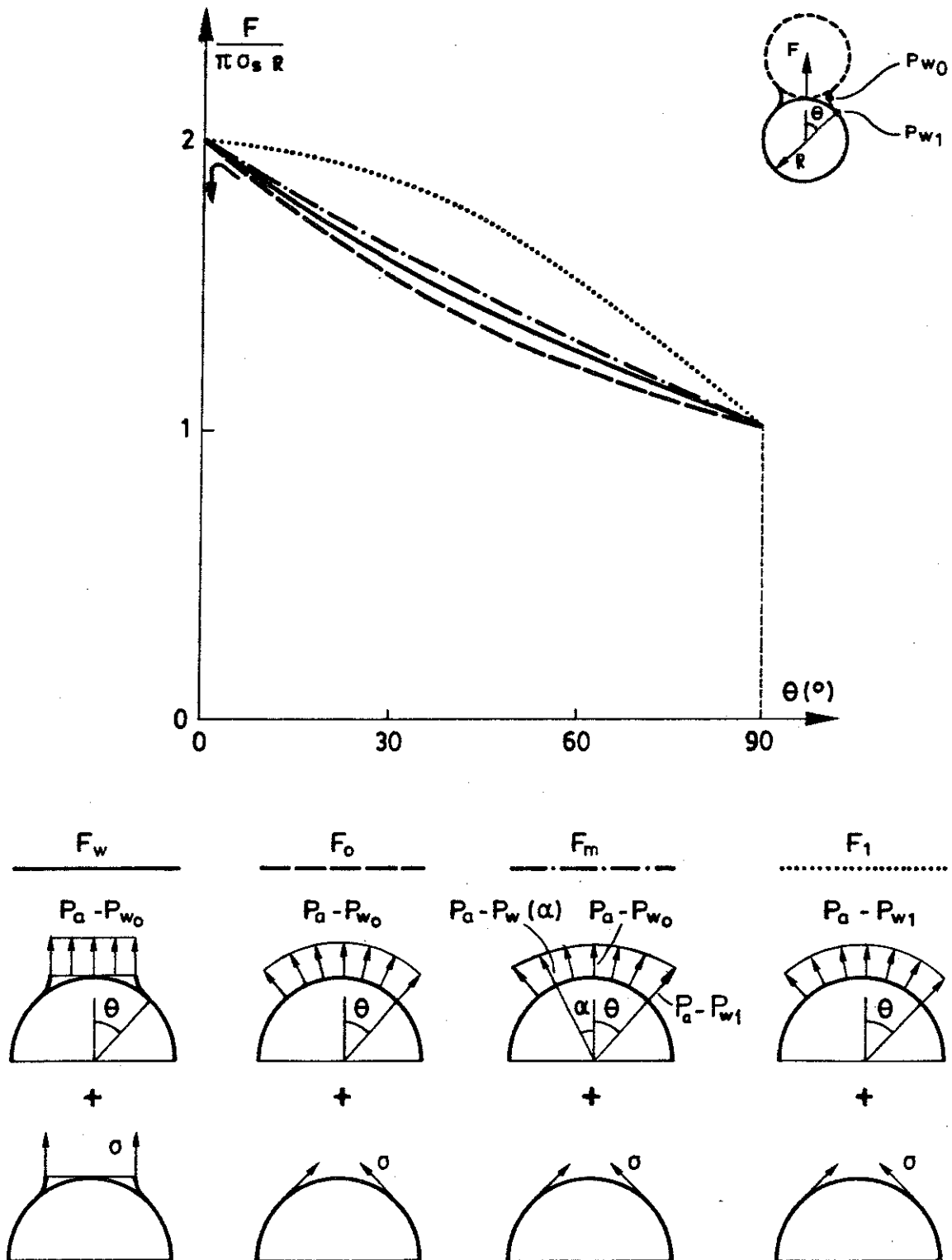


FIGURA 4.13 .- Fuerza de capilaridad (o de "sobrecontacto") para diversas superficies "de corte" de un menisco toroidal entre dos esferas sólidas tangentes.

funciones f sirven sólo para separar las variables):

$$\begin{aligned}
 \text{Dimensiones : } r_i &= R \cdot f_i(\theta) \\
 \text{Areas : } A &= R^2 \cdot f_A(\theta) \\
 \text{Volumen : } V &= R^3 \cdot f_V(\theta) \\
 \text{Presiones : } p_w - p_a &= \frac{\sigma_s}{R} \cdot f_P(\theta) \\
 \text{Fuerza capilar : } F_w &= \pi \sigma_s R \cdot f_F(\theta) \\
 \text{Pseudo-tension global equivalente : } \sigma_w &= \frac{\sigma_s}{R} \cdot f_\sigma(\theta) \\
 \text{Humedad equivalente : } \omega &= f_\omega(\theta) \\
 \text{Grado satur. equivalente : } S_r &= f_{S_r}(\theta)
 \end{aligned}
 \tag{4.25}$$

Las tres últimas expresiones se refieren a valores inferidos desde el menisco aislado a un "suelo ideal" compuesto por multitud de ellos idénticos entre partículas sólidas con estructura conocida. En este caso, y aceptando la validez de dichas fórmulas, se deduce que distintos suelos con la misma humedad tendrán ángulos "mojados", θ , idénticos independientemente de su tamaño o de grano, $2R$. Además la succión será inversamente proporcional a dicho tamaño, las fuerzas interparticulares por ella provocadas, directamente proporcionales, y el efecto global (σ_w) inversamente proporcional a R de nuevo. Es decir, a menores tamaños de suelo, mayor es el efecto del agua en succión, comportamiento cualitativo ampliamente constatado en suelos (desde el punto de vista granulométrico, independientemente de su actividad).

El menisco aislado entre dos esferas deja de tener sentido como modelo de retención de agua "bajo succión" (en el caso particular de "contacto estricto") para ángulos de mojado (θ) superiores a $\simeq 53^\circ$. Para ese valor, el agua pasa a estar a mayor presión que el aire y, lógicamente, antes buscará posiciones con menor energía libre (menor energía potencial, por desprendimiento y caída de "gotas"). Antes de eso, sin embargo, los meniscos "vecinos" en un determinado empaquetamiento de esferas dejarán de ser "aislados" por contacto físico entre ellos. Por ejemplo, para una estibación cúbica regular ésto sucederá para $\theta \simeq 45^\circ$. En otras estructuras de suelo el valor límite será aún menor. Por ambas limitaciones el modelo sólo podrá ser representativo para θ menores (valores intermedios de succión), para los cuales es

realmente factible que el agua esté en las angosturas alrededor de los contactos entre partículas.

4.3.5 REFERENCIAS AL MENISCO TOROIDAL

El modelo así enunciado, que podríamos denominar del “menisco aislado”, caso particular, ha sido usado en términos similares por multitud de autores, para hacer disquisiciones cualitativas o semicuantitativas sobre el efecto de la succión en el comportamiento resistente y deformacional de suelos no saturados.

Entre las referencias más tempranas destacan las de Haines (1925) y Fisher (1926) que ya utilizaron la fuerza de capilaridad, F_w , producida por los meniscos, para traducir el efecto de la succión a una cohesión equivalente en un suelo ideal.

En Lambe (1960) se utiliza conceptualmente para razonar la infiltración y los fenómenos capilares en suelos no cohesivos.

Aitchison y Donald (1956), en un interesante conjunto de artículos que se han discutido en el capítulo 2, también se valen de él para razonar cual es el efecto máximo de la deficiencia de presión de agua en el suelo. Este efecto lo concretan en una pseudo-tensión efectiva (similar a la σ_w definida anteriormente en la ecuación 4.25, pero para cualquier estado de humedad) que tendrá unas connotaciones resistentes en el suelo. De manera semicuantitativa, a partir de modelos teóricos y de la curva de retención de humedad, encuentran que dicha tensión es mayor cuando el suelo (granular) está casi saturado, es decir cuando el agua está “a tracción” pero no ha drenado aún de la mayoría de los poros (obviamente el agua no está en forma de meniscos). En ese estado se acepta comúnmente la validez de la extensión del principio de tensiones efectivas del suelo saturado. Sin embargo esta situación se abandona ciertamente pronto y entonces la influencia de la succión (también a efectos de deformabilidad), vendrá muy determinada por la estructura de los granos de suelo y de los meniscos entre ellos.

Blight (1967) a partir del *modelo menisco aislado* justifica la posibilidad teórica de que el parámetro χ (de la ecuación de tensiones efectivas para suelo no saturado de Bishop), adopte valores superiores a la unidad.

Una aplicación muy frecuente de este modelo es como auxiliar en la explicación de los mecanismos de colapso en materiales susceptibles de hacerlo. En este sentido lo utilizan Moore y Millar (1971) a través de la disipación de las tensiones capilares iniciales (σ_w y F_w) al inundar arenas. Utilizan unas formulaciones similares a las del anejo A1 con esferas iguales y tangentes, para evaluar dichas tensiones capilares. De manera algo cuestionable, concluyen que en sus arenas σ_w y F_w son demasiado bajas como para que su disipación explique el colapso, que según ellos debe estar relacionado con una inestabilidad en el contacto debido a un decrecimiento de su resistencia al corte al saturar, disminución de origen no identificado.

Con un tratamiento similar, Arquí (1973) estudia a través de la geometría del menisco la relación entre la succión y una "cohesión aparente" a ella debida. Especifica acertadamente que este modelo sólo es válido para humedades bajas. Sin embargo no tiene en cuenta la importante contribución de la tensión superficial en la interfase aire-agua, al evaluar la fuerza F_w .

Este hecho es también común entre aquellos autores que separan los componentes heterogéneamente repartidos del suelo (aire-agua y sólido) en bloques continuos disjuntos: al no considerar la geometría curva de la interfase desprecian en algunos casos la tensión superficial (como fuerza) que transmite, y en otros casos su capacidad de control sobre la diferencia de presiones entre el aire y el agua (Lambe y Whitman, 1979).

Recientemente, Hansen et al. (1987) han empleado el modelo también como vehículo para evaluar una cohesión aparente debida a succión. Como detalles interesantes cabe destacar que: observan (sólo teóricamente) la posibilidad de que el ángulo de contacto interfase-sólido, θ_c , sea no nulo; tratan el caso de menisco alrededor de un contacto entre sólidos en forma de conos opuestos por el vértice (que aunque curioso tiene algunos rasgos de comportamiento irreales, como es la evolución creciente de F_w y de la cohesión aparente con la humedad); e incluyen la posibilidad

del agua de cavitación, al alcanzar succiones altas.

La validez del "menisco" como modelo de razonamiento cualitativo ha llevado a que sea utilizado de manera puntual en multitud de trabajos, y a que sea recogido en algunos tratados de física del suelo y de flujo en medio poroso. Por ejemplo en Kirkham y Powers (1972) se incluye junto con algunas fórmulas similares a las del anejo A1. En Bear (1972) se presenta el modelo de Collins (1961) que une con meniscos un conjunto de cuatro cilindros sólidos iguales y tangentes dos a dos. Contrariamente a todos los ejemplos anteriores, que son a base de esferas (3D), en este caso el modelo es esencialmente bidimensional. Es algo más sencillo de tratamiento y ostenta relaciones succión-ángulo de contacto similares al caso tridimensional (figura 4.14). Sin embargo al disminuir hacia cero el ángulo θ o el volumen de agua, la fuerza capilar tiende a infinito, aspecto conceptual y prácticamente inconveniente. Por este motivo se considera *fundamental* el enfoque tridimensional del modelo menisco aislado, independientemente de que con posterioridad se integre dentro de un espacio de partículas de suelo capaces de moverse únicamente en un plano.

Algunos autores además de concebir meniscos entre granos esféricos, extienden al modelo al contacto entre sólidos rectangulares, alargados y de dimensiones reducidas, en clara relación con partículas de tipo arcilloso (Di Martino, 1961; Mendoza et al. 1979; Nagaraj y Srinivasa, 1985; Karube, 1983). Esta extensión se considera menos plausible dada la gran importancia que en este rango de dimensiones tendrán las fuerzas de adhesión sólido-líquido y sólido-sólido, que perturbarán la libre formación de la interfase aire-agua y comprometerán el significado y validez de cualquier relación de tipo geométrico-mecánico similar a las de las ecuaciones 4.25, como también señala Pousada (1984).

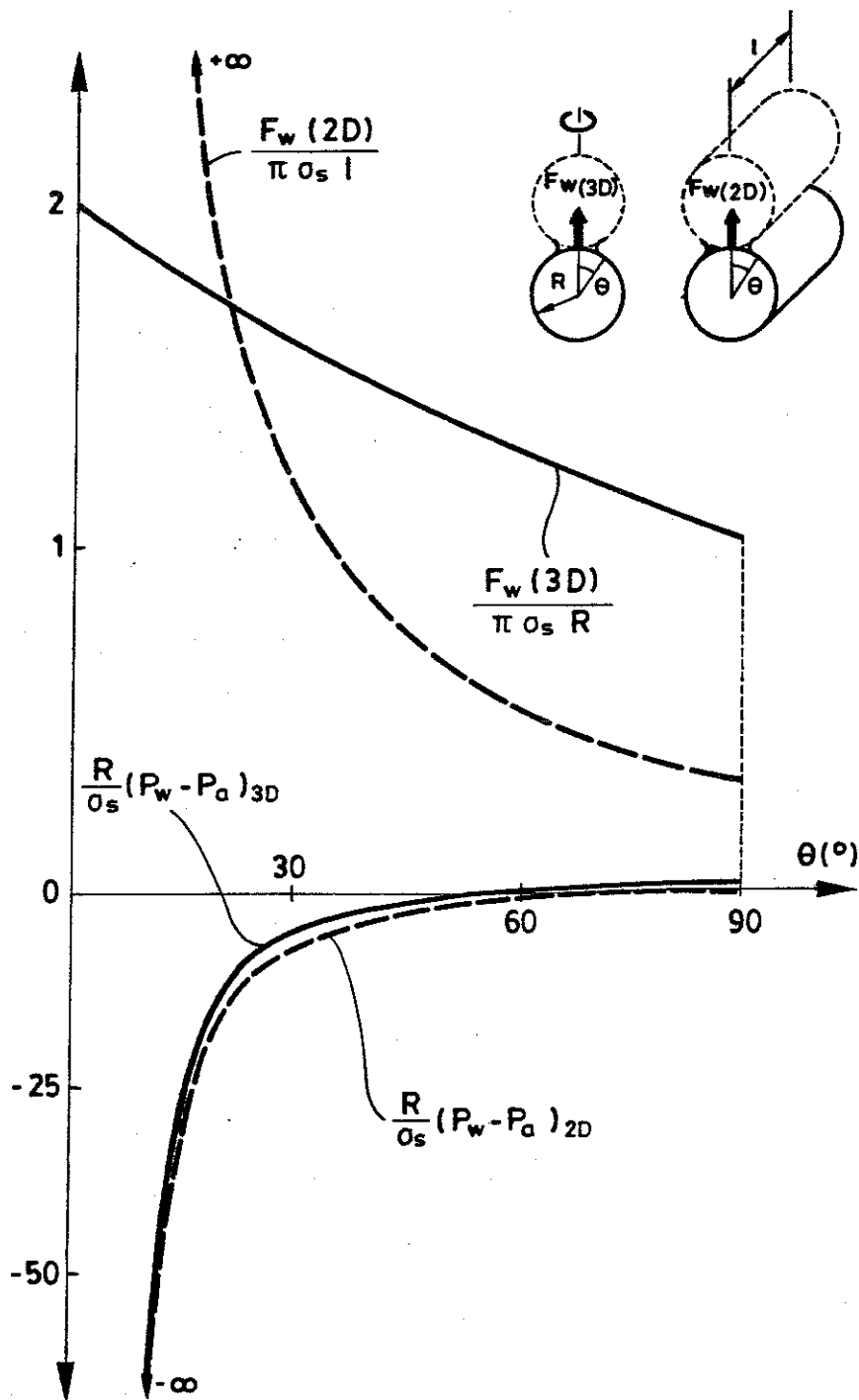


FIGURA 4.14.- Comparación de la succión ($p_a - p_w$) y de la fuerza capilar (F_w) en un menisco "plano" (2D) y "de revolución" (3D).

4.3.6 EL MENISCO GENERALIZADO

Es evidente que en un suelo real de tipo no cohesivo o granular fino, las acciones derivadas de la presencia de meniscos entre las partículas sólidas (F_w) son importantes. Estas pueden ser varios órdenes de magnitud superiores al peso propio de las partículas individuales (ver tabla A1.1 del anejo A1). Siendo así un menisco puede favorecer el contacto entre dos partículas aunque no haya otras fuerzas “de contorno” (acción de las partículas circundantes) que así lo determinen. El efecto de las fuerzas capilares puede abarcar asimismo casos en los cuales las partículas no sean exactamente tangentes

Para investigar estas situaciones y también como paso previo a la elaboración del modelo numérico, se ha juzgado oportuno extender la existencia del menisco toroidal a una geometría “generalizada”, en un desarrollo que se cree completamente *original* de este trabajo. En esta nueva geometría, y debido a la acción de las partículas circundantes o vecinas a dos dadas, éstas pueden separarse de la situación de “contacto estricto” (tangencia entre las esferas, es decir distancia entre ellas, D , nula) y pasar a una situación de cierto alejamiento o de cierto solape (respectivamente: $D > 0$ “cuasi-contacto” y $D < 0$, “sobre-contacto”; figura 4.15 a). En el anejo A2 se presentan las relaciones geométricas y mecánicas para este “menisco generalizado”. Adicionalmente las partículas sólidas esféricas que soportan al menisco pueden ser de radios distintos, pudiéndose tratar también el caso en el cual uno de los cuerpos en contacto es una pared (contacto esfera-plano).

Por aplicación directa de las ecuaciones allí resumidas pueden obtenerse relaciones entre las dimensiones, volúmenes, presiones y fuerzas para el menisco generalizado (similares a las de la ecuación 4.25), como las que a continuación se incluyen en forma de gráficos.

Para el caso en que las dos partículas sean del mismo radio, en la figura 4.15b se presentan los valores de los radios de curvatura principales (en el “ecuador” del

menisco toroidal, en función del ángulo de mojado), para varias distancias D entre las esferas (según nomenclatura del anejo A2 y de la misma figura 5.15a). Como se explica en el anejo A2, las situaciones con D no nulo tienen un valor mínimo de θ por debajo del cual no puede existir menisco según las condiciones concebidas para él. A partir de este valor los radios r_1 y r_2 van creciendo. Normalmente $r_1 > r_2$ (agua en déficit de presión en relación al aire). Como se ha dicho, llega un instante (señalado en la figura con flechas verticales) en el cual $r_1 = r_2$ y dicho déficit se anula, para pasar luego el agua a compresión relativa. Análogamente en la figura 4.15c aparece la variación del volumen del menisco (V) con el ángulo de mojado, para los mismos valores—ejemplo. Su variación es no lineal y creciente desde el θ mínimo. Las diferencias según el valor de α (en cuanto a radios o volúmenes), son pequeñas.

La posibilidad de que se forme un menisco “generalizado” entre dos partículas esféricas no en contacto, sino a una cierta distancia, $D \neq 0$ da una interesante configuración a la gráfica succión—ángulo de mojado. En este caso el valor de α es decisivo. En la figura 4.15d se aprecia que para los casos con D menor o igual que cero ($\alpha \leq 0$), al aumentar la “succión ambiental” el agua del menisco fluirá, por cualquier mecanismo, a otros vecinos o al contorno, disminuyendo su zona mojada, y aumentando su “succión particular o local”, adecuándola progresivamente a la “succión ambiental”, para aguantar el resto del agua. Teóricamente, con volúmenes decrecientes, el menisco retendría la última molécula de agua a una succión infinita. Si la distancia D es positiva ($\alpha > 0$), el comportamiento es distinto, tal como se ha indicado. Suponiendo que se parte de un estado “húmedo”, que D no varía, y que se va reduciendo θ , la succión aumenta hasta un límite (punto de ordenada mínima para las curvas punteadas de la figura). En ese instante si la succión “del terreno” aumenta, el menisco en cuestión no podrá equilibrarse e irá desapareciendo, por pérdida total del agua en flujo hacia meniscos vecinos. Este sería un proceso autoacelerado: al disminuir el volumen, el agua del menisco irá disminuyendo progresivamente de “succión”, pasando incluso a presión de agua positiva relativa a la del gas en los poros, fenómeno que aceleraría aún más su desaparición. Incluso para ciertos valores de D (grandes; por ejemplo $\alpha \simeq 0.31$ si $\gamma = 1$), se puede comprobar que el agua en el menisco siempre estaría a compresión en relación al aire (para cualquier valor de θ). En cuyo caso si se llegara a formar un menisco (u otro menisco preexistente llegara

a ese valor de D por movimiento de las partículas), estaría abocado a desaparecer, fuera cual fuera la succión existente.

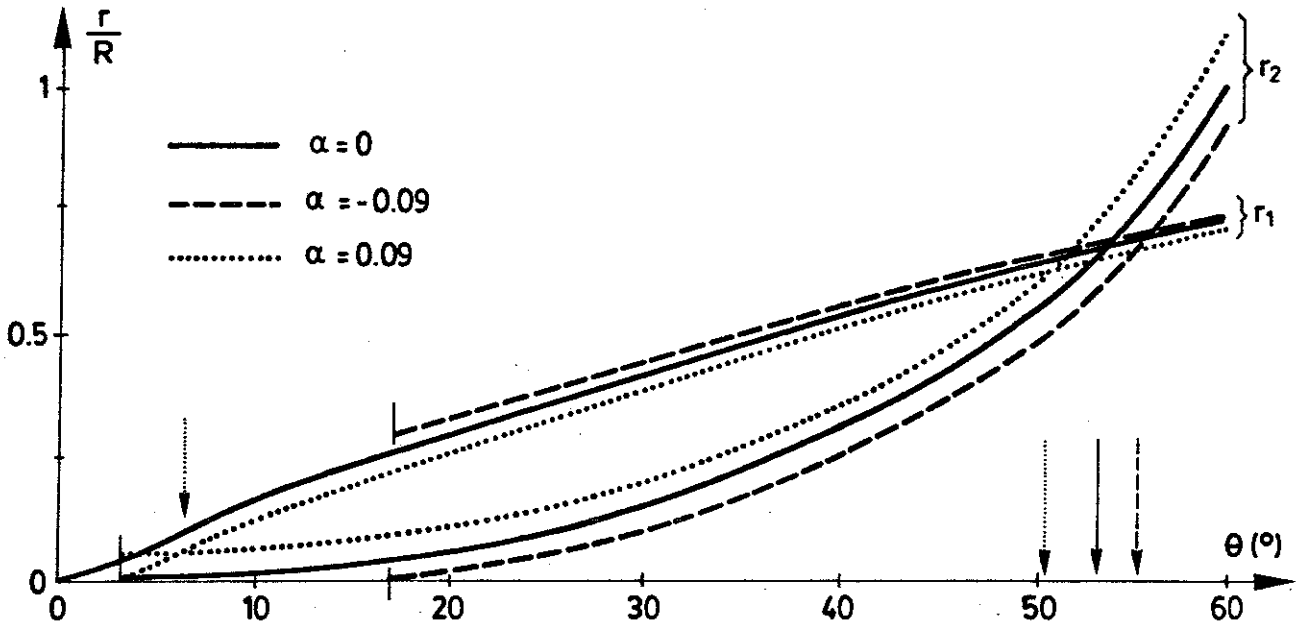


FIGURA 4.15 b.- Radios de curvatura principales del menisco toroidal; caso generalizado. $\gamma = 1$ $\alpha = 0.09, 0, -0.09$
 r_1 : radio de curvatura ecuatorial desde el eje de revolución del menisco.
 r_2 : radio de curvatura ecuatorial exterior.

La fuerza capilar debido al efecto del menisco entre las dos partículas consta también de dos contribuciones: la de las presiones y la de la tensión superficial actuando en el "ecuador" del menisco. En la figura 4.15e se ilustra su variación. Para cualquiera de los valores de D su límite es finito, como ocurría en la figura 4.13. En la figura 4.15f se ve mejor que, dentro del modelo menisco toroidal generalizado que aquí se presenta, la fuerza de capilaridad tiene un valor finito para cualquier valor de la succión. Este hecho es conceptualmente satisfactorio puesto que en caso contrario

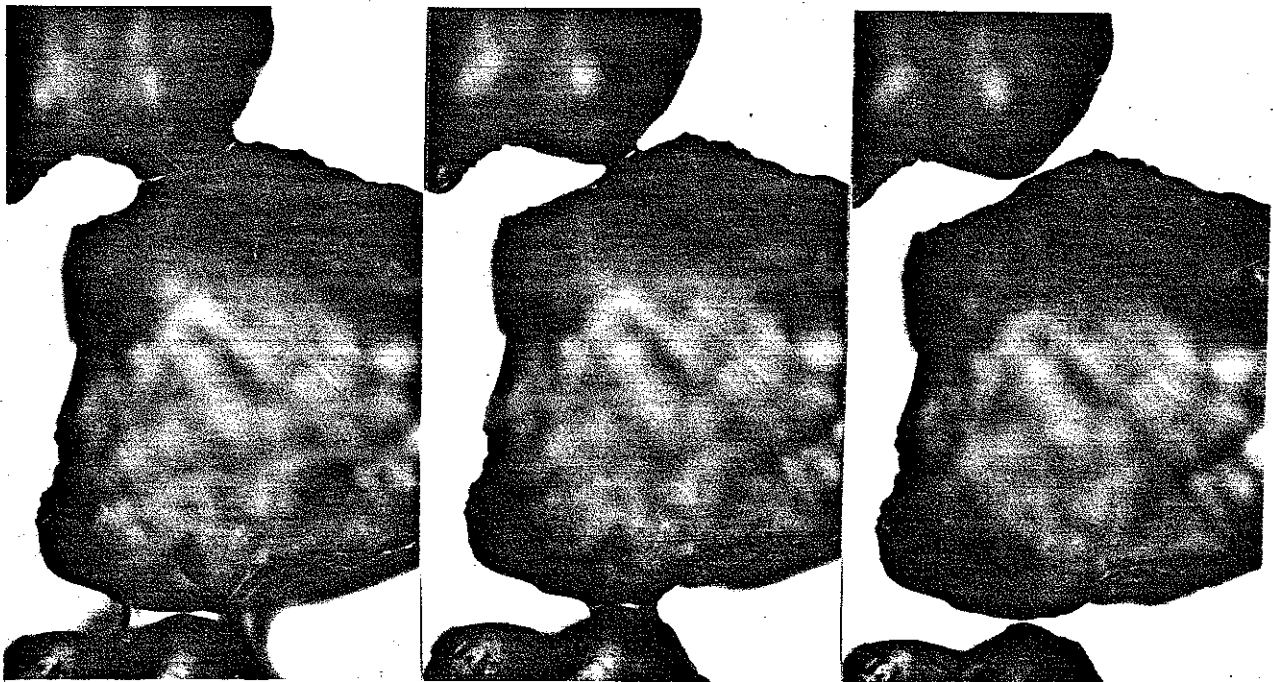
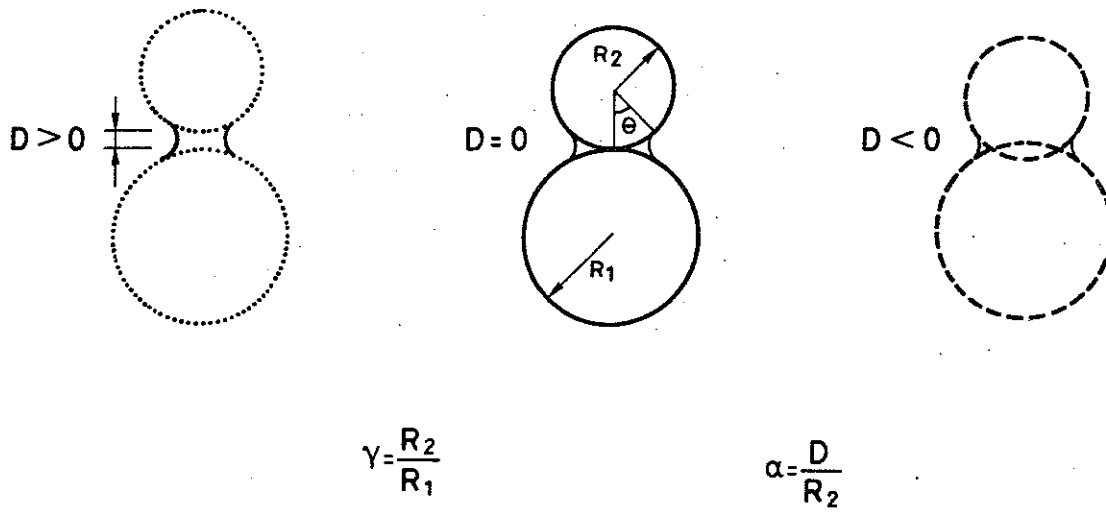


FIGURA 4.15 a.- Menisco toroidal, caso generalizado: "cuasi-contacto", "contacto estricto", y "sobre-contacto", y evolución de la geometría del menisco con el ángulo theta.

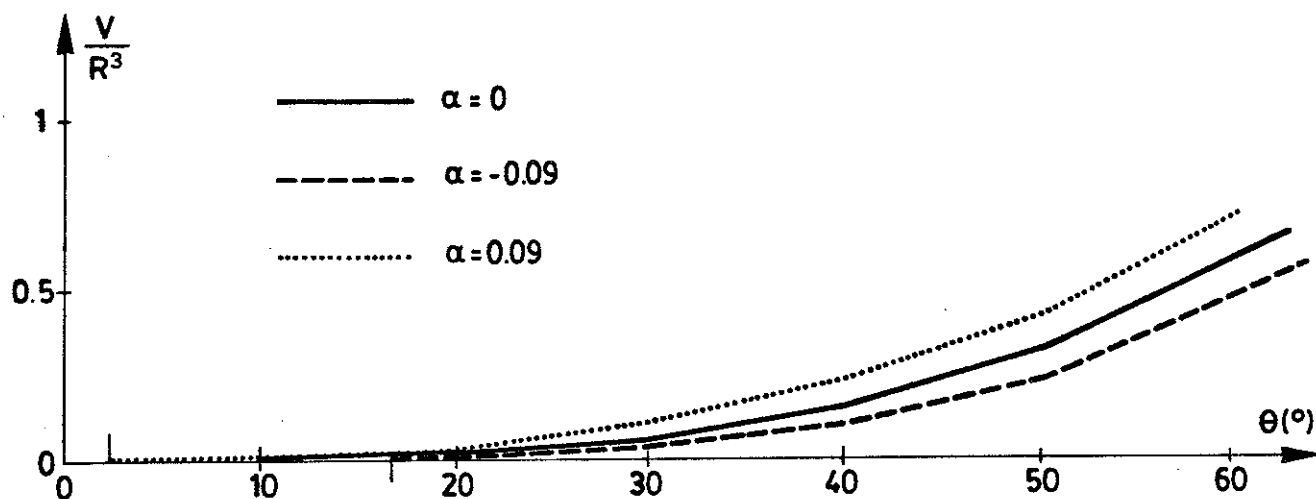


FIGURA 4.15 c.- Volumen del menisco toroidal. Caso generalizado.
 $\gamma = 1$ $\alpha = 0.09, 0, -0.09$

(valores infinitos de la fuerza) indicaría un efecto infinitamente "rigidizador" de la succión, cosa que, tal y como argumentan Alonso y Lloret (1985) y Escario y Saez (1986), no se correspondería con la experiencia práctica (por ejemplo, la curvatura de las envolventes de resistencia para suelos no saturados, según el eje de succiones, como se ha visto en el epígrafe 2.2.5).

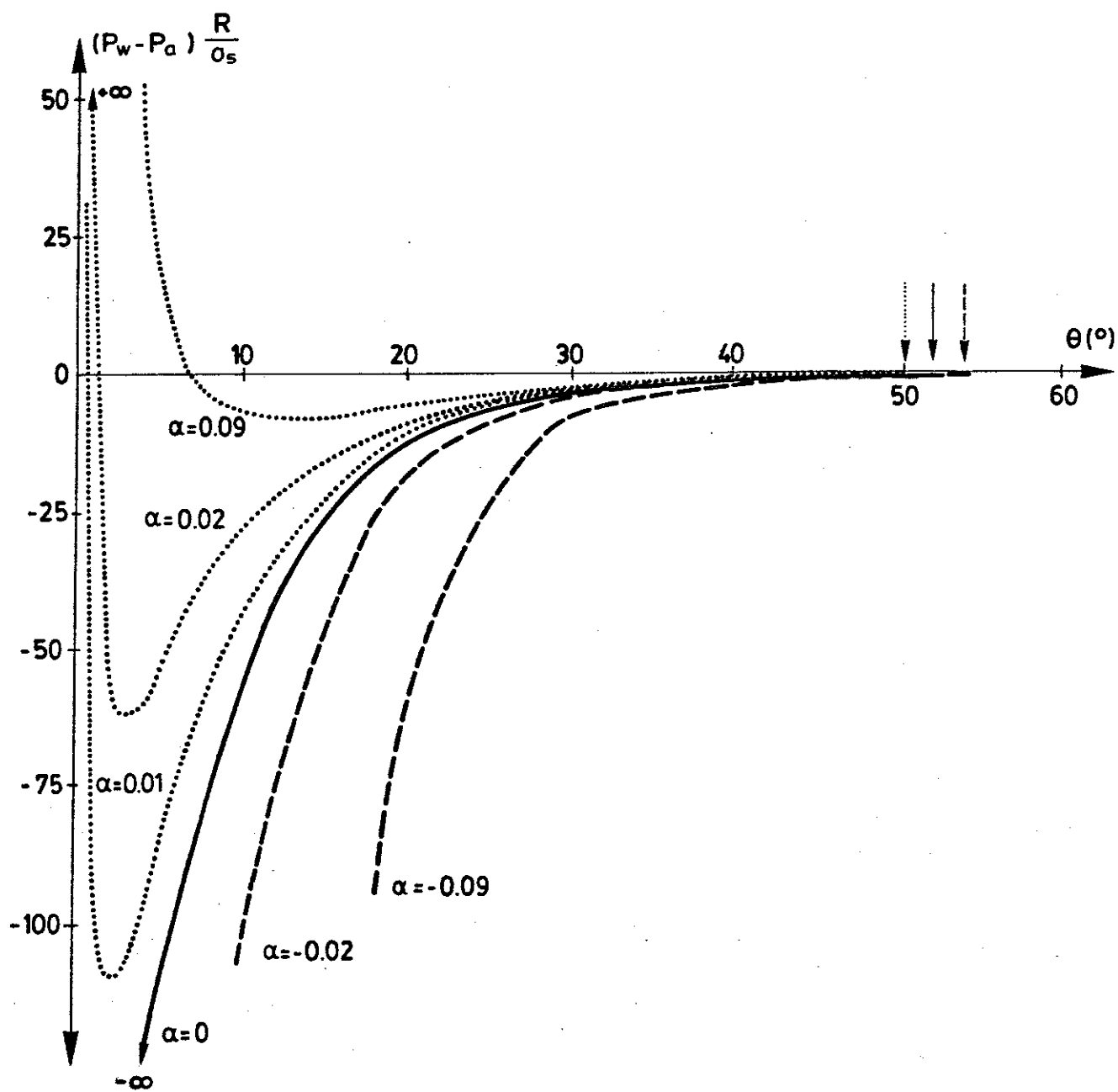


FIGURA 4.15 d.- Succión $(p_a - p_w)$ en un menisco toroidal. Caso generalizado. $\gamma = 1$ $\alpha = 0.09, 0.02, 0.01, 0, -0.02, -0.09$

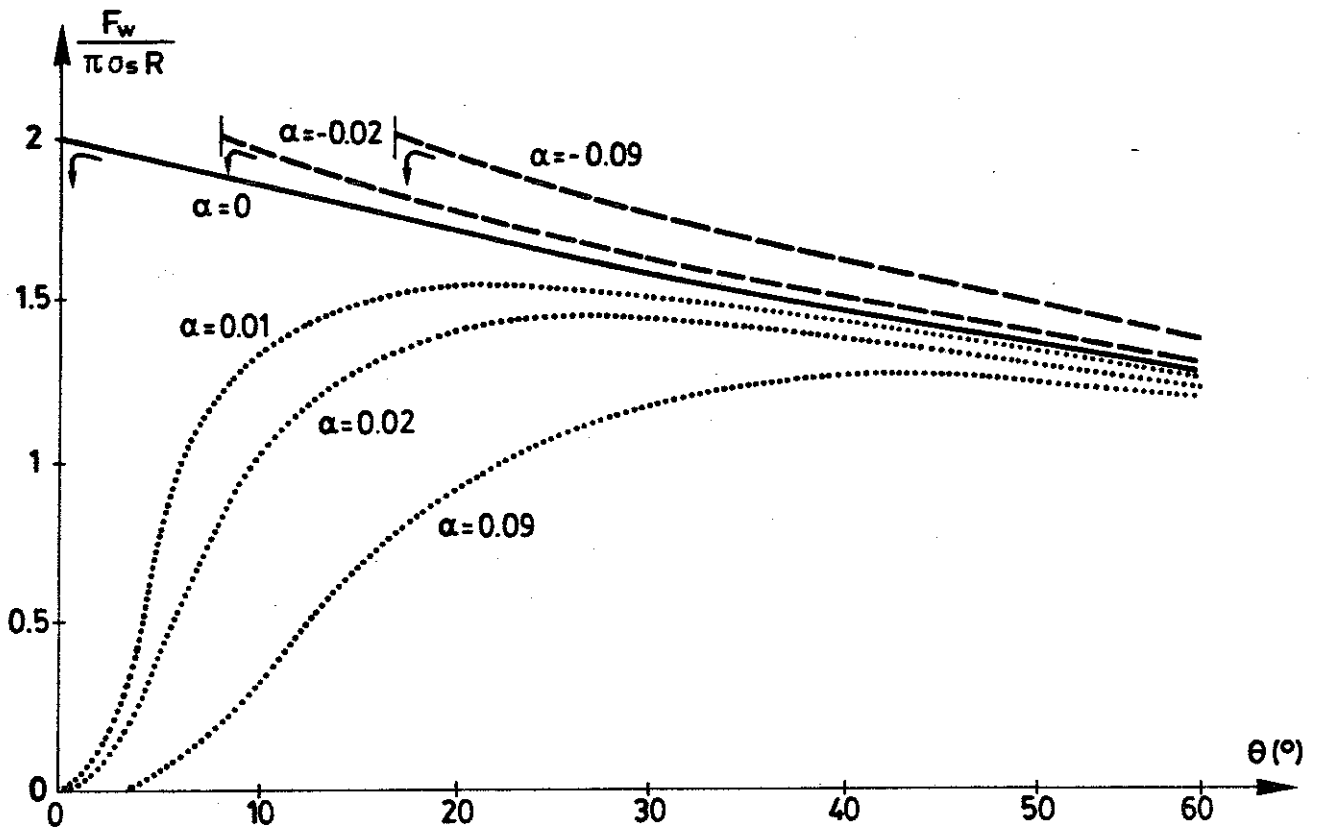


FIGURA 4.15 e.- Fuerza de capilaridad en un menisco toroidal. Caso generalizado. $\gamma = 1$ $\alpha = 0.09, 0.02, 0.01, 0, -0.02, -0.09$

4.3.7 ALGUNAS POSIBLES DESVIACIONES Y LIMITACIONES EN EL MODELO MENISCO AISLADO

Se va a hacer a continuación una breve revisión de posibles desviaciones respecto al modelo menisco toroidal hasta aquí enunciado.

El posible abandono por parte del agua del comportamiento ideal (que se le supone en el menisco aislado) por otros mecanismos (cavitación a determinadas

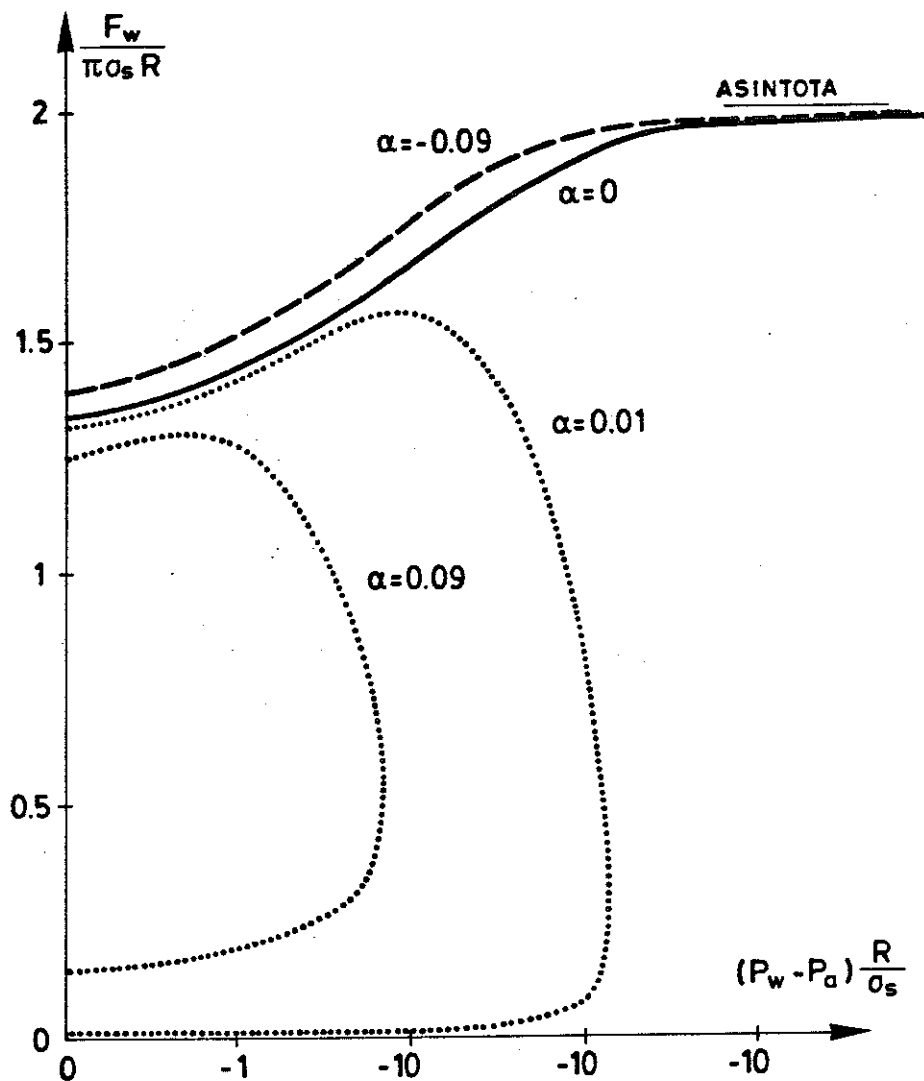


FIGURA 4.15 f.- Variación de la fuerza de capilaridad (F_w) en un menisco toroidal (Caso generalizado) por efecto de la succión, $p_a - p_w$.
 $\gamma = 1$ $\alpha = 0.09, 0.01, 0, -0.09$

succiones, fuerzas de adhesión etc.), puede jugar un papel importante en la evolución de F_w al crecer la succión (extremo que se acaba de comentar en el epígrafe anterior).

En efecto, las fuerzas de adhesión sólido-líquido (interacción entre las moléculas del agua y la superficie de las partículas), pueden alterar el equilibrio supuesto entre las moléculas del líquido "en masa" con sus vecinas y con la interfase (y su diferencia

de presión, dictada por la curvatura). Así dichas fuerzas pueden llegar a modificar ostensiblemente la forma en la cual el agua se disponga alrededor del sólido, y, por ende, modificar todas las relaciones geométrico-mecánicas tratadas hasta aquí.

Gardner (1960) opina que las fuerzas de adhesión empiezan a ser notables (en el modelo capilar aplicado a la mayoría de suelos) para succiones cercanas a 1 bar, por término medio. El papel real de las fuerzas de adhesión dependerá muchísimo del tipo de mineral constituyente de la superficie de las partículas (generalmente cargadas negativamente), de las sales disueltas en el agua, y de la "escala" relativa (dimensiones del menisco frente al rango de acción medio de las mencionadas fuerzas): si la mayor parte del menisco puede considerarse fuera del radio de acción de las fuerzas de adhesión, su influencia será pequeña; y viceversa.

En casos intermedios su influencia será parcial. A título de ejemplo se ha determinado numéricamente la disposición aproximada de la interfase aire-agua suponiendo la existencia de fuerzas de adhesión. Esto se ha llevado a cabo en un caso particular: Dos esferas iguales, de radio 0.002 cm, tangentes; presión del agua libre del menisco relativa a la del aire igual a $-0.5 Kp/cm^2$ (es decir similar a las condiciones del menisco *b* de la figura 4.12). El cálculo del "arco de interfase con adhesión" se ha hecho bajo ciertas simplificaciones:

- Se ha supuesto una película de agua adherida a toda la superficie de las esferas, de espesor δ_0 relacionado con la succión a través de una hipérbola de sexto grado (Kovacs, 1981; expresión que puede hallarse en el epígrafe 3.2.1, o en la figura A1.4 del Anejo A1).
- El arco de interfase es tangente a esa película y con curvatura media (H) nula en ese punto (es como suponer que en dicho punto todo el déficit de presión de agua ($0.5 Kp/cm^2$) está asociado a las fuerzas de adhesión que retienen a la película δ_0 de agua, y no a la curvatura de la interfase).
- A medida que el arco se va separando de la película, la contribución de las fuerzas de adhesión al déficit de presión de agua va disminuyendo (de acuerdo a la misma hipérbola de sexto grado), y en consecuencia la interfase va aumentando su curvatura para cubrir el resto hasta los $0.5 Kp/cm^2$.

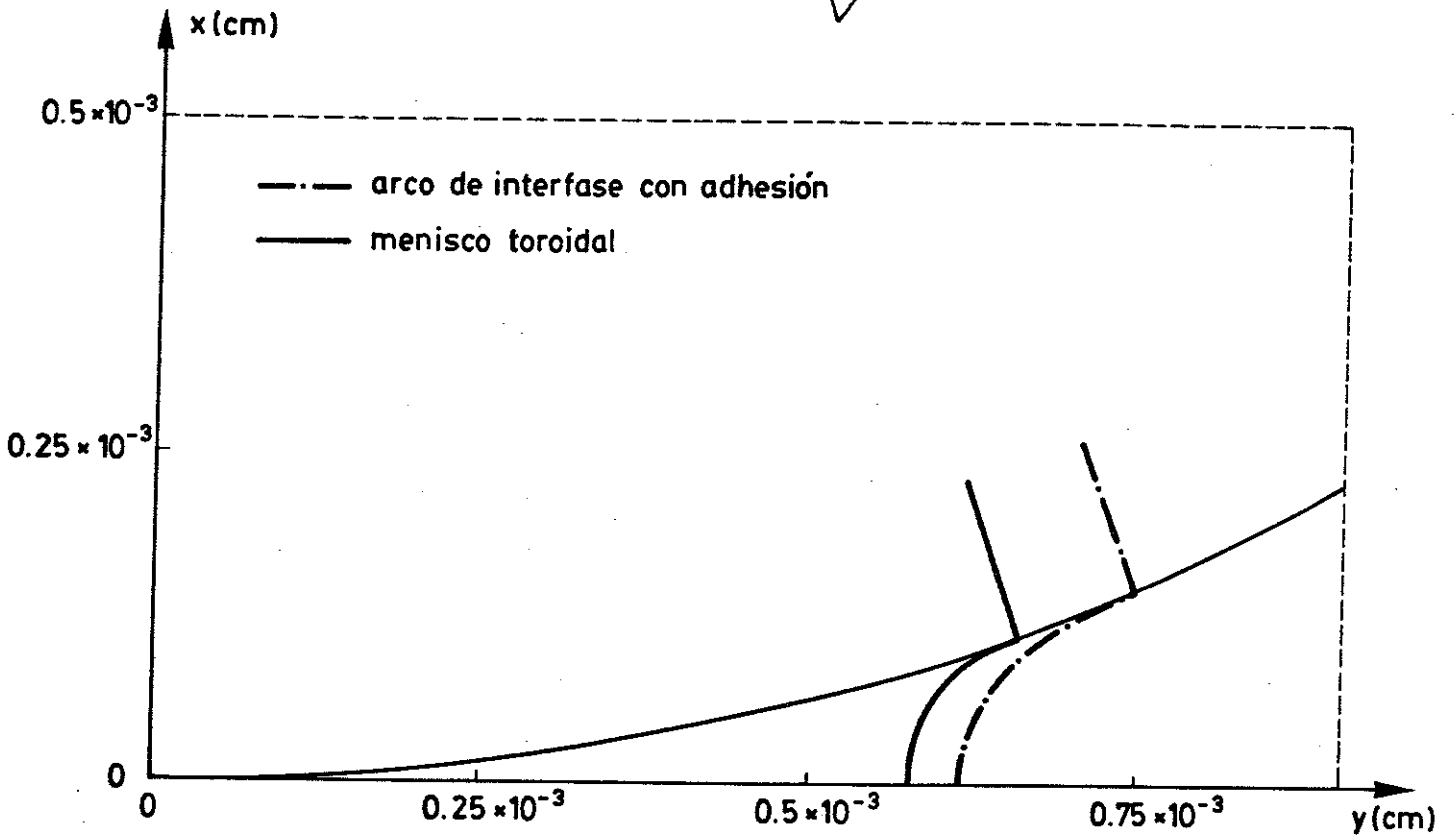
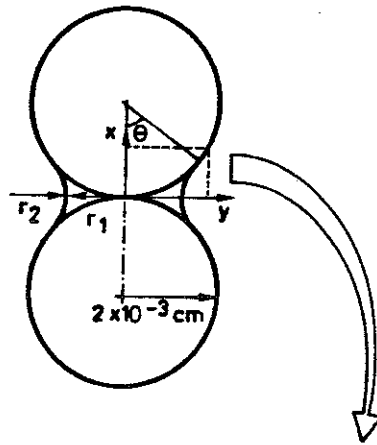
- El radio de curvatura "interior", r_1 , permanece constante e igual al del menisco toroidal de succión 0.5 Kp/cm^2 , ajustándose el radio de curvatura "exterior", r_2 , a los cambios de curvatura mencionados y dando en definitiva forma al "arco de interfase con adhesión".

En estas condiciones se comprueba que a nivel del "ecuador" las fuerzas de adhesión prácticamente no contribuyen y la curvatura del "arco de interfase con adhesión" es allí casi igual que la del menisco toroidal (sin adhesión). La situación relativa de ambos aparece reflejada en la figura 4.16. La diferencia de geometría se traduce en un volumen de agua mayor (35%) y una dimensión ecuatorial mayor (6%). Esta última diferencia se traducirá en mayor fuerza capilar o "de sobrecontacto" entre las esferas (10%), al ser mayor la sección ecuatorial en la cual actuarán los 0.5 Kp/cm^2 , y también el perímetro en el cual actuará la tensión superficial, σ_s . Un menisco toroidal que tuviera el mismo volumen que el "arco con adhesión" tendría una succión (ecuatorial) de 0.4 Kp/cm^2 .

Este conjunto de diferencias puede ser de alguna manera una cota superior de la influencia de la adhesión para ese tamaño de partículas y para esa succión, dado que, como se ha contrastado (ver 3.2.1), la hipérbola de sexto orden de Kovacs tiende a sobreestimar ampliamente el rango de influencia de las fuerzas de adhesión.

El mecanismo perfilado en el párrafo anterior (fuerzas de adhesión) junto con la posibilidad de que el agua del menisco *cavite* a partir de determinadas succiones (del orden también de 1 atmósfera), son fenómenos muy interrelacionados, como se ha visto en el epígrafe 2.3.3. Para no limitar por ambos motivos la validez del modelo, se decidió en primera fase, trabajar con succiones del orden de 0.9 Kp/cm^2 como máximo.

Las relaciones geométrico-mecánicas deducidas para el menisco toroidal también pueden verse alteradas por *desviaciones de la geometría real* de las partículas del suelo, en relación con la geometría altamente simplificada que se les ha supuesto en el presente modelo menisco aislado (granos esféricos). Como se ha visto, en el modelo menisco generalizado puede considerarse una de las superficies en contacto como *plana*; y en otros modelos se consideran en casos aislados partículas en forma



	ARCO	TORO
$P_w - P_a$ (Kp/cm ²)	-0,5	-0,5
x_1 (cm)	$6,17 \times 10^{-4}$	$5,79 \times 10^{-4}$
x_2 (cm)	$1,19 \times 10^{-4}$	$1,18 \times 10^{-4}$
θ mojado (°)	22	19,23
Volumen menisco (cm ³)	$1,35 \times 10^{-10}$	1×10^{-10}
Fuerza de sobrecontacto ^H (Kp)	$8,86 \times 10^{-7}$	$7,96 \times 10^{-7}$

FIGURA 4.16 .- Solución numérica para la disposición aproximada de la interfase aire-agua, suponiendo la existencia de determinadas fuerzas de adhesión.

cónica o en forma rectangular. Sin embargo difícilmente se podrán englobar en detalle la variedad infinita de posibilidades concretas de contacto entre partículas de formas diversas. En la figura 4.17 se presenta, a título de ejemplo alternativo, un menisco que se ha detectado entre dos "caras" de dos partículas vecinas. En este caso el tipo de control que ejerce la geometría sobre la succión y el volumen de agua es distinto, como también lo es la fuerza capilar, F_w , resultante. Efectivamente, la contribución debida al déficit de presión de agua se integra en una superficie mayor (rendija entre las caras, de ancho medio b). En la figura 4.17c se compara con los correspondientes valores de la fuerza capilar para el menisco toroidal alrededor de un contacto esférico "perfecto o ideal" (ancho b nulo y sin agua). Al irse reduciendo θ y tender a θ_{lim} , la succión crece y la fuerza también. Al llegar a ese valor, la geometría queda controlada por la rendija al introducirse el menisco en ella, tangente a sus bordes. La fuerza disminuirá rápidamente. Por poco que aumente la succión, el agua se recluirá alrededor de los contactos físicos reales (3 ó 4 puntos), siguiendo a partir de entonces pautas de comportamiento ya más similares a las del modelo de menisco toroidal alrededor de un contacto esférico.

Para finalizar con esta breve revisión de *desviaciones* respecto al modelo menisco toroidal aislado alrededor de un contacto entre partículas se puede ilustrar la influencia de la *gravedad* sobre la presión del agua del menisco y sobre la forma de la interfase.

En las figuras 4.5 y 4.6 se tenía debidamente en cuenta el gradiente de presiones con la cota (introducido por la gravedad) para estudiar la ascensión de un líquido en las inmediaciones de una o dos superficies sólidas. De manera similar, y a título de ejemplo nuevamente, en la figura 4.18 se compara la forma de la *interfase de curvatura variable* (para absorber el mencionado gradiente de presiones), y una *interfase de curvatura constante* (arco de circunferencia). En este ejemplo se han usado las ecuaciones incluídas en la figura 4.5a, asumiendo $r_2 = \infty$ y trabajando por tanto en dos dimensiones. Por ello, los sólidos de la figura 4.18 son dos cilindros, bastando, a efectos de comparación, para ver que, incluso a esa escala, las diferencias de cualquier tipo serán suficientemente pequeñas frente a otra suerte de simplificaciones ya incluídas dentro del modelo menisco aislado toroidal como para tenerlas en cuenta.

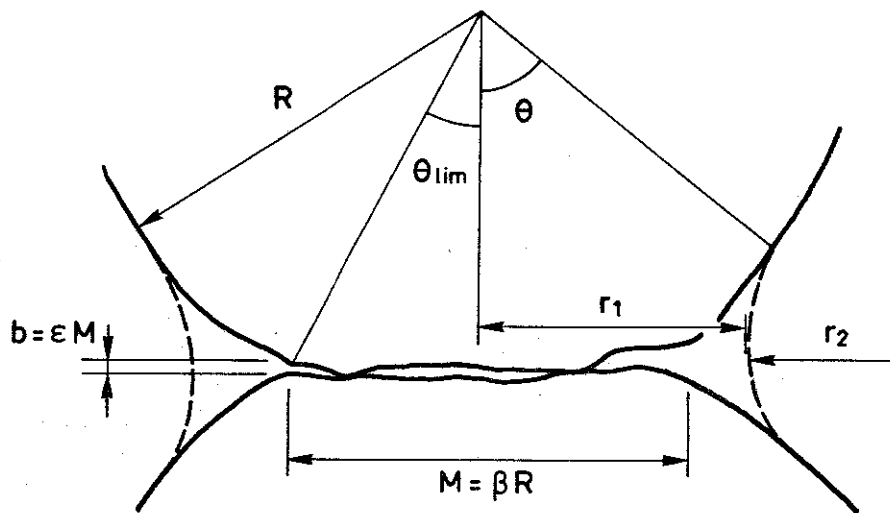


FIGURA 4.17 .- Menisco alrededor de un contacto cara-cara entre partículas.

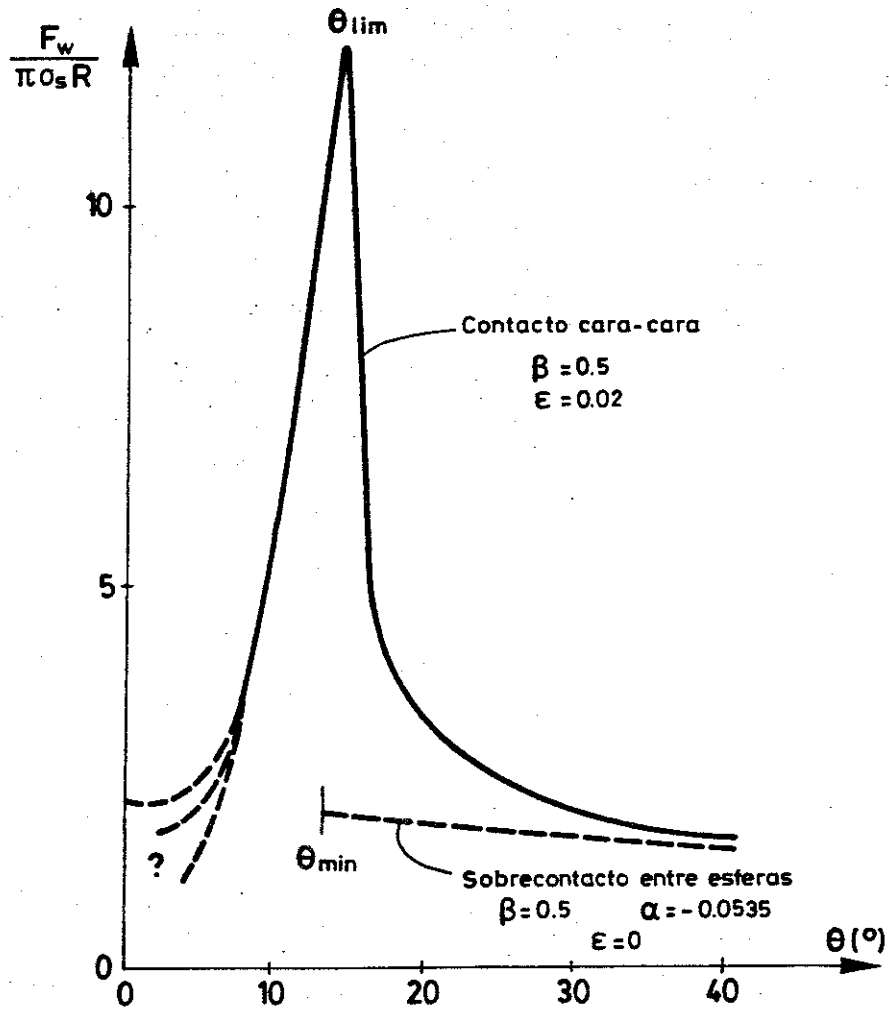


FIGURA 4.17 (Cont.) .- Menisco alrededor de un contacto cara-cara entre partículas.

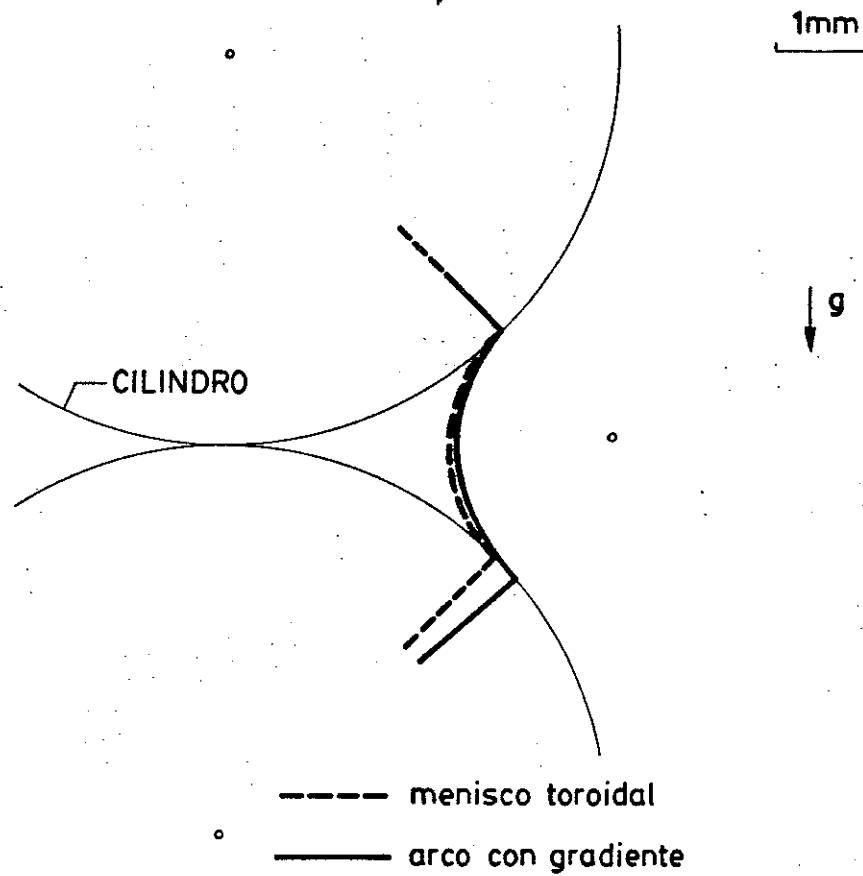


FIGURA 4.18 .- Disposición de la interfase aire agua entre dos cilindros observando la existencia del gradiente de presiones de agua inducido por la gravedad.

4.4 NOTA FINAL

Por todo lo expuesto en el presente capítulo, queda establecido un modelo de menisco aislado (toroidal) que se forma alrededor del contacto (generalizado a los casos de “sobre-contacto” y “cuasi-contacto”) entre partículas, y que cumple de

manera aproximada los principios de conformación de la interfase.

Este modelo sirve para explicitar, conceptual y cuantitativamente, el control que la geometría del suelo (poros y partículas sólidas) ejerce sobre las variables asociadas (succión, fuerza capilar, etc.). Para ello se ha usado la ecuación de Laplace (que gobierna los valores de la succión en función de la curvatura de la interfase), pero siempre utilizando radios de curvatura compatibles en cada instante con la geometría local y con el volumen total del menisco. En un instante determinado, debido a movimiento entre partículas, la "succión local" en un menisco podrá diferir sustancialmente de las condiciones de contorno o ambientales de succión, y ello dará lugar a flujos posteriores para conseguir el equilibrio (capítulo 3).

Por otro lado se ha llevado a cabo un "análisis de sensibilidad" sobre algunas de las hipótesis del menisco aislado, que ha puesto en evidencia la existencia de una serie de desviaciones que no conviene ignorar.

La relación entre la succión y su efecto mecánico depende manifiestamente de la microestructura detallada del suelo. Esta dependencia hace poco adecuado introducir, como se ha hecho frecuentemente, relaciones succión-geometría media (basadas en la ecuación de Laplace) directamente en las formulaciones de la tensión efectiva media o de la compresibilidad (Schuurman, 1966); o introducir relaciones presión de vapor-geometría media (basadas en la ecuación de Kelvin) para modelar el flujo de vapor. Como dice Fredlund (1976) si se introduce en las ecuaciones constitutivas un "radio de curvatura efectivo" o un "radio medio equivalente" (como el usado por Gardner, 1960, por ejemplo), a la par de introducir una nueva ecuación se introduce una nueva variable, macroscópicamente inmedible, perdiendo por lo tanto utilidad. La única manera de utilizar debidamente estas ecuaciones será a través de formulaciones "particulares" a base de sólidos disjuntos, conociendo en cada momento la geometría concreta entre ellos, y observando su control sobre las variables mecánicas asociadas.

Este es en definitiva el planteamiento utilizado en esta tesis.

CAPITULO 5

DESCRIPCION DE LA ORGANIZACION GEOMETRICA Y NUMERICA ADOPTADA

El modelo conceptual de suelo granular enunciado en el capítulo 3, se implementa en el presente capítulo como modelo numérico basado en un conjunto de programas de ordenador. La parte mecánica del modelo está fundamentada en el "Distinct Element Method" del que ya se ha hablado en el capítulo 2. En el apartado 5.1 se discute por qué se ha escogido un método explícito para la resolución del problema mecánico y de flujo en el seno del suelo no saturado discontinuo.

El primer paso para concretar el modelo conceptual debe ser la definición de la geometría que se considera para los tres entes principales del modelo: partículas, meniscos (según lo descrito en el capítulo 4) y poros. Esta definición se lleva a cabo en el apartado 5.2. En él también se describen los criterios de generación aleatoria de conjuntos de partículas. Este estado inicial es el paso previo a su "ensayo" numérico en condiciones generales de flujo y deformación, que se lleva a cabo con el esquema organizativo que se trata en el apartado 5.3.



5.1 VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LOS METODOS EXPLICITOS

La deformación del suelo bajo variaciones de sollicitación exterior, y los flujos de fluídos inducidos en él por variación de las condiciones de contorno, son básicamente problemas no estacionarios. En algunas ocasiones el estado final puede ser de equilibrio (por ejemplo una carga isotrópica) pero como ya se ha comentado en capítulos anteriores si el modelo de suelo es discontinuo no es suficiente plantear el equilibrio final sino que será necesario seguir toda la etapa no estacionaria de deformación como único medio para llegar a él. Lo mismo ocurre con el problema de los flujos, que estará acoplado con la deformación mecánica del esqueleto.

Un esquema implícito de progresión en el tiempo, necesariamente a base de incrementos, planteará de forma global los cambios de posición o de masa que se registren en un determinado intervalo de tiempo, relacionando simultáneamente entre sí todos los que tengan lugar en cualquier punto del modelo. Como consecuencia se deberá resolver un sistema de ecuaciones para cada incremento de tiempo.

En esquema explícito pondrá los cambios de posición o de masa en un determinado punto del modelo en función sólo del "desequilibrio" o del "gradiente" locales que exista allí, pudiéndose hallar inmediatamente el desplazamiento o la masa fluída para un incremento de tiempo.

El esquema explícito se beneficia en general de la sencillez conceptual y de implementación al no tener que resolver ningún sistema de ecuaciones, especialmente si las ecuaciones a discretizar son complejas. Necesita menor espacio de memoria, especialmente si la dimensión del problema es elevada. Sin embargo es imprescindible el empleo de intervalos de tiempo relativamente pequeños para que no se produzcan errores apreciables en la solución obtenida, puesto que la hipótesis básica es que la variación de "gradientes" es suficientemente pequeña en un intervalo y esto será menos cierto cuanto mayor sea Δt . Se comprende que puede llegar un momento en que este

error sea inadmisible, para un Δt mayor que un cierto límite. Este límite será la condición de convergencia del método. Por otra parte se requiere que los errores que se produzcan no sean acumulativos, es decir que el método sea estable. En los métodos explícitos la condición de convergencia es igual a la de estabilidad. Sin embargo dentro de las soluciones estables y convergentes a la solución final puede darse el caso de que un esquema no se ajuste temporalmente a la solución "exacta" (ver figura 5.1). Pruebas con diversos Δt decrecientes permitirán seleccionar el adecuado.

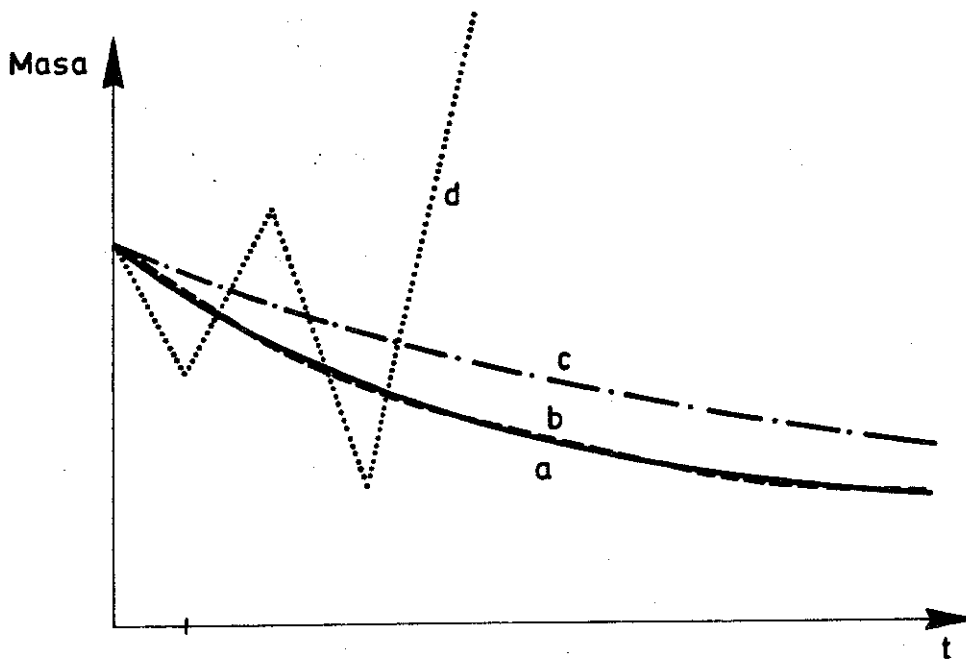


FIGURA 5.1 .- Ajuste de un esquema numérico a la solución temporal de un problema, en función del incremento de tiempo usado:
a: Solución "exacta"
b: Solución estable y convergente a la solución "exacta"
c: Solución estable y no ajustada temporalmente
d: "Solución" inestable.

La necesidad de utilizar Δt relativamente pequeños hace en muchos casos antieconómica la aplicación de los métodos explícitos frente a los implícitos. Sin

embargo en algunos casos puede resultar ventajoso el empleo del primer grupo de métodos: en efecto, cuando el comportamiento es muy no estacionario (y muy no-lineal) y se desea un ajuste temporal, incluso un método implícito deberá avanzar en el tiempo a base de incrementos pequeños. Esta no-linealidad podrá venir provocada por una no-linealidad "constitutiva" del medio material, o por no-linealidades geométricas. Estas últimas aparecen en análisis de estados límite y en problemas con grandes deformaciones. La no-linealidad geométrica es un fenómeno notable en los modelos discontinuos a base de partículas (tipo D.E.M.). La ley fuerza-desplazamiento que rige el comportamiento de los contactos puede ser incluso lineal pero el movimiento del conjunto de partículas conlleva la creación y destrucción continua de contactos, o la aparición de deslizamiento tangencial en contactos ya existentes. Esto obliga a utilizar incrementos de tiempo pequeños incluso con métodos implícitos. En efecto la variación del número de contactos o del comportamiento de algunos de ellos implica la reformulación de la "matriz de rigidez" del sistema (Rodríguez Ortiz, 1974).

Problemas parecidos limitan la validez de otros planteamientos discontinuos (por ejemplo Krawietz, 1982).

Consecuencia directa de diversos tipos de no-linealidad es la utilización creciente de métodos total o parcialmente explícitos y de otros de relajación: En elementos finitos en general (Zienkiewicz y Löhner, 1985); aplicados a flujos no estacionarios en aguas someras (Peraire et al., 1986); etc. En el epígrafe 2.4.3 se han citado otros ejemplos de cálculos explícitos (Dinámica Molecular, Método de las partículas). Su empleo, en ocasiones, se ha hecho posible gracias a la creciente velocidad de cálculo de los ordenadores.

Para ilustrar la conveniencia de usar métodos explícitos en problemas muy no lineales se presenta a continuación una comparación sobre un caso ideal, de configuración muy parecida a la parte de flujos del modelo numérico. Se trata de una malla cuadrada de $N \times N$ nodos (ver figura 5.2). Cada nodo tiene cierta "masa" (M_i) a determinada "presión" (p_i), estando ambas relacionadas ($p_i = f_i(M_i)$).

Las condiciones iniciales son de "masa" igual a 4 unidades en los nodos impares

y de cero unidades en los pares.

Entre dos nodos vecinos (i,j) la cantidad de “masa” fluída por unidad de tiempo debido a la diferencia de “presión” será (en función de una determinada “permeabilidad” K_{ij}):

$$\frac{dM_{ij}}{dt} = K_{ij} (p_j - p_i) \quad (5.1a)$$

La resolución explícita “de punto” significa aplicar la ecuación anterior sucesivamente a todos los conductos $i - j$ de la malla en función de las presiones actuales de los nodos que conecta, hallándose la “masa”, ΔM_{ij} , que fluye en un Δt :

$$\Delta M_{ij} = K_{ij} (p_j - p_i) \Delta t \quad (5.1b)$$

Para mejorar la estabilidad del método se ha utilizado una técnica de “flujo exponencial”, “actualización inmediata” e “inicio aleatorio” de los flujos, que se detallarán en el apartado 5.3.1.

Al fluir una determinada “masa” de un nodo a otro, la “presión” variará con el tiempo, siendo menor el gradiente al final de un determinado Δt que al principio. El esquema implícito supone que la masa fluída por un conducto puede ponerse en función de un gradiente intermedio (ponderado con α) entre el inicial y el final, de manera que en un incremento de tiempo, y suponiendo que las “permeabilidades” no varían en él:

$$M_{i,t+\Delta t} = M_{i,t} + \sum_j \Delta t K_{ij} \left[(1 - \alpha) (f_j(M_{j,t}) - f_i(M_{i,t})) + \alpha (f_j(M_{j,t+\Delta t}) - f_i(M_{i,t+\Delta t})) \right] \quad (5.2)$$

La anterior expresión es un sistema de tantas ecuaciones como nodos. Su matriz es relativamente “vacía”, por lo que se ha usado la técnica de almacenamiento “skyline” (“column profile”) en un vector unidimensional que ahorra mucha memoria.

El sistema se resuelve luego por el método avanzado de Cholesky, descomponiendo la matriz en un producto de tres y resolviendo las incógnitas mediante las adecuadas sustituciones hacia atrás y hacia adelante.

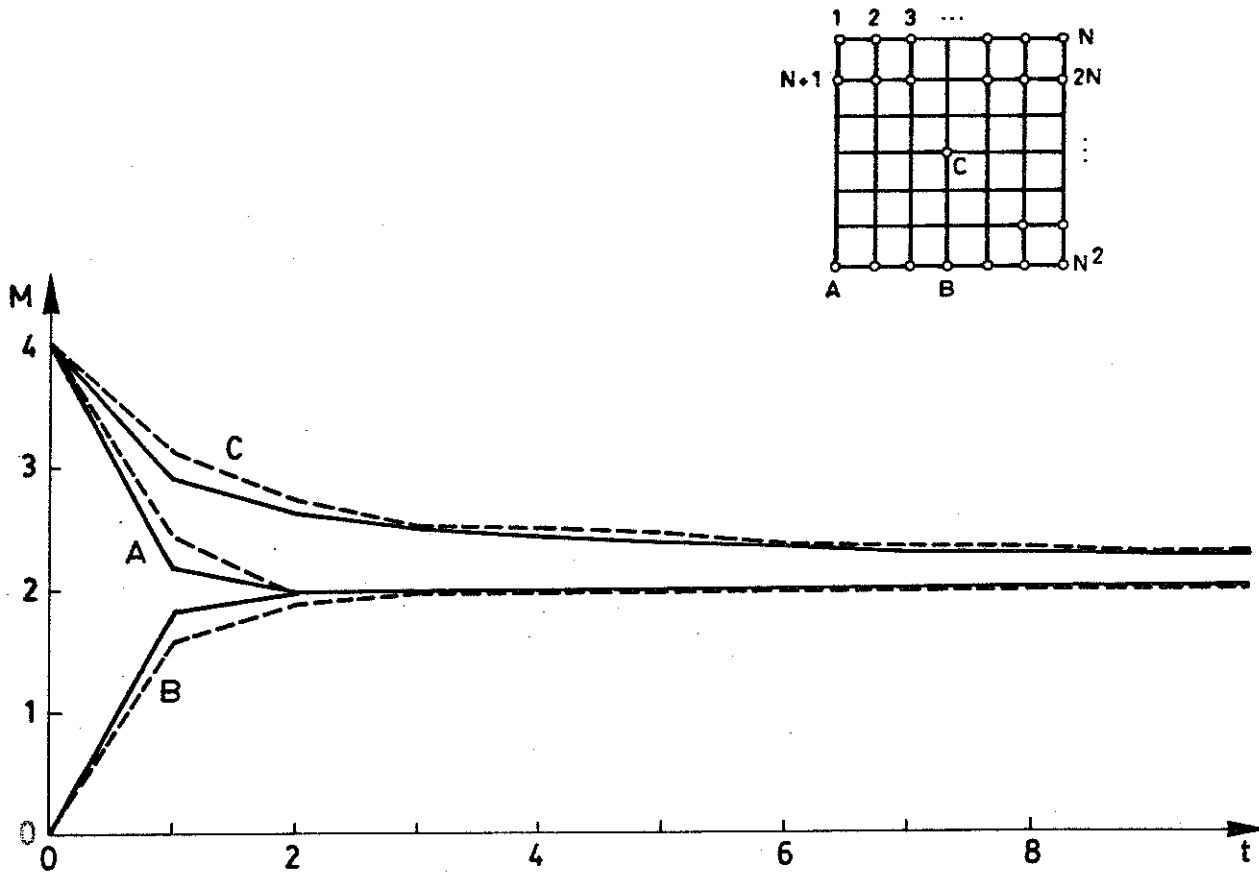


FIGURA 5.2 .- Evolución de las masas en tres nodos de una malla $N \times N$ para un esquema explícito (trazos) y uno implícito (continuo). Ejemplo con $N=90$.

Tras una serie de tanteos, el valor de ponderación α en la ecuación 5.2 se tomó igual a 0.6. Se consideró que la función f que relaciona las masas y las presiones era en cualquier instante $p_i = M_i$ y que las permeabilidades K_{ij} eran iguales a la unidad para todos los conductos y todos los tiempos.

Como se trata de un problema no estacionario se ha escogido un Δt pequeño, igual a la unidad. Además puede suponerse que determinada no-linealidad geométrica obliga también a ello. Dicha no-linealidad no ha sido tomada directamente en cuenta en este sencillo planteamiento, pero podría corresponder a la rotura o

interrupción de determinados conductos, o incluso a la desaparición de algunos nodos. El ejemplo se ha llevado hasta $t = 10$. Los dos esquemas numéricos han sido aplicados a mallas de 3, 10, 50 y 90 nodos de lado (9, 100, 2500 y 8100 nodos totales). En la figura 5.2 se presenta la evolución de las masas en tres nodos en función del tiempo.

En la figura 5.3 se comparan las necesidades de memoria y de tiempo de Unidad Central de Proceso (C.P.U.) de un ordenador VAX-8600. Cuando la malla es de dimensión grande el método implícito se ve penado por el hecho de tener que resolver repetidamente un gran sistema de ecuaciones, a pesar de hacerlo por un método eficiente. Para $N \times N$ grandes, el requerimiento de tiempo de cálculo aumenta casi linealmente con el número total de nodos para el método explícito, mientras que para el implícito aumenta con el cuadrado de dicho número total.

A la vista de la figura 5.2 puede pensarse que el método explícito no se ajusta tan bien a la "solución exacta" como el implícito. Reduciendo el Δt a 0.1 ó 0.2 el explícito mejora su "ajuste temporal" a la solución, requiriendo aún de 10 a 20 veces menos tiempo de CPU y menos de la mitad de memoria que el implícito.

Adicionalmente el listado del programa explícito es más reducido, más fácil de redactar y admite modificaciones sencillamente.

Con lo dicho anteriormente y el ejemplo presentado se ha intentado justificar el empleo de los esquemas explícitos sencillos ("de punto") para situaciones no estacionarias y constitutiva o geoméricamente muy no-lineales.

Tanto en su aspecto mecánico como en el de flujo tal es el caso del modelo discontinuo que se implementa.

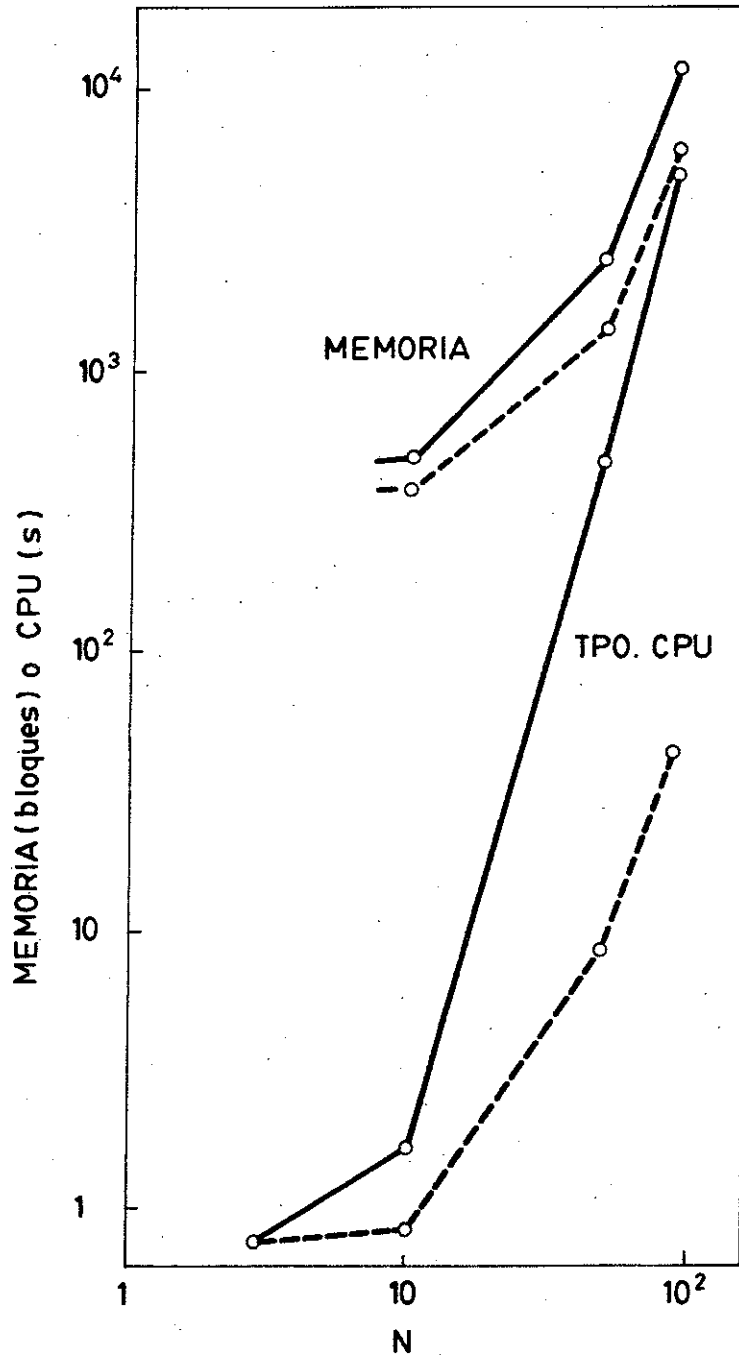


FIGURA 5.3.- Comparación de requerimientos de memoria (en "bloques"=0.5 Kbytes) y de tiempo de C.P.U. (en segundos) para un esquema explícito (trazos) y uno implícito (continuo), resolviendo un ejemplo de "flujo" en una malla de $N \times N$. $\Delta t = 1$, $t_{final} = 10$.

5.2 ORGANIZACION GEOMETRICA ADOPTADA

En este apartado se define la disposición relativa de las partículas, meniscos y poros en el modelo numérico.

Como ya se ha ido perfilando en anteriores capítulos, las partículas sólidas quedan representadas por esferas altamente indeformables, de varios tamaños (ver figura 3.2).

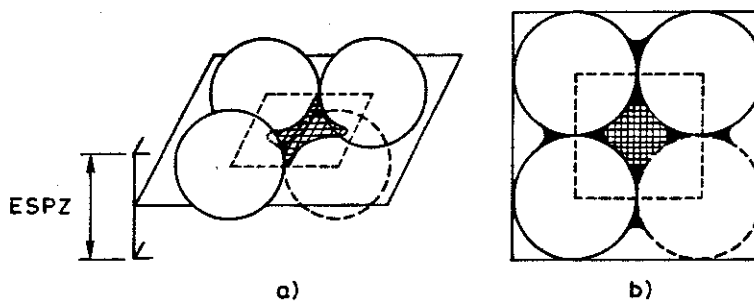


FIGURA 5.4 .- Representación del plano del modelo:

- a) Esquema mostrando el plano conteniendo los centros de las partículas.
- b) Vista ortogonal del mismo, incluyendo los círculos máximos intersección de las esferas, los meniscos y una sección del poro, que en realidad se extiende por encima y por debajo del área rayada.

Como en otros modelos discontinuos de suelos granulares, se simplifica la geometría espacial (tridimensional) real del suelo en el sentido de que todos los centros de las esferas sólidas se encuentran permanentemente contenidos en un plano (el plano del modelo, ver figura 5.4) dentro del cual pueden moverse y girar. Puede decirse pues que cinemáticamente el modelo es bidimensional. Sin embargo se tiene en cuenta la tercera dimensión en determinados aspectos que se consideran

fundamentales, como son:

- Las partículas son esféricas, y sus contactos también.
- Los meniscos son tridimensionales limitados por las mismas esferas y por un sector de toro, según lo visto en el capítulo 4. La consideración tridimensional del menisco es más satisfactoria, como se ha visto en el citado capítulo, en comparación al modelo de Collins (1961). Adicionalmente, la fase líquida se encuentra en forma de películas adheridas a la superficie de las esferas.
- En el plano del modelo un poro viene representado por un recinto limitado por una cadena cerrada de partículas y meniscos (cuadrado a trazos en la figura 5.4; poligonales por los centros de partículas en la figura 5.12). Ocasionalmente puede verse limitado en parte por el contorno o periferia del modelo. Como volumen de la fase gaseosa se considera un determinado espacio por encima y por debajo del plano del modelo, hasta completar un cierto espesor (ESPZ) que tiene el modelo alrededor de su plano medio. Este espesor es igual a un cierto promedio de los diámetros de las partículas que contiene. En concreto el volumen hueco del poro de la figura 5.4 sería igual al área del cuadrado a trazos multiplicada por ESPZ restándole el volumen de los cuatro cuartos de esfera que caen en su interior. El área del conducto "ecuatorial" del poro sería igual al área rayada.

5.2.1 GENERACION DEL ESTADO INICIAL

La disposición de las partículas en el plano del modelo puede especificarse a voluntad o bien generarse según ciertos criterios aleatorios. Dentro de las configuraciones "deterministas" se han usado, entre otras, las que aparecen en la figura 5.5. El conjunto de nueve esferas se ha utilizado para poner a punto el segmento de flujos, como se verá más tarde. Las cien partículas han servido para llevar a cabo un ensayo numérico de flujo en una "columna de suelo" (horizontal), incluido en el siguiente capítulo.

Las configuraciones creadas aleatoriamente pueden seguir diversos criterios de generación: son marcadamente distintos los usados por Cundall (1978), por Rodríguez Ortiz (1974), por Norman et al.(1971), etc., en función del mecanismo físico que se supone subyacente, de la densidad apetecida, del recipiente de generación, etc. Para los ensayos mecánicos a llevar a cabo con el modelo concebido en esta tesis, se pensó en una disposición aproximadamente circular de partículas, con condiciones de tensión controlada en su contorno. Para conseguir estados iniciales relativamente sueltos, que en etapas posteriores fueran susceptibles de experimentar colapso, se debían generar "abiertos". Por otro lado era necesario que las partículas estuvieran en contacto ya desde la generación para poder definir consecuentemente los meniscos y los poros.

La generación sucesiva de partículas adosadas a partir de una dada (atracción gravitacional central) presentó problemas si, como se quería, la estructura debía quedar "abierta". Las partículas, de tamaño aleatoriamente escogido dentro de una gradación, incidían desde una dirección $y = mx$ (pendiente al azar) sobre el conjunto ya generado. Tras establecer un primer contacto con alguna de ellas podía girar rodando sobre esta última, dentro de un cierto margen angular (TGIR). Si dentro de este margen contactaba con una tercera esta era su posición definitiva; en caso contrario quedaba generada en la posición del primer y único contacto. Variando el valor de TGIR se podían conseguir conjuntos más o menos abiertos. En la figura 5.6,

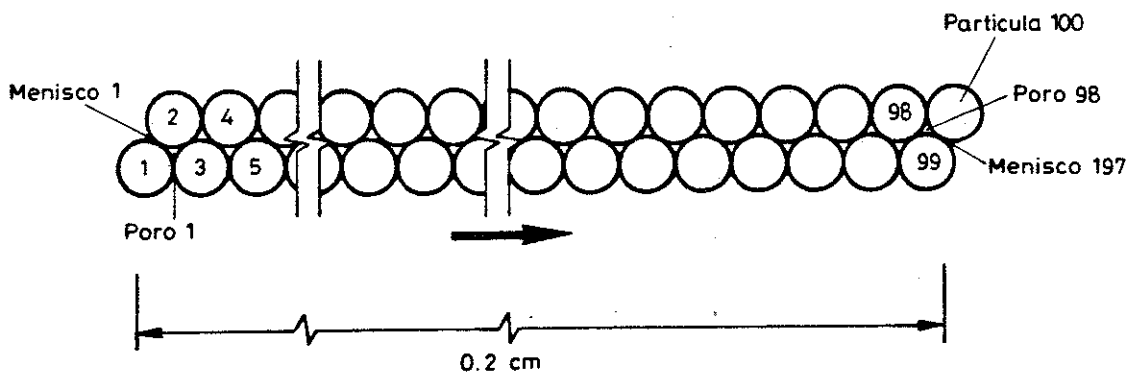
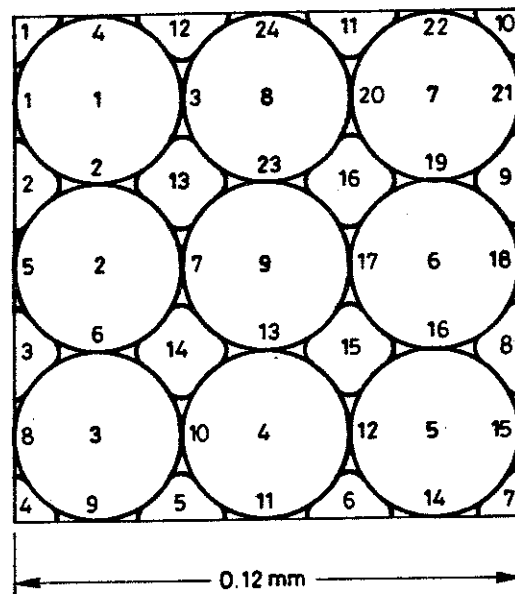


FIGURA 5.5 .- Dos configuraciones "deterministas" de 9 y 100 partículas esféricas.

se muestra un conjunto de 100 partículas así generado con TGIR de 30° y 90° . En la figura 5.7, con 1001 partículas y $TGIR=30^\circ$ se observa claramente la inconveniencia de este método, dado que los poros delimitados por las partículas presentan una disposición claramente radial, arborescente, asemejándose el conjunto más a una estrella de mar o a un fractal (Sander, 1987) que a un suelo granular inicialmente homogéneo. La adopción de un criterio de atracción "afín" según trayectorias

$y = mx + b$ (pendiente y distancia del origen aleatorias) no solventa el problema. En la figura 5.8 se presenta un conjunto de 1001 partículas así generadas con TGIR de 110° . Se mantiene la disposición radial pero queda ilustrada la capacidad de TGIR para obtener estructuras más o menos abiertas.

El criterio de generación con el que se han conseguido configuraciones más homogéneas de partículas en contacto en un recinto circular (programa GENAL4, ver anejo A3) es una modificación de los anteriores:

- a) Tras seleccionar el tamaño de partícula,
- b) se “deja caer” en una posición (x, y) aleatoria dentro del plano del modelo, dentro de un círculo de radio RMAX, sin que “pise” a ninguna existente.
- c) Por un efecto que se puede asimilar a un rebote podrá partir en una dirección aleatoria (de 0 a 360°), por la cual “viajará” una distancia máxima $RTRAV \times RMAX$ (asociable a la energía inicial).
 - c.1) Si no contacta con ninguna otra partícula, pre-existente, dentro de ese recorrido máximo, la partícula en generación se dispone definitivamente en (x, y) .
 - c.2) Si contacta con otra preexistente, se controla si rodando sobre ella un margen angular (TGIR) establece una nueva unión con una tercera.

Al aumentar el número de partículas ya generadas el espacio disponible dentro de RMAX es cada vez menor y se han de efectuar muchos intentos antes de encontrar una posición (x, y) en la cual la partícula en generación no “pise” a las anteriores. Cuando el número de intentos fallidos supera una determinada proporción (TRIES, en tanto por uno) del número de partículas ya generadas se da por finalizado el proceso. Como no existe ninguna dirección preferencial los conjuntos generados no presentan segregación ni “anisotropía radial” apreciable. En la figura 5.9 aparece un ejemplo de configuración inicial de 592 partículas de tres tamaños, enlazadas por 981 contactos, que se utilizará posteriormente.

Se registra normalmente cierta variación de la “granulometría” finalmente generada en relación a la inicialmente especificada, debido a que los intentos de generación “fallidos” afectan más a los tamaños mayores. En todo caso con algunos pequeños tanteos se puede conseguir la “granulometría” deseada.

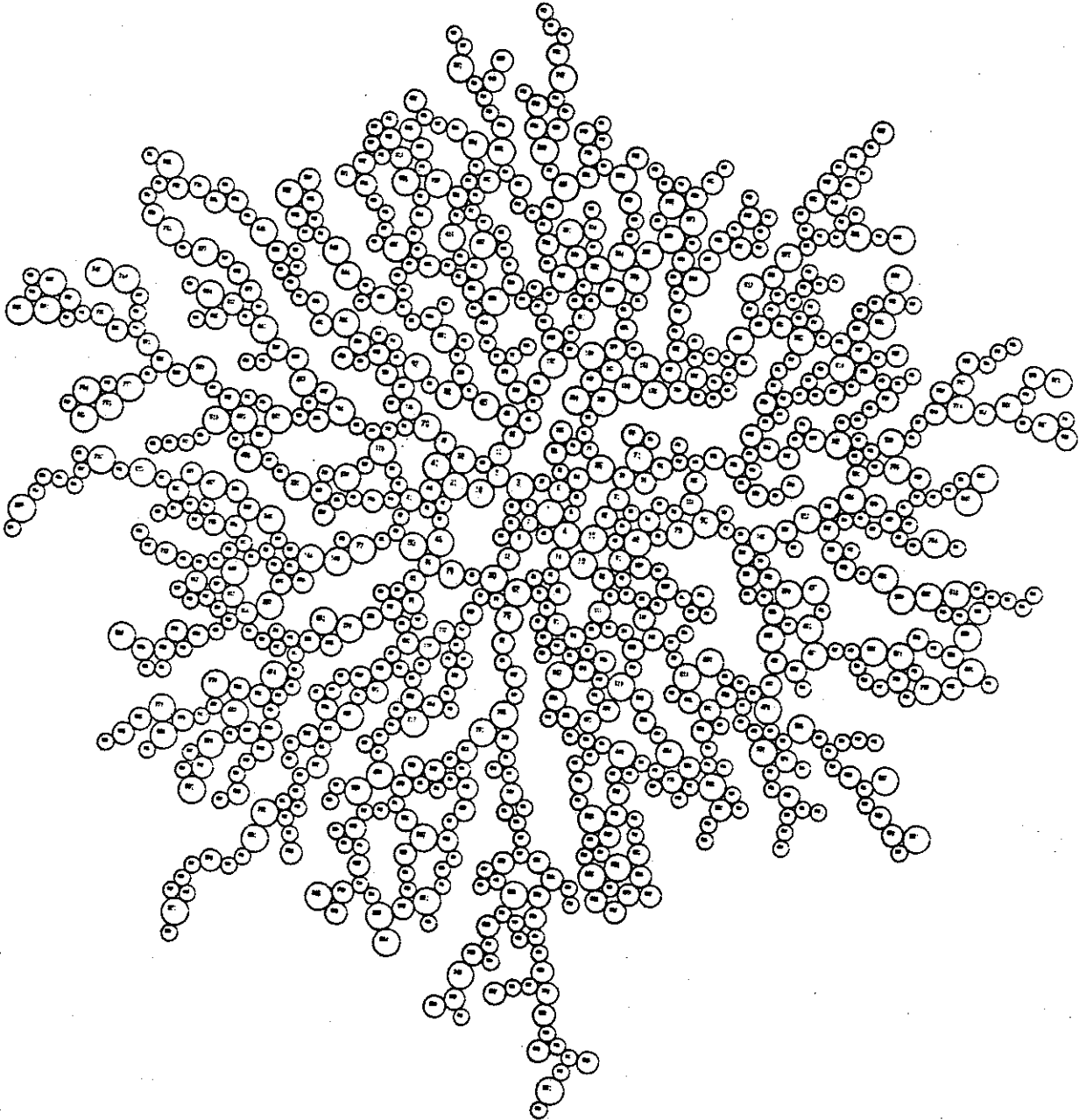


FIGURA 5.7 .- Prueba de generación por atracción central: 1001 partículas. $TGIR = 30^\circ$.

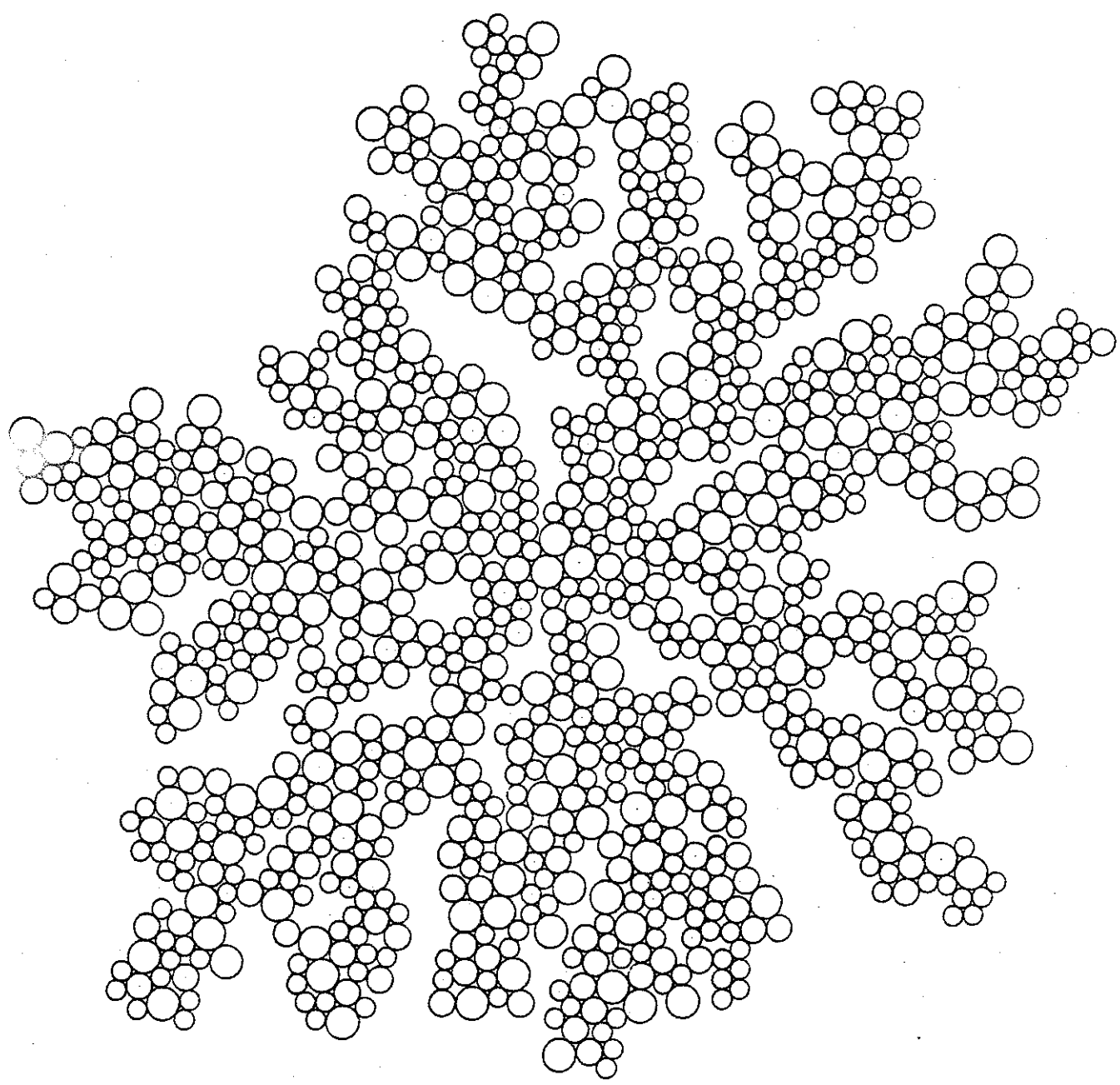


FIGURA 5.8 .- Prueba de generación por atracción "afín": 1001 partículas. TGIR= 110°.

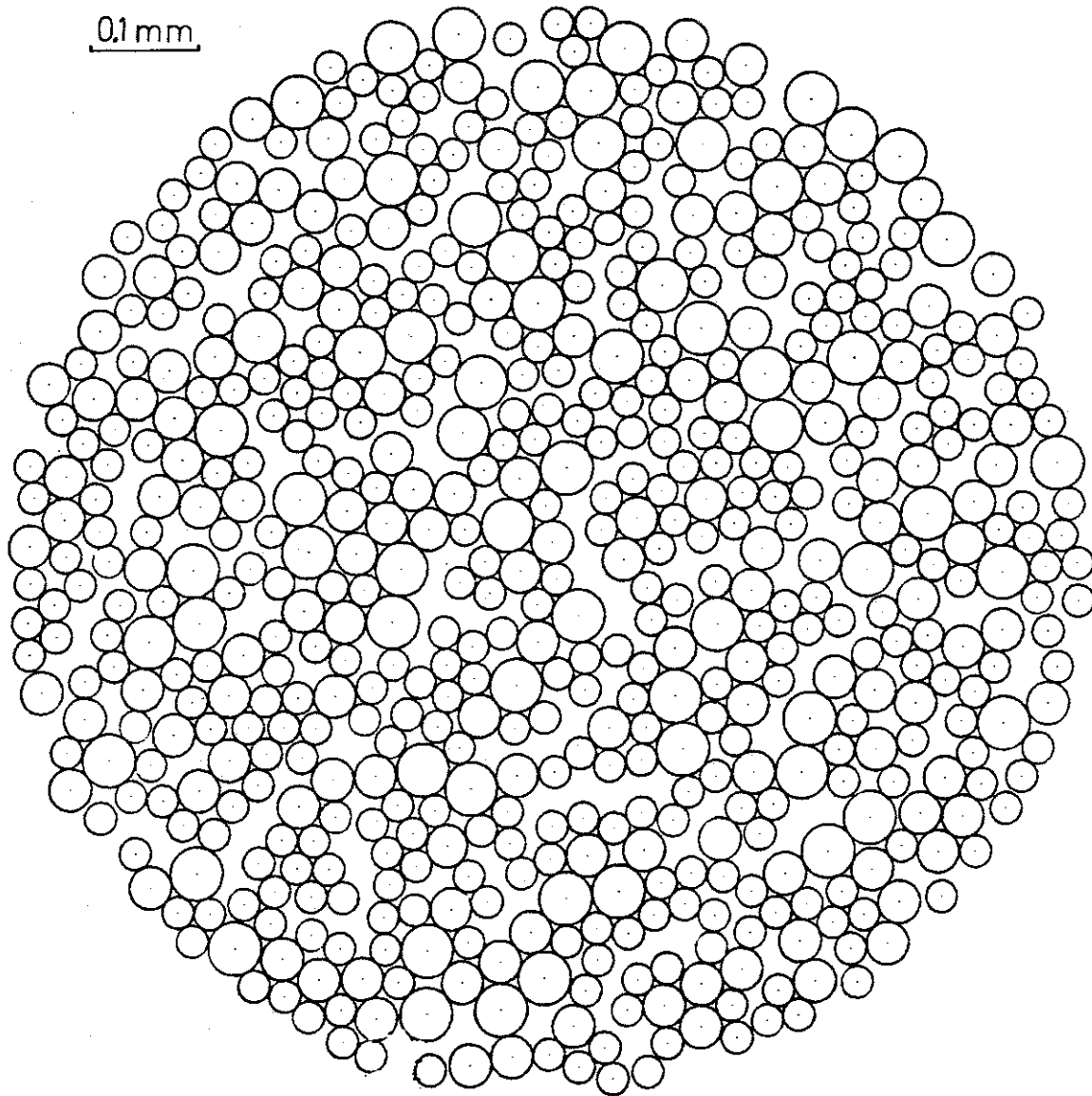


FIGURA 5.9 .- Configuración de 592 partículas obtenida con los criterios de GENAL4. $TGIR = 100^\circ$; $RMAX = 5 \times 10^{-2}$ cm; $RTRAV = 2$; $TRIES = 50$;

TAMAÑOS (ϕ , mm)	NRO. GENERADO
0.05	63
0.04	139
0.03	390

El resultado de la generación se resume en un archivo que contiene las coordenadas x e y de los centros de las esferas-partícula (XB, YB), junto con una lista (para cada una de ellas) de los números de los meniscos-contacto que la rodean (MB). Finalmente también se incluyen en este archivo de resultados las coordenadas x e y de los citados meniscos-contacto (XM, YM) y una lista (para cada uno de ellos) que contiene los números de las dos partículas que lo soportan (MN).

A partir de este archivo de resultados de generación, el programa GAPLUS7 (ver anejo A3) aborda la compleja misión de identificar los poros que enmarcan entre sí las partículas y los meniscos. Para ello entre otras tareas se debe:

- a) Reordenar las variables MB y MN.
- b) Definir el contorno, entendiendo por tal el conjunto correlativo de partículas cuyos centros formen una poligonal convexa que enmarque a todas las demás.
- c) Definir los poros. Esto se hace mediante los algoritmos contenidos en CHEQ, segmento del programa principal que se verá en el apartado 5.3.3.
- d) Cálculo de áreas y volúmenes asociados a los poros
- e) Control sobre la identificación de poros llevada a cabo, sobre la suma total de sus áreas y control de que ningún menisco se haya quedado sin asignar a algún poro.
- f) Asignación de volúmenes iniciales de agua a los meniscos. Inicialización de otras variables másicas de los poros y meniscos (aire disuelto, vapor de agua, presión de aire, etc.)
- h) Identificación de las "bolas" aisladas (sin contactos).
- i) Cálculo del volumen de huecos, de agua total, de la porosidad, del grado de saturación, humedad (iniciales).
- j) Escritura de archivo principal de datos de acuerdo al formato definitivo a usar en el programa principal.

En la figura 5.10 se incluye el resultado de todo este proceso de identificación de poros sobre el conjunto de 592 partículas de la figura 5.9. El contorno está representado por una línea perimetral convexa que pasa por las partículas que lo forman. Los poros, en número de 426, quedan delimitados por dos tipos de poligonales cada uno. La primera va de centro de partícula a centro de partícula, recorriendo sucesivamente las que limitan y enmarcan al poro en cuestión. La segunda hace exactamente lo mismo pero enlazando meniscos sucesivos, y es en general interior a

la primera. Algunos poros limitan parcialmente con el contorno. Este hecho introduce la mayor parte de los casos particulares a tratar con los algoritmos de CHEQ y en general en todo el paquete de programas. Los poros que están en contacto con el contorno exterior o que están abiertos a él se guardan en una lista especial (LICOP). Las condiciones de presión de fase gaseosa impuesta en el contorno de la muestra, se aplicarán a los poros de la citada lista. Paralelamente las condiciones de contorno de presión de agua especificada se aplicarán a los meniscos de otra lista (LICOM). Dichos poros y meniscos del contorno en el caso de las 592 partículas se resaltan en la figura 5.11.

En la figura 5.12 se presenta a modo de ejemplo otra configuración (con 21 partículas) en lo que se puede apreciar algo mejor la conexión lógica entre los meniscos, "bolas" y poros del modelo.

5.3 PROGRAMA PRINCIPAL DE ENSAYO FLUJO-DEFORMACIONAL

Sobre los estados iniciales generados según se ha resumido en el último epígrafe, se puede llevar a cabo ensayos numéricos, estudiando el flujo de fluidos y la deformación del esqueleto sólido bajo la acción de una tensión aplicada sobre las partículas del contorno (isotrópica o desviadora) y de unas presiones (de aire y de agua, constantes o variables) impuestas respectivamente a los poros y meniscos también del contorno.

Los ensayos numéricos se llevan a cabo con un paquete de programas FORTRAN (ver anejo A3) segmentado en tres módulos diferenciados importantes (ver figura 5.13): Módulo de flujos (5.3.1), módulos de cálculo de fuerzas y movimientos (o módulo mecánico, 5.3.2), y módulo de chequeos y cambios geométricos (5.3.3), que se describen en los apartados indicados.

Como los ensayos pueden ser dilatados en tiempo real, un determinado ensayo

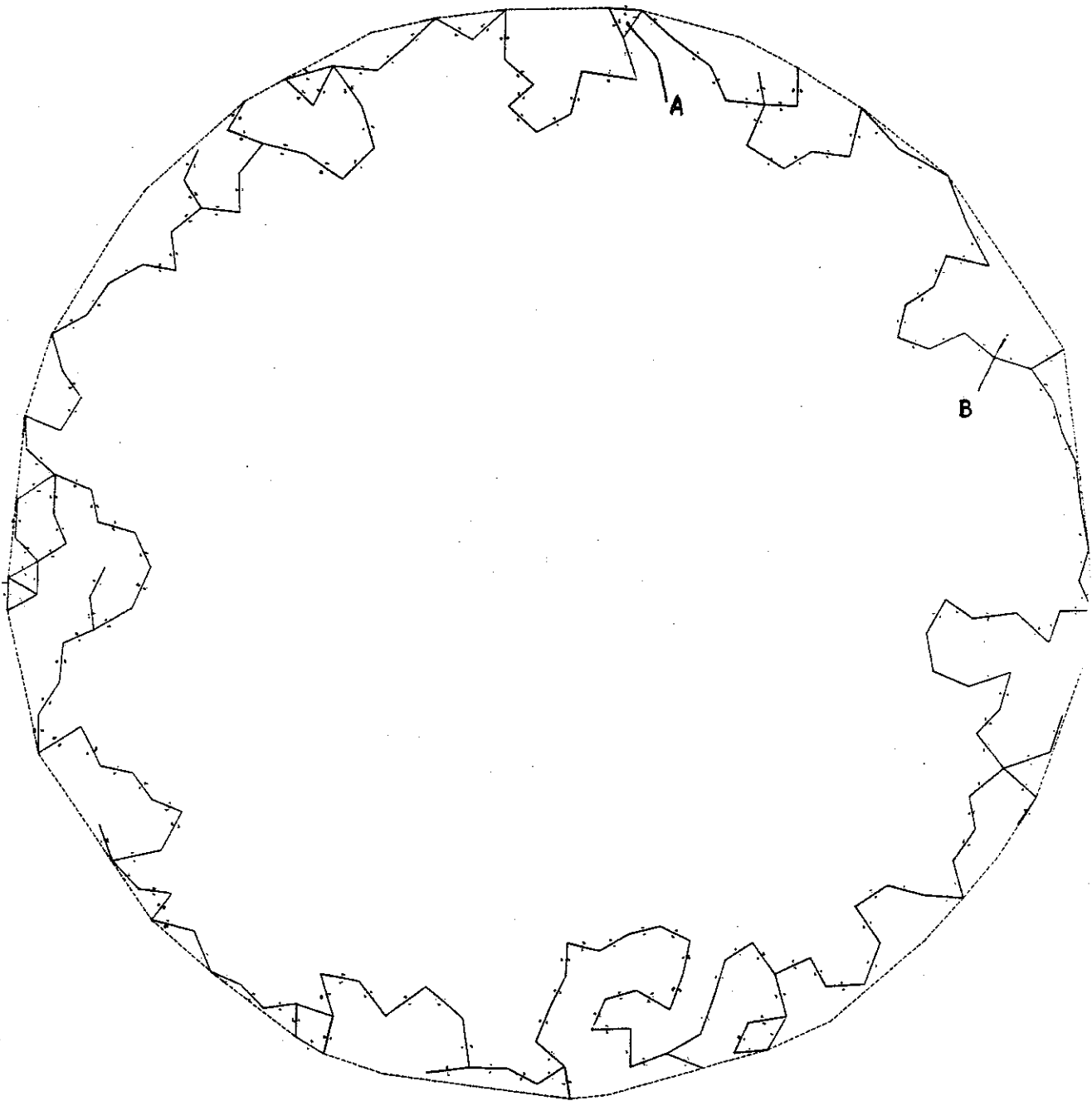


FIGURA 5.11 .- Línea discontinua: Contorno correspondiente al conjunto de las 592 partículas. Interiormente se resaltan: los poros "abiertos" al contorno (poligonales por los centros de esferas); y los meniscos que "pertenecen" al contorno, que aparecen como puntos apareados al lado de la anterior poligonal. En realidad son dos minúsculos arcos de circunferencia, intersección del menisco con el plano del modelo.

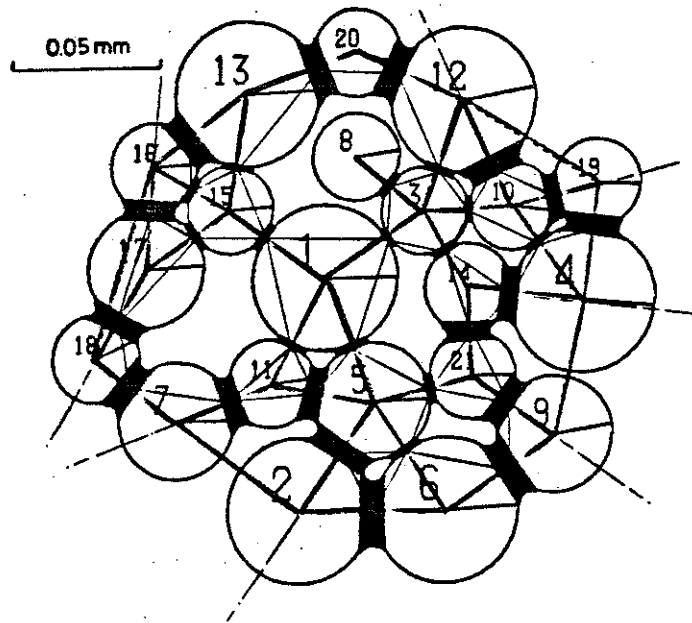


FIGURA 5.12 .- Configuración reducida de 21 partículas esféricas y de los poros asociados, resaltándose las poligonales que definen la conexión lógica entre los distintos "entes" del modelo. Los meniscos toroidales, en un estado de succión no equilibrada, aparecen en negro.

puede subdividirse en varias aplicaciones o "run's" del programa principal. Una adecuada estructura de archivos de datos y resultados permite reiniciar el ensayo tras examinar el resultado de un "run" con el programa de postproceso (apartado 5.3.4).

Como en otros modelos numéricos que tratan problemas de interacción de cuerpos en contacto, el módulo de chequeo y control ocupa buena parte del esfuerzo de programación. A modo de comparación el número aproximado de líneas de listado de los programas fuente es:

- Módulo de flujos ~ 1750 líneas
- Módulo de fuerzas y movimientos ~ 550 líneas
- Módulo de chequeos ~ 3600 líneas

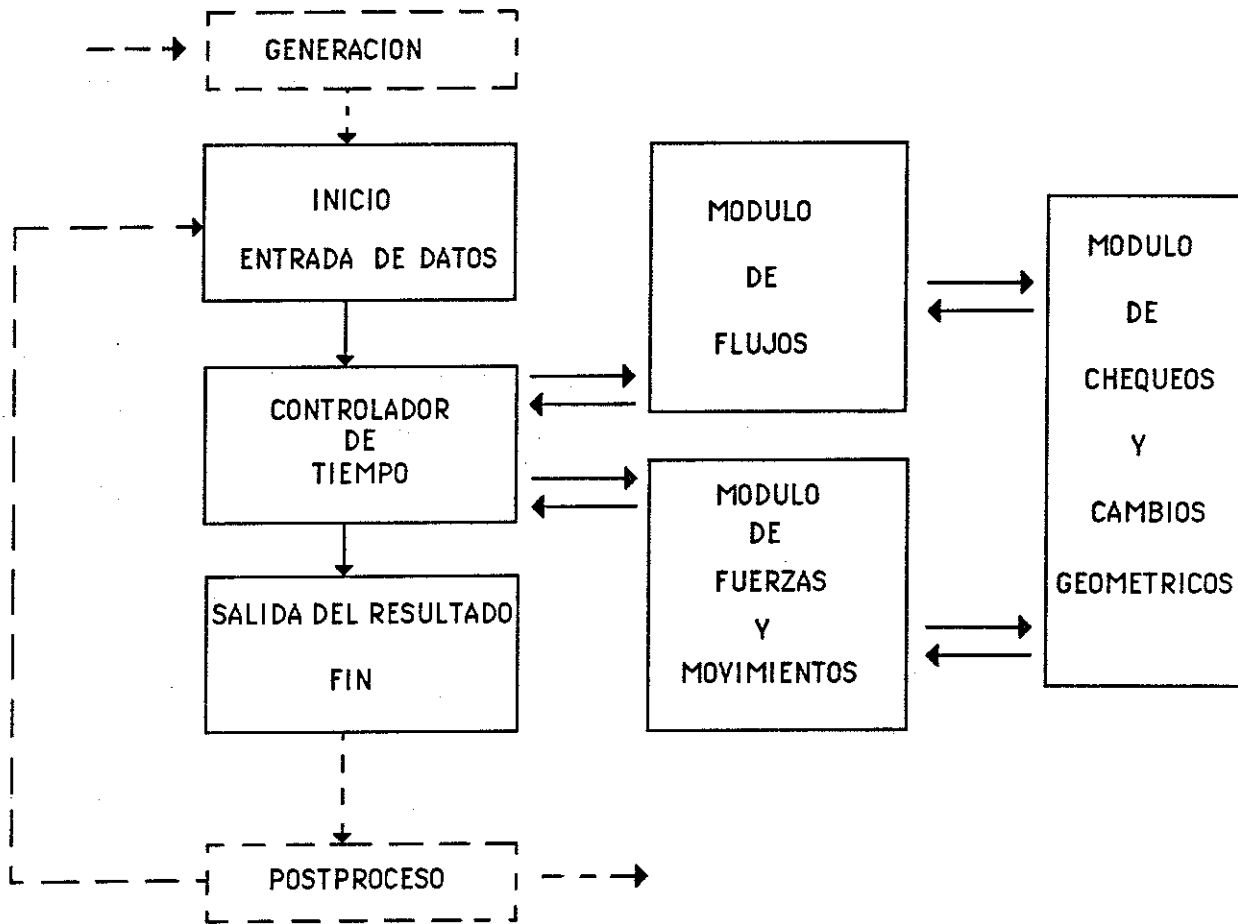


FIGURA 5.13 .- Módulos de cálculo dentro del programa principal de ensayo.

Este último módulo lleva a cabo los ajustes en la geometría y de la relación lógica entre poros, meniscos y partículas provocados tanto por los flujos como por los movimientos de las partículas.

Como ya se ha avanzado, se sigue el comportamiento del suelo en el eje temporal mediante esquemas explícitos para los dos problemas acoplados de flujo y deformación. El segmento "controlador del tiempo" se encarga de alternar los cálculos de flujos y los mecánicos. El tiempo de CPU por ciclo de un determinado ensayo (y la memoria necesaria) se ha comprobado que depende casi linealmente del número total de "entes" (número de partículas + número de meniscos + número de poros). A título orientativo se da un orden de magnitud del tiempo que ocupan los cálculos relativos a los flujos y los cálculos mecánicos (ambos en un ensayo de condiciones medias):

- Flujos: $\sim [70 \text{ a } 80] \times 10^{-4} \text{ s.}$
- Mecánico: $\sim [2 \text{ a } 3.5] \times 10^{-4} \text{ s.}$

Los valores se refieren a segundos de CPU en un VAX-8600 de configuración media (ver anejo A3) por ciclo completo (de flujos o mecánico) dividido por el número total de "entes". El esfuerzo por ciclo para analizar la parte de flujo es superior. Sin embargo los dos esquemas explícitos precisan distintos incrementos de tiempo para ser estables, o mejor aún, para ajustarse en el tiempo a la solución "exacta". En los casos analizados en esta tesis la parte mecánica requería un incremento de tiempo de 100 a 4 veces menor (variable con el material modelado, como se discutirá en 5.3.2). Por este motivo si se avanza en el tiempo con diferente número de ciclos para cada parte, el esfuerzo computacional consumido por cada módulo puede equilibrarse.

El segmento controlador del tiempo (parte "main" del programa fuente BTOT5, ver anejo A3) se encarga de alternar los ciclos mecánicos y de flujos que se llevan a cabo en los correspondientes módulos. Si los incrementos de tiempo especificados ($\Delta t_M = \text{TINCM}$, y $\Delta t_F = \text{TINCF}$, respectivamente) son distintos para ambos problemas, se debe ejecutar varias veces el módulo mecánico (con cálculos extendidos a la totalidad de las partículas) por cada "pasada" del módulo de flujos. A este respecto el módulo controlador puede considerar cuatro "ambientes" o modos de ensayo, distinguidos por los valores de la variable ICASO que se señalan entre paréntesis:

- (0) .- Modo "solo flujos": solo se aborda el análisis de flujos. A efectos mecánicos es como si las partículas tuvieran sus tres grados de libertad coaccionados.
- (1) .- Modo "normal": se alternan convenientemente los cálculos de flujo y mecánicos.
- (2) .- Modo "inundado": se supone la muestra con los poros totalmente saturados de agua. No existen por lo tanto meniscos ni flujos entre ellos, ni fuerzas capilares. No se considera el flujo entre poros tampoco. Por lo tanto sólo se aborda el módulo mecánico, calculando el movimiento de las esferas bajo la acción de las restantes fuerzas. Este modo puede iniciarse en cualquier instante de un ensayo "en modo normal" y correspondería a una inundación súbita de la muestra.
- (3) .- Modo "desaturación": sirve para efectuar el paso inverso al caso anterior, estableciendo nuevamente meniscos alrededor de los contactos, y aire en los poros, de acuerdo a unas condiciones de presión de aire y agua especificadas. Este modo se corre solo puntualmente, preparando la geometría para proseguir el ensayo en "modo normal".

Como se ha comentado en los capítulos 2 y 4, el modelo de disposición del agua en forma de menisco aislado sólo sirve, "sensu stricto" para grados de saturación relativamente bajos, generalmente por debajo del 20%. En el modo 1, en este rango de bajas saturaciones se simula temporalmente de manera detallada la circulación de fluidos en el suelo no saturado. Sin embargo los cambios modo 1→2 (inundación) o modo 2→3→1 (desaturación), se llevan a cabo de manera súbita y un tanto independiente del ajuste temporal. En efecto podría considerarse que las partículas han permanecido (artificialmente) inmóviles durante la inundación o desaturación, justamente cuando la progresión del agua por los poros puede ser de efectos más notables.

A continuación se describe brevemente la serie de variables lógicas de "conexión" (o variables de "conectividad") que se usan en todo el programa como soporte abstracto de la disposición de poros, meniscos y partículas en el modelo.

En un discontinuo es imprescindible la creación de unas variables y unos algoritmos lógicos que den coherencia al conjunto. Básicamente definirán en todo

momento cual es la geometría en el espacio contiguo (o "vecino") a un determinado ente del modelo. De la eficiencia de dichos algoritmos dependerá en gran parte la del modelo numérico (Williams, 1987). Según dicho autor conviene mantener un cierto equilibrio entre la memoria ocupada y la velocidad de cálculo. A grandes rasgos la alternativa es: recalcular ciertas variables cuando se necesitan (y opcionalmente almacenarlas en unidades auxiliares de memoria en el interín), o mantenerlas permanentemente en memoria central. En el entorno de trabajo en el que se han desarrollado los programas (que se describe en el anejo A3, y que puede ser hasta cierto punto típico en la banda de los mini-ordenadores) se ha encontrado adecuado ocupar de forma permanente algo más de memoria que la que dedicaba el método D.E.M. a describir la conexión entre partículas. De hecho ésto ha sido imprescindible también dado que el seguimiento de los flujos obliga a disponer constantemente de esta información. Un contacto podría detectarse cada vez que fuera preciso conocer los solapes que mantiene una partícula con sus vecinas, pero como el menisco que lo envuelve tiene una masa de agua asociada a su número, es imprescindible tenerlo identificado con ese ordinal mientras perdure el contacto-menisco, lo que significa conocer su posición (XM, YM), las partículas que conecta (MN) etc.

Análogamente ocurre con los poros. Además, como se ha visto en el capítulo 4 y en el anejo A2, un menisco puede existir incluso sin solape de las dos partículas que lo soportan: esta es otra razón para mantener al menisco permanentemente definido.

*

Los significados de las principales variables de "conectividad" lógica usadas son pues (ver figura 5.14):

MB (NB,1 a MBDIM): Para cada partícula (NB) contiene los números ordinales de los meniscos que lo rodean, en orden correlativo antihorario empezando por el menisco más lejano al origen. En un vector **IMB**(NB) se almacena el número total de meniscos que rodean a cada partícula NB; como máximo este puede ser igual a MBDIM que es un parámetro que se fija al principio del programa (en el archivo del COMMON). Si en un instante determinado una partícula no

* Por motivos de brevedad en ocasiones se habla de "menisco" entendiéndose como tal al menisco-contacto, con solape físico entre las partículas si tal es el caso.

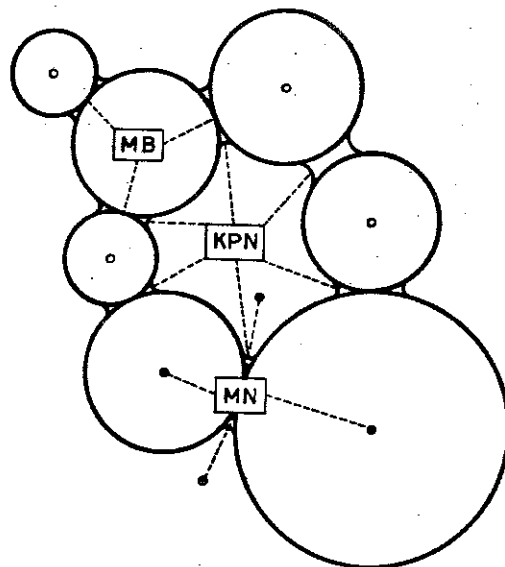


FIGURA 5.14 .- *Matrices de "conectividad" para describir las conexiones entre los entes del modelo: MB para las partículas, KPN para los poros y MN para los meniscos.*

presenta meniscos se considera "aislada", con IMB nulo.

KPN (NP,1 a KPDIM): Para cada poro (NP) es una lista de los meniscos que lo rodean y definen (junto con las partículas asociadas a cada uno de ellos), en orden correlativo antihorario, empezando por un menisco "iniciador" de ese poro. En un vector IKPN(NP) se almacena el número total de meniscos que rodean al poro NP (número de posiciones ocupadas de KPN); debe ser menor que KPDIM, igualmente un parámetro que se fija al principio del programa. El vector IPOR(NP) describe qué tipo de poro es el NP con el siguiente significado: (1) Poro interior a la muestra; (2) Poro cerrado pero en contacto con el contorno, por ejemplo el "A" en la figura 5.11; (3) Poro geoméricamente "abierto" al contorno, por ejemplo el "B" en la figura 5.11. Los valores de IPOR igual a 11, 12 ó 13 significa lo mismo que el 1,2 y 3 pero adicionalmente indican que el poro en cuestión contiene alguna partícula "aislada" en su interior.

MN (NM,1 a 4): Para cada menisco (NM) indica directamente qué “entes” le rodean. Las dos primeras posiciones señalan entre qué dos partículas se encuentra; y las dos restantes cuales dos poros separa.

Como se puede apreciar los meniscos y su “matriz de conexión”, MN, son el nexo de unión lógica entre poros y partículas. Con este mínimo esquema de tres matices se logra conocer en cada instante y en cualquier punto del modelo la configuración geométrica relativa de poros, meniscos y partículas.

Para conocer qué partes “pertenecen” al contorno del modelo se dispone de tres vectores-lista (LICOB, LICOP y LICOM, ya citados). Determinadas posiciones de las matrices de “conectividad” principales (MB, KPN, MN) adoptan valores clave cuando la partícula, el poro o el menisco en cuestión están en contacto con el contorno. Por ejemplo si una partícula NB se encuentra en el contorno MB(NB,1) contiene un -1 (ver anejo A3).

5.3.1 MODULO DE FLUJOS

El módulo de flujos constituye la parte fundamental (subrutina FLUJOS) del programa fuente BTOT5 (ver anejo A3). Lleva a cabo todos los cálculos relativos a los flujos que tienen lugar a escala micrométrica entre los meniscos y los poros del modelo en un incremento de tiempo de flujos (TINCF) considerando las partículas inmóviles.

Los flujos esbozados en el modelo conceptual (ver figura 3.6) se concretan en los siguientes flujos individuales (ver figura 5.15): flujo de la fase gaseosa entre poros vecinos (1), a través de los conductos que dejan entre sí las partículas del modelo, por “encima” y por “debajo” del menisco que las une; “flujo” entre un poro y los meniscos que lo rodean (2) a través de la interfase (realmente es un cambio de fase que implica al aire disuelto y al vapor de agua); y flujo de agua líquida entre meniscos vecinos a través de la película de agua adherida a las partículas (3).

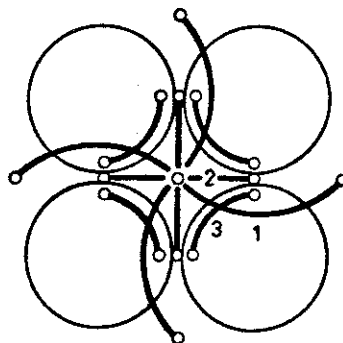


FIGURA 5.15 .- *Flujos individuales considerados en el modelo numérico:*

- 1) *Flujo de la fase gaseosa entre poros vecinos.*
- 2) *"Flujo" entre un poro y los meniscos que lo rodean.*
- 3) *Flujo de agua líquida a través de la película adherida.*

La pieza o aspecto fundamental de este módulo es la determinación de las características del menisco aislado. La masa de agua que contenga un menisco entre dos partículas en un instante determinado se deberá disponer de forma compatible con los criterios del anejo A2, deduciéndose así los radios de curvatura (r_1 y r_2) de la interfase, la succión o diferencia de presión a ambos lados de ella ($p_w - p_a$) y otros valores necesarios para la evaluación de los flujos (ángulo de mojado, θ , áreas, etc). Estos cálculos se llevan a cabo en la subrutina VOLMEN y anejas. Como quiera que las expresiones del "menisco aislado generalizado" que aparecen en el anejo A2 parten del valor del ángulo θ , y el valor conocido a satisfacer en este caso es la masa de agua del menisco NM, $V(NM)$, en dicha subrutina se efectúa una pequeña iteración para conocer qué ángulo satisface tal masa, y determinar posteriormente el resto de valores geométricos.

Paralelamente en un poro en cualquier instante se pueden calcular las presiones de aire y de vapor de agua a partir de las masas de estas especies a él asignadas, en la subrutina VOLPOR.

En la figura 5.16 se presenta un organigrama esquemático de este módulo de flujos. Si en cualquier instante del módulo se registra la "desaparición" de algún

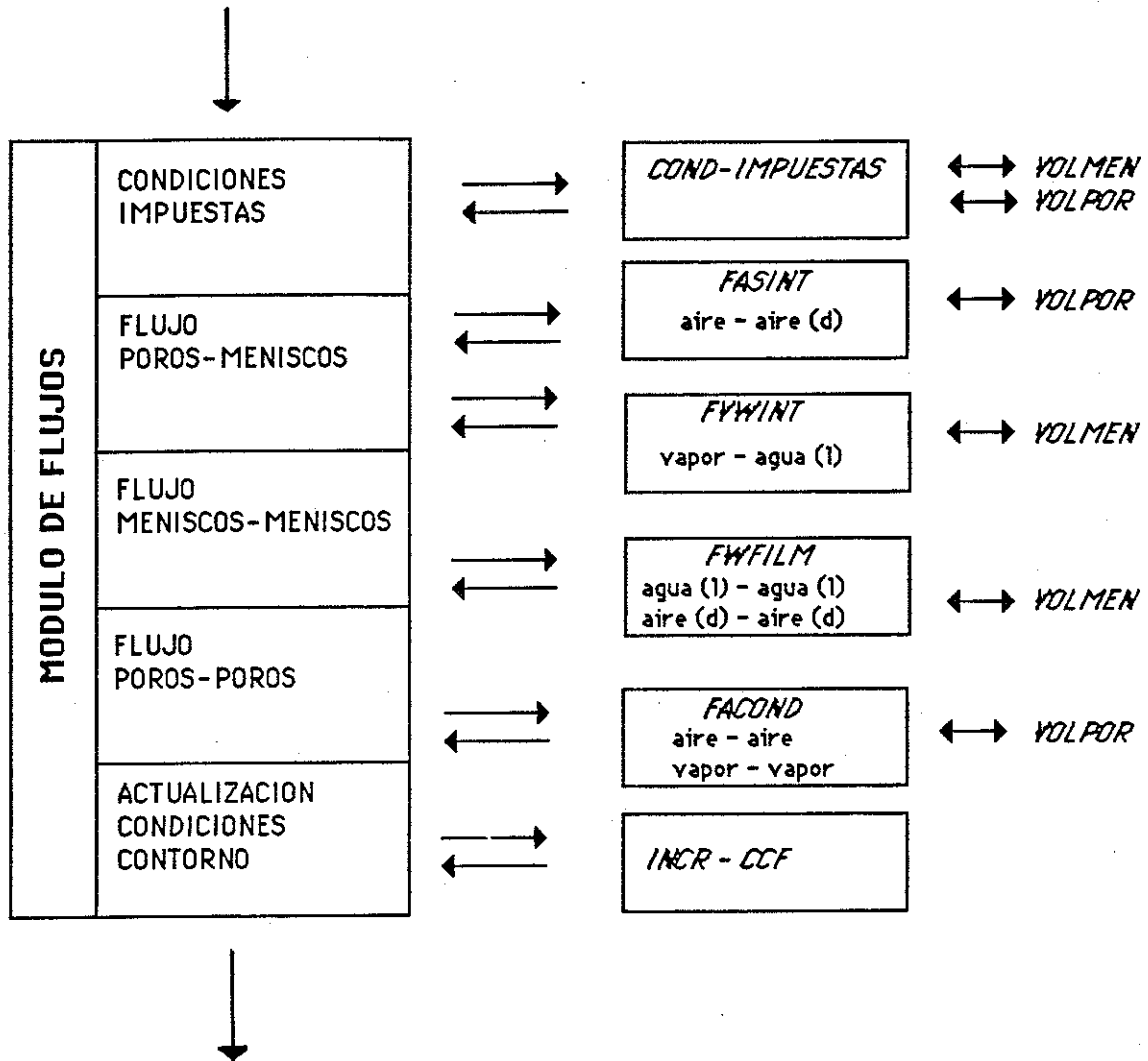


FIGURA 5.16.- Esquema Módulo de flujos, indicando las principales subrutinas.

menisco (debido al "agotamiento" de la masa de agua que contenía), se acude al módulo de chequeos, donde se efectúan los cambios lógicos correspondientes. Al empezar un ciclo de flujos se ajustan las masas de aire y de los poros del contorno (LICOP) y las masas de agua de los meniscos del contorno (LICOM) de manera que satisfagan unas condiciones especificadas de presión de la fase gaseosa (PGCOP) y presión del agua en los meniscos (PWCOM). En definitiva se puede imponer a voluntad la succión reinante, como diferencia de ambas presiones especificadas. En un "run" es posible ir variando dicha succión de acuerdo a unas "velocidades" (variación de presión por unidad de tiempo) que también se deben definir en el archivo de datos. Tras el ciclo de flujos se actualizan las condiciones de contorno en la subrutina INCR_CCF.

El flujo entre poros y meniscos (flujo 2 en la figura 5.15), se organiza espacialmente de la siguiente forma: dentro de un "bucle" ("DO" en lenguaje FORTRAN) que abarca a todos los poros, se establece el citado flujo entre el poro en cuestión y los meniscos que lo rodean, conocidos gracias a la variable KPN (Subrutinas FASINT y FVWINT).

El flujo entre meniscos (flujo 3 en la figura 5.15) se organiza en base a un nuevo bucle sobre los poros. Dentro de cada poro se establece el flujo (subrutina FWFILM) entre meniscos vecinos, dos a dos (posiciones sucesivas dentro de la fila de la matriz KPN correspondiente a ese poro).

El flujo entre poros (flujo 1 en la figura 5.15) se establece entre poros inmediatos (subrutina FACOND). Se averigua cuales poros limitan con uno dado (NP) gracias a las posiciones tercera y cuarta de la matriz MN correspondiente a los meniscos del poro NP.

El esquema explícito "de punto" usado para resolver los flujos precisa incrementos de tiempo relativamente reducidos para que se cumpla la hipótesis fundamental de que el flujo entre dos entes se puede considerar independientemente del resto de poros y meniscos. Más aun si el fenómeno es muy no-estacionario o existe no-linealidad geométrica (como es el caso del modelo discreto de partículas). Se puede demostrar que en un esquema explícito puro (que utilice flujos según la

ecuación 5.1b) sólo se obtiene estabilidad numérica si se emplea con Δt inferior a un cierto valor $\Delta t_{CRITICO}$, y que ese valor crítico es prácticamente función exclusiva de la geometría (permeabilidad K_{ij} en la ecuación citada), y no de la cantidad de masa que fluye o del gradiente de presiones (Gili, 1986). Por este motivo se debe mantener un incremento de tiempo reducido incluso cuando el flujo está muy estabilizado. No se puede avanzar más rápido en el eje temporal ni en situaciones cercanas al equilibrio (no es posible utilizar incrementos de tiempo crecientes como hacen algunos métodos implícitos).

Para obtener un esquema numérico más estable se ha dotado al puramente explícito de una serie de modificaciones. Sin hacerle perder su carácter explícito permiten finalmente utilizar cualquier incremento de tiempo. Estas modificaciones están basadas en las particularidades específicas del flujo en el modelo planteado y son: "Flujo exponencial", "actualización inmediata" e "inicio aleatorio".

La modificación denominada de "Flujo exponencial" consiste en plantear la ecuación original 5.1a entre dos "entes" del modelo en lugar de usar la 5.1b. Esta última, mantiene el gradiente de presiones * durante todo el Δt . Si éste es demasiado grande puede resultar que la masa ΔM_{ij} supere incluso la existente en el poro i ; en realidad el gradiente habrá disminuído o incluso cambiado de signo, dado que las presiones dependen de la masa fluída ($p_i = f_i(M_i)$). La presión del aire o del vapor en un poro o la concentración de aire disuelto en un menisco, por ejemplo, pueden ponerse fácilmente en función de la masa respectiva conociendo el volumen ocupado por ésta. Si en primera aproximación se considera la geometría constante, las funciones f_i y las presiones son lineales con la masa ($p_i = C_i \cdot M_i$; $p_j = C_j \cdot M_j$); por este motivo el gradiente de presiones también resulta función directa de las masas que hay en cada instante en los entes i y j , o si se prefiere es función lineal de la masa que ha fluído entre ellos (M , positiva si el flujo va de j a i):

$$p_j - p_i = (p_j - p_i)_o - (C_i + C_j) M \quad (5.3)$$

El primer sumando del segundo miembro es el gradiente inicial.

* En lo que sigue se habla de gradiente de presiones (en rigor gradiente de potencial), aunque el raciocinio sirve igual para las concentraciones.

Introduciendo esta expresión en la ecuación 5.1a y considerando la “permeabilidad” K_{ij} constante en primera aproximación, se llega a la ecuación:

$$M = \frac{(p_j - p_i)_0}{C_i + C_j} (1 - \exp(-K_{ij} (C_i + C_j) \Delta t)) \quad (5.4)$$

que nos da la masa fluída de j a i; resulta exponencial en el tiempo y ya queda considerada la variación del gradiente con el flujo. Si se adoptara un incremento de tiempo infinito la masa fluída sería igual a $(p_j - p_i)_0 / (C_i + C_j)$ pero no resultaría infinita como ocurriría con la ecuación 5.1b. Las presiones finales quedarían igualadas si solo existiera flujo por ese conducto y la geometría resultara efectivamente constante al variar la presión en i y j (ambos extremos no se cumplirán en el modelo). Los valores C_i, C_j pueden ser hallados analíticamente o bien numéricamente por incrementos.

En todo caso aplicando 5.4 se consigue que aunque se adopten Δt excesivos el esquema numérico no sea inestable por inexactitud al evaluar los gradientes (mejora la estabilidad, pero no el ajuste temporal a la solución “exacta”, que en algunos casos puede verse afectado). En el módulo de flujos la ecuación 5.4 está implementada en la subrutina DIFEXP, que es utilizada por todas las subrutinas de flujo, tanto de poros como de meniscos, para calcular la masa fluída.

La segunda modificación se ha denominado de “actualización inmediata”, y tiende a cancelar los efectos de otro mecanismo de inestabilidad numérica del esquema explícito de flujos, que se explica a continuación. Dentro de un ciclo supóngase un “ente” del modelo (un poro, por ejemplo) conectado con cuatro inmediatos, a menor “presión” que el primero. En el esquema de cálculo utilizado cada una de las “masas” fluídas, M , que se calcularán individualmente por cada uno de los cuatro “conductos” tenderán a cancelar la diferencia de presión, independientemente de los restantes conductos. Al acabar el cálculo de las “ M ” para todos los conductos se procede a la actualización de la masa en todos los poros. Puede llegar el caso, en función del tipo de flujo, de su velocidad y del Δt , que la suma de las masas a fluir por los cuatro conductos sea superior a la masa existente en el poro “central”, resultando, de manera irreal, masa “negativa”; directa o indirectamente ésto produciría la interrupción del programa. La modificación de “actualización inmediata” consiste en actualizar la

masa de los “entes” del modelo inmediatamente después de haber calculado la masa M que fluye entre ellos, restándola en la de uno y sumándola en la del otro. También se calcula de nuevo entonces la “presión” asociada a la nueva masa en esos dos “entes”. (Paso por las subrutinas VOLMEN y VOLPOR). De esta manera en el caso de los cuatro conductos, la masa y la “presión” del “ente” central irían disminuyendo al “abrirse” escalonadamente los conductos, no llegándose a valores negativos.

Si se empezara el ciclo de flujos de forma ordinal y con esta actualización, se estaría introduciendo una “preferencia”. Para anularla, paralelamente a la “actualización inmediata” se ha implementado el denominado “inicio aleatorio” de los bucles (o “DO’s”) del programa (se empieza por un poro o menisco cualquiera, y además se recorre la lista de ellos en sentido creciente o decreciente de los índices). Como las partículas, los poros y los meniscos están espacialmente generados al azar, el efecto neto de esta medida a medio plazo es la anulación de la hipotética preferencia creada por la anterior.

Estas dos últimas modificaciones son nuevamente una solución numérica a un mecanismo de inestabilidad numérica. En conjunto se ha logrado así un esquema numérico estable para cualquier Δt . El ajuste temporal a la solución “exacta” deberá probarse con Δt decrecientes. Para las geometrías generadas y en los casos analizados en la presente tesis este análisis de sensibilidad ha conducido a emplear para los flujos Δt desde 10^{-8} hasta 10^{-5} segundos.

Se ha probado también la implementación de otras dos modificaciones del esquema explícito “puro”, pero sin resultado positivo. La primera de ellas consistía en considerar de manera simultánea el flujo por los diversos conductos que nacen en un “ente” (esquema “implícito de línea”). Conducía al planteamiento de un sistema de ecuaciones, con lo cual se perdía la principal ventaja del método: su carácter explícito. La segunda modificación estudiada fue la de avanzar con varias iteraciones dentro de un mismo incremento de tiempo (por ejemplo, cuatro iteraciones). En este caso se ha encontrado que utilizar un incremento de tiempo de una cuarta parte sin iterar es tan efectivo como usar cuatro iteraciones, para igual esfuerzo de cálculo, consumiendo menos memoria y siendo incluso más sencillo de programar.

En las subrutinas que aparecen en la figura 5.16 se desarrollan los flujos de acuerdo a los principios indicados en el epígrafe 3.3. A continuación se describe sucintamente como se han particularizado algunos de valores que aparecen en las ecuaciones de flujo de dicho epígrafe en función de la geometría del modelo establecida en 5.2.

La ecuación 3.5 (flujo de aire entre dos poros) está basada en la fórmula de Poiseuille. El radio equivalente del conducto entre poros es igual a:

$$R_{eq} = \sqrt{\frac{A_{eq}}{\pi}} \quad (5.5)$$

El área equivalente del conducto es un área por encima y por debajo del menisco que une y separa a ambos poros. Dicha área transversal estará contenida en un plano perpendicular al del modelo (ver figura 5.14). Haciendo una cierta trasposición de dicho plano perpendicular por el del mismo modelo, se ha considerado:

$$A_{eq} = \frac{AHP_i + AHP_j}{2} \quad (5.6)$$

siendo AHP_i y AHP_j las áreas libres de los poros (i y j) origen y final del flujo (área rayada en la figura 5.4 igual al área total del poro i o del poro j en el plano del modelo, descontando los sectores correspondientes de partículas y meniscos).

La longitud equivalente, l_{eq} , que aparece en la misma fórmula 3.5 se ha igualado a la distancia entre los centros de gravedad de los poros i y j , multiplicado por un factor ponderador (FPOISE= 0.5). Ambos valores también se utilizan en la ecuación 3.6.

En las ecuaciones 3.14 y 3.17 ("flujo" de aire y vapor a través de la interfase), se considera que el intercambio a través de la interfase se hace sólo por la mitad de esta que corresponde al poro, por lo que A_{LAT} será igual a la mitad del área de la interfase, A_L , que se calcula en la subrutina VOLMEN de acuerdo al anejo A2.

Para el flujo entre meniscos, en la figura 5.17 se definen los valores adoptados para l_c y l_T (ecuaciones 3.18 y 3.19).

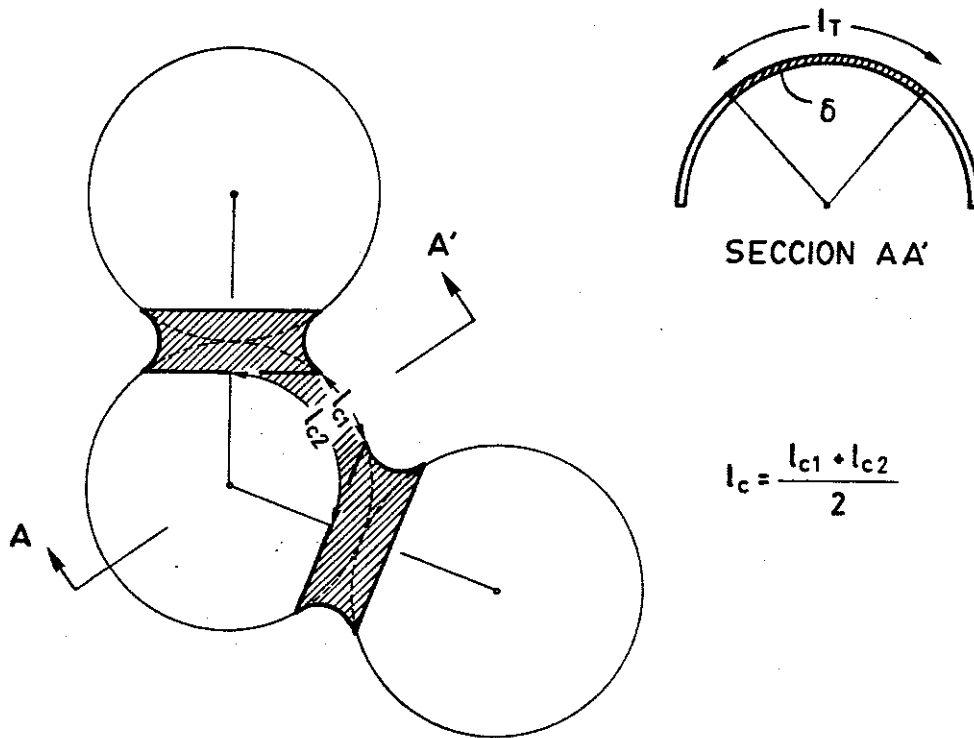


FIGURA 5.17.- Geometría de la película adherida a través de la cual se desarrolla el flujo entre dos meniscos.

Los valores utilizados para las constantes físicas de las ecuaciones de flujo han sido los siguientes:

Tensión superficial del agua (σ_s)	$7.42 \cdot 10^{-5} \text{ Kp/cm}$
Constante de Henry (C_H)	$6.64 \cdot 10^4 \text{ Kp/cm}^2$
Constante cinética de disolución aire en agua (β_H)	$8.9 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$
Constante cinética de paso a vapor (K_{VAP})	$5 \cdot 10^{-5} \text{ g/Kp.s}$
Viscosidad del agua (η_w)	$1.005 \cdot 10^{-2} \text{ poise}$ ($\text{poise} = \frac{\text{g}}{\text{cm}\cdot\text{s}}$)
Coefficiente de difusión del aire disuelto en agua (D_{ad})	$2 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$
Viscosidad del aire (η_a)	$1.8 \cdot 10^{-4} \text{ poise}$
Constante universal de los gases (R_u)	$8.206 \cdot 10^{-2} \frac{\text{at l}}{\text{°K mol}}$
Temperatura absoluta (T_a)	293.16° K

Coefficiente de difusión del vapor en aire (D_{vap})	$0.239 \text{ cm}^2/\text{s}$
Presión de vapor de equilibrio ($p_{vap,eq,0}$)	$2.3 \cdot 10^{-2} \text{ Kp/cm}^2$

Algunos de estos valores se pueden encontrar discutidos en Fredlund (1976), Dorsey (1968), Weast (1974), Hilf (1956).

El espesor de la película adherida se ha determinado según la ecuación 3.4, con $C_K = 2.5 \cdot 10^{-3}$. Todos estos valores forman parte del archivo de datos constantes de flujo (BAL9CTE.DAT, ver anejo A3).

5.3.2 MODULO MECANICO

El Módulo "mecánico" se corresponde con el programa fuente HERCU (ver anejo A3). Calcula las fuerzas sobre las partículas obteniendo los desplazamientos de las mismas, dentro de un incremento de tiempo "mecánico" (TINCM).

A modo de resumen de las fuerzas básicas de interacción que se pueden distinguir en el contacto entre dos partículas en función de su posición relativa en un instante determinado, se presenta la figura 5.18. En ella la línea a trazos representa al menisco y la fuerza de atracción en que se traduce su presencia (F_w , que se ha estudiado en el capítulo 4 y en el anejo A2). La fuerza normal N por contacto físico puede relacionarse con el acercamiento normal relativo (D_N) a través de un coeficiente K_N en carga (y opcionalmente otro K_D en descarga). Las partículas mantienen en el modelo su forma esférica, a pesar de estar en contacto. Esto significa que sus intersecciones con el plano del modelo no dejan de ser círculos. D_N , acercamiento entre los centros de las partículas coincidirá con el solape entre los círculos de las dos partículas (ver figura 5.19). En descarga, una vez la fuerza N ha reducido su valor a cero ($D_N \leq D_{N,D}$), se mantiene el contacto con $N = 0$, a pesar de que el solape entre círculos es no nulo. Al llegar a $D_N = 0$ el contacto físico quedaría roto, y un hipotético nuevo acercamiento volvería a la rama K_N . El área rayada corresponde a la energía disipada en un ciclo como el descrito. En primera aproximación se han

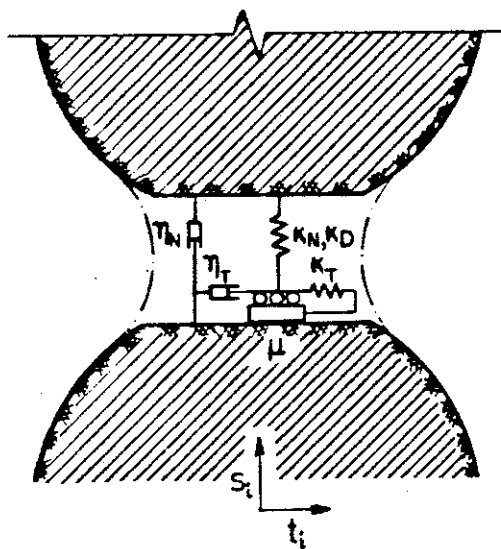


FIGURA 5.18 .- Representación esquemática del comportamiento reológico del contacto entre partículas.

considerado coeficientes K_N constantes que como se ha dicho equivale a rectas a 45° en la figura 3.11.

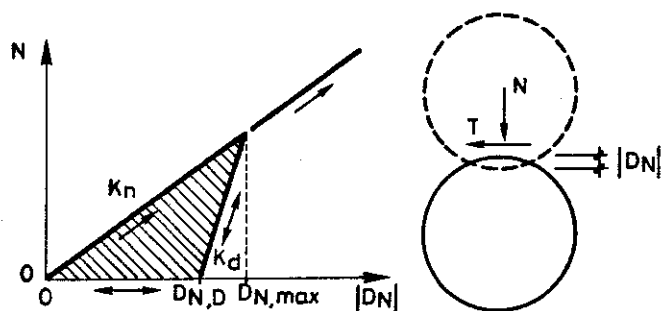


FIGURA 5.19 .- Fuerza mecánica normal en el contacto entre dos partículas si existe solape (en esta situación de "sobre-contacto", la "distancia entre partículas" es negativa, según convenio del anejo A2).

El coeficiente K_T haría lo propio para la fuerza tangente, T , antes de llegar a deslizamiento tangencial, cuando aquella superare el valor de la fuerza normal multiplicada por el coeficiente de fricción (μN). Las fuerzas viscosas N_η y T_η están representadas por unos amortiguadores de constantes η_N y η_T que también actúan aunque el contacto experimente deslizamiento tangencial o no exista solape físico entre partículas. Las velocidades relativas normal y tangencial se hallan a partir de las velocidades absolutas de las dos partículas en un instante determinado, según principios básicos de Mecánica que se pueden encontrar por ejemplo en Cundall y Strack (1979 a).

En resumen, si consideramos positivas las fuerzas hacia la partícula, el contacto "i" de la figura 5.18 transmite a la partícula inferior las siguientes fuerzas totales en el sentido normal y tangencial:

$$\begin{aligned} (N + N_\eta - F_w) (-\vec{s}_i) \\ (T + T_\eta) (-\vec{t}_i) \end{aligned} \quad (5.7)$$

Al reducirlas al centro de la partícula, la fuerza tangencial producirá un momento de giro. La fuerza debida al agua, fuerza capilar F_w ha sido definida en signo y magnitud en el anejo A2.

Como se ve el contacto está pues esquematizado por un comportamiento tipo Kelvin-Voigt, con posibilidad de deslizamiento friccional en el sentido tangente. Adicionalmente, sobre cada partícula actuará una fuerza amortiguadora proporcional a su velocidad absoluta, y el peso propio si actúa la gravedad.

En la figura 5.20 se incluye un organigrama esquemático de este módulo mecánico. Las subrutinas que se indican se dedican a determinar las fuerzas descritas anteriormente. Adicionalmente, sobre las partículas del contorno actuará la carga exterior aplicada (tensor de tensiones de 2×2 , σ_{ij}). Está definido en términos absolutos (en ausencia de carga será isotrópico igual a una atmósfera). Al estar definida la presión de los poros del contorno (PGCOP), la carga neta transmitida al esqueleto a través de un segmento de contorno, de normal \vec{n} , entre dos partículas sucesivas del mismo (l y m) es:

$$ESPZ \cdot d(l, m) \cdot [\sigma_{ij} - \delta_{ij} \cdot (PGCOP)] \cdot n_j \quad (5.8)$$

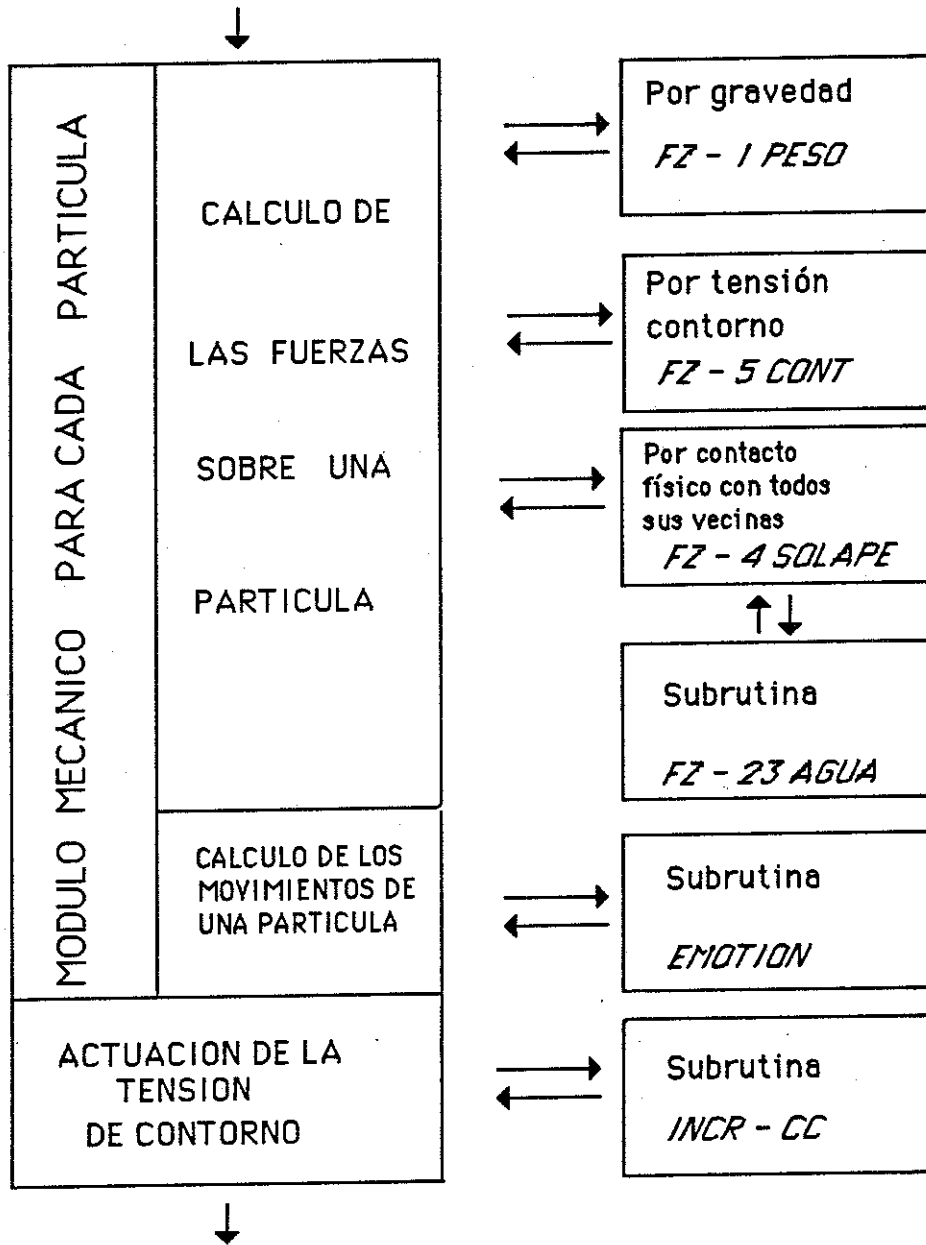


FIGURA 5.20 .- Esquema del Módulo Mecánico, indicando las principales subrutinas.

(el índice repetido j indica sumatorio), que se reparte por mitades entre ambas. En un "run" es posible ir variando uniformemente el tensor de tensiones (σ_{ij}) aplicado sobre el contorno de la muestra, de acuerdo a unas "velocidades" (variación de la tensión por unidad de tiempo) especificadas para cada una de sus componentes en el archivo de datos. Así se pueden simular cargas y descargas isotrópicas o con desviador, con ejes principales constantes o rotando, etc. Tras el ciclo mecánico se actualiza dicha tensión de contorno en la subrutina INCR_CC.

Al conocer todas las fuerzas que actúan sobre una partícula se puede hallar la resultante (Subrutina EMOTION). Bajo la acción de esta fuerza no equilibrada (F , M) la partícula (m , I) adquirirá una aceleración instantánea (\ddot{r}_B , $\ddot{\theta}_B$)

$$\begin{aligned} F &= m \cdot \ddot{r}_B \\ M &= I \cdot \ddot{\theta}_B \end{aligned} \tag{5.9}$$

Dicho valor de la aceleración será válido en tanto en cuanto la resultante no varíe excesivamente por el efecto mismo del movimiento: Será necesario avanzar con Δt pequeños. Con un esquema de integración centrado en el tiempo, se podrá actualizar la velocidad y luego la posición de la partícula. El esquema centrado en el tiempo (ver por ejemplo Cundall y Strack, 1979 a) da resultados exactos para el desplazamiento si la aceleración varía linealmente con el tiempo, aunque da buenos resultados en caso de aceleraciones parabólicas o sinusoidales en el tiempo, siempre que el Δt sea adecuado.

Si, por movimientos de las partículas a lo largo del ciclo se crea o se destruye algún contacto, se acude al módulo de chequeos donde se efectúan los cambios lógicos correspondientes.

En el aspecto mecánico del problema también se ha aplicado la técnica de la "actualización inmediata".

En el "D.E.M." original, en un instante dado se calculan las resultantes de fuerzas sobre todas las partículas a partir de los solapes entre ellas en esa situación. Sólo tras completar la "pasada" se actualizarán velocidades y posiciones de las

partículas, finalizando el ciclo. En el módulo mecánico implementado se procede a "mover" la partícula tras el cálculo de la resultante de fuerzas sobre ella. Esto puede favorecer la estabilidad del esquema en algunas ocasiones. Nuevamente se ha usado el "inicio aleatorio" de los bucles sobre las partículas, para compensar la posible preferencia introducida por la actualización.

A pesar de ello si se utiliza un incremento de tiempo excesivo el esquema resultará inestable. El programa se interrumpirá debido a que los desplazamientos de las partículas serán excesivos y no se corresponderán con los algoritmos de cálculo. Se deberá reducir como mínimo en un orden de magnitud el TINCM hasta que sea estable y a partir de ahí se deberá tantear el definitivo a utilizar para garantizar el ajuste temporal.

El citado ajuste temporal de la evolución global de la muestra estará muy relacionado con el ajuste al comportamiento del contacto entre partículas. Si pensamos en un choque de pequeña duración entre dos de ellas, para obtener una buena descripción de la indentación y separación posterior, un esquema explícito deberá distinguir varios incrementos (un mínimo de 5 ó 10 Δt según Walton, 1982). Como el rebote es más súbito (menor duración temporal) cuanto mayor es el "coeficiente de rigidez" (K) del contacto, a mayor K deberemos usar menor Δt .

En efecto, un orden de magnitud indicativo del incremento de tiempo "crítico" puede estimarse a partir del comportamiento de un sistema de un grado de libertad (masa oscilando libremente con un muelle) con la "rigidez" K del contacto y la masa de una partícula (m). Se demuestra teórica y numéricamente que al estudiar dicho sistema con un esquema explícito de integración por diferencias finitas el incremento de tiempo estable a usar debe ser menor que

$$\Delta t_{CRITICO} = 2 \sqrt{\frac{m}{K}} \quad (5.10)$$

es decir el período propio de oscilación dividido por π . Si se cuenta con varias masas y rigideces, en principio deberá particularizarse la fórmula anterior con la menor m y la mayor K del sistema, para obtener el menor de los incrementos de tiempo críticos. Aquí conviene resaltar otra razón de tipo numérico para la utilización de coeficientes K_N constantes: en caso contrario una relación fuerza- desplazamiento

no lineal conduciría a rigideces aparentes crecientes con la deformación, y variables de un contacto a otro; siempre podrá haber una K aparente atípicamente alta que obligue a usar Δt excesivamente bajos.

Barbat(1982) o Cundall(1978) aconsejan tomar una fracción de ese $\Delta t_{CRITICO}$ como Δt adecuado. Este último autor indica que con $\Delta t_{CRITICO}/(2a5)$ en conjuntos sueltos, o con $\Delta t_{CRITICO}/10$ en una estibación o "packing" denso, se obtienen buenos resultados. La reducción de Δt por debajo de $\Delta t_{CRITICO}$ se hace por cuestión del "ajuste temporal" y también debido a que la "rigidez aparente" en cada contacto de un conjunto de partículas (con muchos grados de libertad y muchos contactos) es superior a la de un solo contacto.

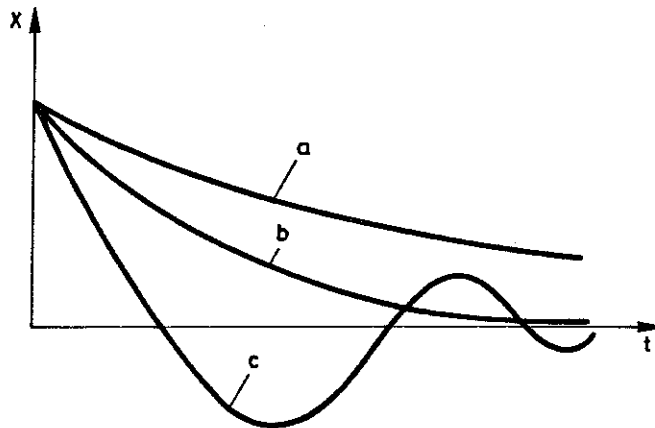


FIGURA 5.21 .- Vibración amortiguada de tipo supracrítico (a), crítico (b), e infracrítico (c).

En el mismo sistema de un grado de libertad se puede introducir un amortiguador de coeficiente η (Fuerza amortiguadora $N_\eta = -\eta \cdot \dot{x}$). En función de que η sea mayor, igual o menor a un cierto valor crítico:

$$\eta_{CRITICO} = 2 \sqrt{m K} \quad (5.11)$$

la vibración amortiguada de la masa será de tipo supracrítico, crítico o infracrítico (ver figura 5.21). En el capítulo 3 ya se aventuró como físicamente razonable un

comportamiento casi crítico en los contactos entre partículas de suelo, teniendo en cuenta la presencia de los meniscos de agua. El amortiguamiento es el medio que utiliza el esquema numérico para disipar energía; el $\eta_{CRITICO}$ es el que la disipa más rápidamente.

A modo de ejemplo en la figura 5.22 se presenta la evolución de la posición relativa de dos partículas unidas por un único menisco-contacto de este tipo. En el instante inicial se supone que ambas partículas están en contacto estricto (esferas tangentes). El menisco que existe entre ellas se traduce en una fuerza de atracción mutua F_w , que tenderá a aumentar ligeramente el solape entre ellas. D_N en efecto converge hacia un valor de equilibrio, de forma amortiguada gracias a la fuerza N_η . F_w varía sólo muy ligeramente con el movimiento. En el equilibrio final es necesario que la fuerza total (ecuación 5.7) transmitida por el único contacto sea nula: N_η vale cero en efecto, y N (por solape físico) iguala a F_w (por acción del menisco).

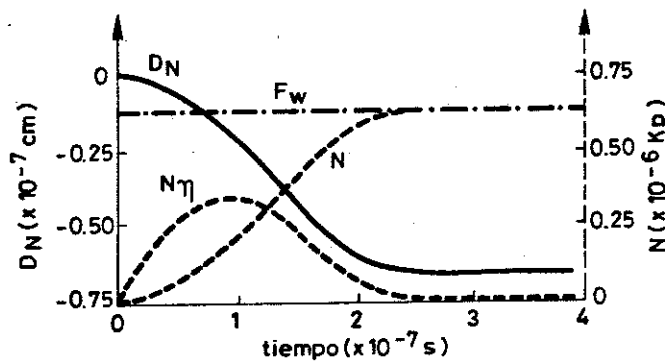


FIGURA 5.22 .- Evolución de la posición relativa de dos partículas (de radio 0.015 mm y densidad 2.6 g/cm³) unidas por un único menisco-contacto, a partir de una situación inicial de contacto estricto ($K_N = 10 \text{ Kp/cm}$, $\Delta t = 2 \cdot 10^{-9} \text{ s}$, $\eta_N = 1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Kp}}{\text{cm/s}}$).

Los valores de los coeficientes se incluyen en la figura y se discutirán más adelante. Lo que interesa resaltar es que el comportamiento amortiguado sin

oscilaciones parece adecuado en este caso.

En el sistema de un grado de libertad bajo oscilación amortiguada el aumento del amortiguamiento conduce a trayectorias (x, t) más “controladas”. Podría pensarse que al aumentar η en un esquema numérico explícito centrado en el tiempo se favorece la estabilidad del esquema. Sin embargo es justamente al revés. En el esquema citado las velocidades se calculan normalmente con un desfase de medio incremento de tiempo. Si se utiliza esta velocidad para calcular la fuerza amortiguadora se comete un error, mayor cuanto mayor sean el coeficiente de amortiguamiento y el incremento de tiempo usado. Por este motivo si se “utiliza” amortiguamiento se ha de imponer que ese error sea pequeño en relación a la fuerza total, resultando una condición adicional, del tipo

$$\frac{\eta \Delta t}{4 m} < TOL \quad (5.12)$$

donde TOL será un valor que dependerá del esquema concreto que se utilice. Esta expresión nos relaciona inversamente a η e Δt . Si no se considera amortiguación ($\eta = 0$) la condición se cumplirá siempre, y en caso contrario a mayor amortiguamiento el esquema deberá avanzar con menor Δt . Suponiendo que se utiliza un incremento de tiempo fracción f del $\Delta t_{CRITICO}$ (sin amortiguamiento) de la ecuación 5.10, y un amortiguamiento ε veces el $\eta_{CRITICO}$ de la expresión 5.11, la condición 5.12 queda:

$$\varepsilon \cdot f < TOL \quad (5.13)$$

Para el esquema explícito implementado en el Módulo Mecánico (Programa HERCU) se ha determinado que en el contacto entre dos partículas:

- Para obtener resultados estables $TOL \simeq 0.41$ (aunque resultan oscilantes alrededor de la solución “exacta”).
- Para obtener resultados no oscilantes $TOL \simeq 0.25$.
- Para obtener resultados ajustados temporalmente a la solución exacta $TOL \simeq 0.08$.

En concreto para obtener resultados ajustados temporalmente a la solución exacta con el amortiguamiento crítico ($\varepsilon = 1$) normalmente usado debe emplearse un $\Delta t \simeq 0.08 \cdot \Delta t_{CRITICO}$, incluso para dos partículas. Nuevamente será necesario reducirlo aún más al estudiar conjuntos de partículas.

La elección de los coeficientes que se correspondan con el material es siempre importante en un modelo desde un punto de vista de comportamiento físico del mismo, pero también tiene consecuencias numéricas: por ambos motivos se convierte en una decisión importante y delicada. Aunque en diversas referencias se discuten distintas maneras de seleccionar estos valores en problemas concretos (Strack y Cundall, 1978; Walton, 1982; Ohnishi et al, 1985), pocas veces se citan de modo explícito algunos que tengan significado físico claro y generalmente se adoptan conjuntos de valores que dan estabilidad al esquema numérico junto con resultados globales más o menos razonables.

En el presente trabajo se ha hecho un especial esfuerzo en relacionarlos con las propiedades del contacto y del material. Un valor razonable para la densidad de las partículas, relativa a la del agua, es de 2.6 . En el epígrafe 3.4 se ha estudiado la deformabilidad de un contacto entre partículas incluyendo la existencia de asperezas superficiales. Adoptando relaciones lineales entre el acercamiento y la fuerza, y aunque se manera simplificada se puede considerar sobre la figura 3.11 o similares valores de K_N que promedien determinados rangos de tensiones. Una vez fijado ese valor, otros coeficientes pueden deducirse a partir de relaciones teóricas basadas en la teoría del contacto hertziano. La rigidez a corte K_T puede ser una fracción del anterior (ver la ecuación 3.28). Kiyama y Fujimura, citados en Ohnishi et al. (1985) obtienen buenos resultados con $K_T = S \cdot K_N$ y $\eta_T = \sqrt{S} \cdot \eta_N$, adoptando $S = 0.25$.

La rigidez en descarga K_D se ha considerado igual al doble de K_N .

Según lo visto η_N se aproximará por el amortiguamiento crítico. Dado el origen indirecto del amortiguamiento de tipo global (lineal η_{GL} y sobre el giro η_{GG}) presentado en 3.4, se puede considerar igual a una fracción relativamente reducida del amortiguamiento en el contacto, η_N . En el presente trabajo se ha adoptado igual al 10%.

Como se ha discutido en 3.4 un valor probable para el coeficiente de rozamiento de varios materiales es $\mu = 0.5$.

Fundamentalmente se han llevado a cabo dos tipos de análisis mecánicos con partículas esféricas de tamaño medio 4×10^{-3} cm (calibre limo grueso).

En el primer grupo se ha considerado que el material era cuarcítico. Según las anteriores pautas de elección de parámetros de contacto, sobre la figura 3.11 se ha adoptado $K_N = 10 \text{ Kp/cm}$ (recta a 45° promediando el tramo A-B), resultando para el resto de valores los siguientes:

$$\begin{aligned}
 K_N &= 10 \text{ Kp/cm} \\
 K_D &= 20 \text{ Kp/cm} \\
 K_T &= 2.5 \text{ Kp/cm} \\
 \eta_N &= 2 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Kp}}{\text{cm/s}} \\
 \eta_T &= 1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Kp}}{\text{cm/s}} \\
 \eta_{GL} &= 2 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Kp}}{\text{cm/s}} \\
 \eta_{GG} &= 2.4 \cdot 10^{-13} \text{ Kp cm s} \\
 \mu &= 0.5 = \tan(26.6^\circ)
 \end{aligned}
 \tag{5.14}$$

El $\Delta t_{CRITICO}$ (masa única sin amortiguamiento) según la ecuación 5.10, resulta aproximadamente de 2×10^{-7} segundos. Dado el valor relativamente alto del amortiguamiento usado en el contacto (el crítico) el incremento de tiempo finalmente adoptado para obtener movimientos "ajustados" en el tiempo para conjuntos de numerosas partículas interconectando ha sido cuarenta veces inferior ($TINCM = 5 \times 10^{-9} \text{ s}$). Para el módulo de flujos se empleó $TINCF = 5 \times 10^{-7} \text{ s}$.

En el segundo grupo de análisis, se ha supuesto partículas de material más deformable, formadas plausiblemente por agregados de otros más finos, tipo arcilla.

En este caso se han considerado los siguientes valores:

$$\begin{aligned}
 K_N &= 1.6 \cdot 10^{-2} \text{ Kp/cm} \\
 K_D &= 3.2 \cdot 10^{-2} \text{ Kp/cm} \\
 K_T &= 0.4 \cdot 10^{-2} \text{ Kp/cm} \\
 \eta_N &= 8 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Kp}}{\text{cm/s}} \\
 \eta_T &= 4 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Kp}}{\text{cm/s}} \\
 \eta_{GL} &= 8 \cdot 10^{-9} \frac{\text{Kp}}{\text{cm/s}} \\
 \eta_{GG} &= 9.6 \cdot 10^{-15} \text{ Kp cm s} \\
 \mu &= 0.5
 \end{aligned}
 \tag{5.15}$$

En este caso $\Delta t_{CRITICO} = 5 \times 10^{-6}$. El valor adoptado para el módulo mecánico ha debido ser $\Delta t = 1.25 \times 10^{-7}$ s (TINCM), aún cuatro veces inferior al del módulo de flujo ($TINCF = 5 \times 10^{-7}$ s). Los valores de 5.14 ó 5.15 forman parte del archivo de datos constantes mecánicas (HERCUCTE.DAT).

Estos incrementos de tiempo *reducidos* necesarios para llevar ordenadamente el ensayo numérico, conducen a consumir grandes tiempos de ordenador. Esto concuerda con los tiempos empleados por otros autores. Por ejemplo Estradé (1988), Vargas (1985), Ohnishi et al. (1985), Pine y Cundall (1985), usan incrementos de 10^{-2} a 10^{-8} s en problemas diversos sobre suelo y roca. Cundall y Strack (1979 b), por ejemplo, constatan que sus "run's" pueden tardar días y a veces semanas. Dentro de los métodos explícitos aplicados a otros campos, Miquel (1987) emplea $\Delta t \simeq 10^{-9}$ en la resolución de problemas de dinámica estructural, y Padró (1987) debe reducirlo a 10^{-14} en dinámica molecular. Son campos muy heterogéneos (especialmente por lo que se refiere a la entidad de las masas individuales en movimiento), pero en todos ellos se emplea un considerable esfuerzo computacional para llegar a cierto equilibrio.

La necesidad de ir avanzando "despacio" en el eje temporal también concuerda con experiencias directas sobre el comportamiento de materiales granulares en el laboratorio: los "crujidos" (emisión acústica), a veces audibles al cargar muestras de

arena, denotan que algunas partículas en su interior pueden verse sometidas a súbitos movimientos (aceleraciones altas). También en el microscopio se han podido observar estos movimientos bruscos. En un ensayo numérico la cantidad de meniscos-contacto que se crean o se destruyen es grande, del orden de millares. Muchas veces lo hacen de manera alternante o repetida, sin que el número global de meniscos-contacto varíe sustancialmente. Esta no-linealidad "geométrica" comporta tener que utilizar incrementos de tiempo muy pequeños si se ha de seguir la trayectoria individual de las partículas y sus contactos en un modelo discontinuo.

5.3.3 MODULO DE CONTROL LOGICO Y GEOMETRICO

Justamente el principal objetivo del módulo de choques y cambios geométricos es hacer los ajustes en la relación lógica entre los "entes" del modelo provocados por estas apariciones y destrucciones de meniscos-contacto. Se corresponde con el programa fuente CHEQ (ver anejo A3), y también lleva a cabo el control y los cálculos geométricos en el plano del modelo. Este módulo es relativamente complejo como lo es la casuística provocada por las "altas y bajas" de los meniscos y la subsecuente puesta al día de las matrices de "conectividad" (MB, KPN y MN) de los entes inmediatos.

En la figura 5.23 se incluye un organigrama esquemático de este módulo mecánico. Nuevamente para mayor claridad se indican sólo las principales subrutinas. (El número total de ellas sobrepasa la treintena).

El núcleo principal está constituido por la subrutina DEF_PORO. Como su nombre indica se dedica a la identificación de un poro, que como se ha descrito en 5.2 se asocia en el plano del modelo a un recinto limitado por una cadena cerrada de partículas y meniscos.

A partir de un determinado menisco "iniciador" se investiga en sentido antihorario dicha "cadena", completando la fila de la matriz KPN correspondiente al poro (ver figura 5.14). Para conocer el siguiente menisco que rodea al poro tras

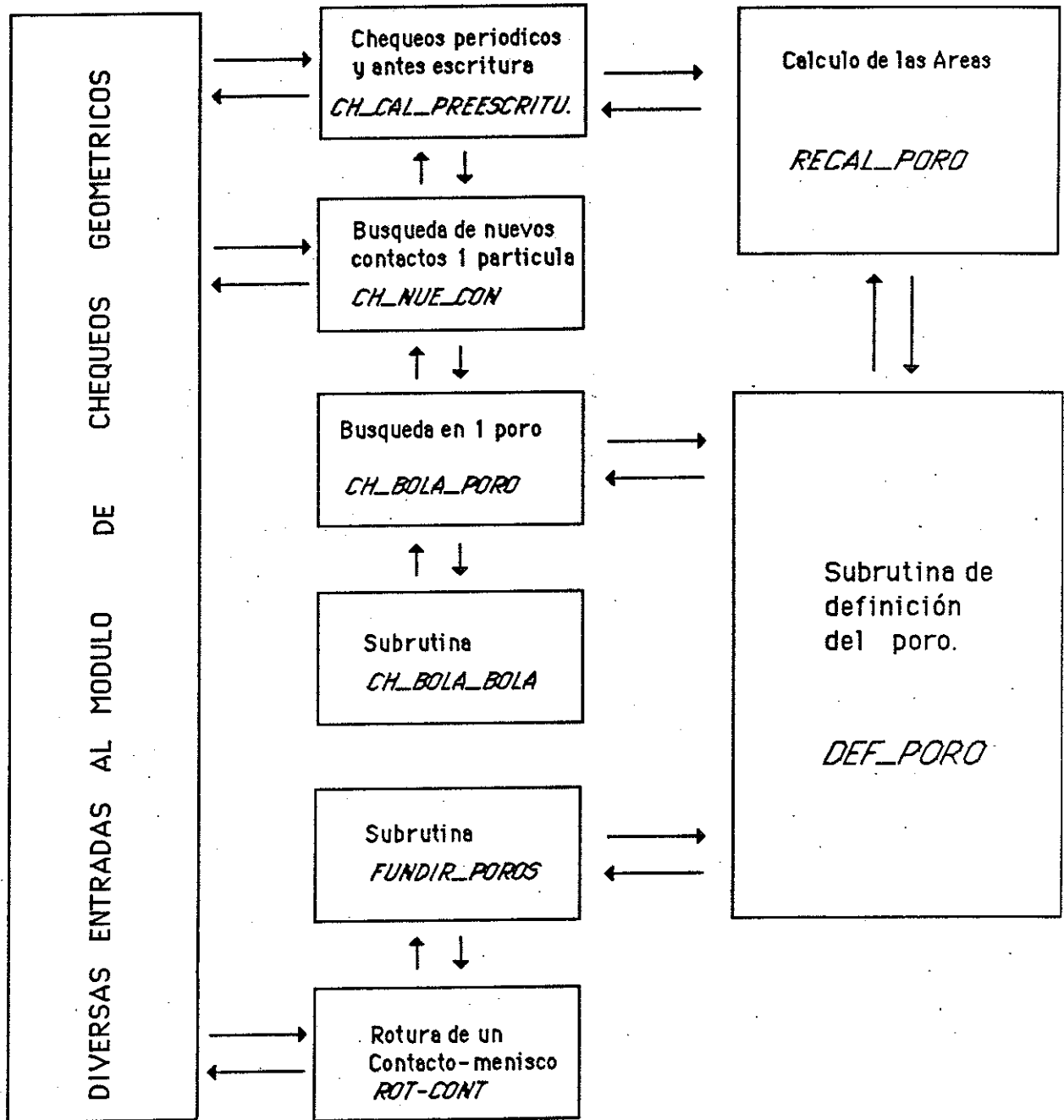


FIGURA 5.23 .- Esquema del Módulo de chequeos y cambios geométricos, indicando las principales subrutinas.

uno dado, NM, no hace falta más que determinar la partícula (NB) que soporta al menisco NM, y determinar qué menisco ocupa, dentro de la fila de la matriz MB correspondiente a la partícula NB, la posición anterior a la ocupada por el menisco NM. Se repite el proceso hasta encontrar de nuevo el menisco "iniciador", instante en el cual se "cierra" el poro. El número de casos particulares que ha de contemplar el algoritmo es grande, especialmente asociados al contorno de la muestra.

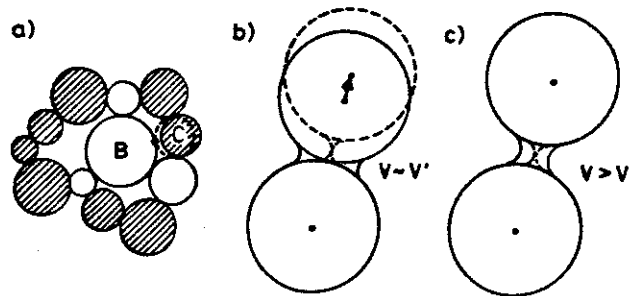


FIGURA 5.24 .- Variaciones de "conectividad" en el modelo:

- a) Creación de un nuevo contacto por movimiento de las partículas B y C.
- b) Desaparición de un menisco-contacto por separación de dos partículas.
- c) Desaparición de un menisco-contacto por agotamiento del menisco por flujo de agua.

El organigrama de la figura 5.23 es menos secuencial debido a que este módulo puede tener varias entradas por distintos cambios de conectividad. Estos pueden venir producidos básicamente por los movimientos de las esferas y por el flujo del agua de los meniscos. Una partícula crea un contacto cuando solapa de nuevo a otra (por ejemplo esferas B y C en la figura 5.24 a). Cuando ésto ocurre se debe "dar de alta" al menisco, calculando sus coordenadas, asignándole una (pequeña) cantidad de agua inicial, ingresándolo en las listas MB de las bolas B y C y, fundamental, dividir el antiguo poro en dos, separados justamente por el nuevo menisco. Todas estas operaciones se ejecutan desde la subrutina CH_NUE_CON. A ella se acude de manera puntual cuando se detecta un nuevo contacto con el Módulo Mecánico; o bien de manera "preventiva" cuando cualquier partícula varía su posición desde el último

“chequeo” un corrimiento mayor que un umbral prefijado (normalmente una fracción del radio de las partículas, por ejemplo una centésima); o bien de manera sistemática para todas ellas cuando se va a hacer una escritura de resultados parciales (subrutina CH_CAL_PREENSCRITURA).

En cualquier caso la búsqueda de nuevos contactos no se extiende por supuesto a todas las partículas del modelo. En algunos esquemas numéricos discontinuos se utiliza un subdivisionamiento del espacio merced a una malla “gruesa” que delimita unas células dentro de las cuales se buscan contactos con nuevas esferas (por ejemplo Cundall y Strack 1979 c). El presente módulo se beneficia de la existencia de las matrices de conectividad (fundamentalmente creadas para los flujos y poros): a través de los poros en los que participa la partícula B (subrutina CH_BOLA_PORO) se determinan aquellas (en número reducido, rayadas en la figura 5.24a) a las que deberá extenderse la búsqueda de nuevos contactos (subrutina CH_BOLA_BOLA).

La desaparición o rotura de un menisco también comporta variaciones de organización en el modelo (subrutina ROT_CONT). Como se ha visto en el capítulo 4 y anejo A2, un menisco puede existir aunque no exista solape entre las partículas, siempre que cuente con un volumen de agua suficiente para conformarse entre las dos esferas de manera compatible con la geometría allí definida. El menisco “romperá”: si dos partículas sufren una separación de manera tal que no puede acomodarse el volumen del menisco de manera válida (figura 5.24 b); o si por cualquier motivo el agua va fluyendo hacia otros lugares, “estrangulando” finalmente al menisco (figura 5.24 c).

Las variaciones de conectividad que se han de llevar a cabo son fundamentalmente las inversas a las de creación de menisco. En este caso al desaparecer el menisco se deberán “fundir” los dos poros que antes separaba. Las masas de aire y vapor se pondrán en común en el nuevo poro, que conserva el número de identificación menor de los dos ordinales “en fusión”. El ordinal restante deberá ser “dado de baja” de los poros activos. Cuando queda libre de esta forma un número de poro o número de menisco, dicho número pasa a una lista de espera, junto con todas las posiciones de memoria asociada: variables de coordenadas, áreas, etc. Todas estas posiciones de memoria se igualan a cero para poder detectar que esos poros o meniscos

están “vacíos” (y no efectuar flujos con ellos). Si en cualquier instante posterior se crea algún nuevo poro o menisco se consultará primero esta lista de vacantes para reutilizar esa memoria.

Un caso de rotura de meniscos que viene asociada tanto a flujo de agua de los meniscos como a movimientos de las partículas se presenta en la figura 5.25. El ejemplo afecta principalmente a tres partículas, números 5, 14 y 21 (de calibre del orden de milímetros; ver tabla A1.1).

La última está unida a las anteriores a través de sendos meniscos (números 22 y 30) conformados inicialmente bajo una succión de un par de decímetros. En esta situación (a) la fuerza capilar de los meniscos equilibra establemente el efecto de la gravedad que actúa en el sentido de la flecha. Tras una modificación de la succión especificada en el contorno (que cae a la décima parte) y debido a flujos internos, los meniscos aumentan de volumen (b). La fuerza capilar disminuye hasta tal punto que la partícula 21 empieza a distanciarse del resto provocando la reacomodación del agua de los meniscos y nuevos flujos (c). Finalmente no pueden adaptarse a la separación creciente (d) y rompen sucesivamente ambos (d y e), quedando la partícula 21 libre y acelerándose con la gravedad (f).

El contorno también introduce una especial casuística por lo que a cambios de conectividad se refiere. Cuando una partícula cruza el segmento imaginario que une a otras dos sucesivas del contorno, ella misma pasa a formar parte de él (Lista LICOB). Pero además puede introducir cambios en la definición de los poros de las inmediaciones. Estos cambios se llevan a cabo a las subrutinas CH_ABAN_CONT y CH_INGR_CONT pertenecientes al módulo de chequeos.

Por una razón u otra, los casos contemplados en el programa CHEQ son numerosos. Baste mencionar que el conjunto de algoritmos de cambios de conectividad ha sido probado con una serie de más de 50 “tests”.

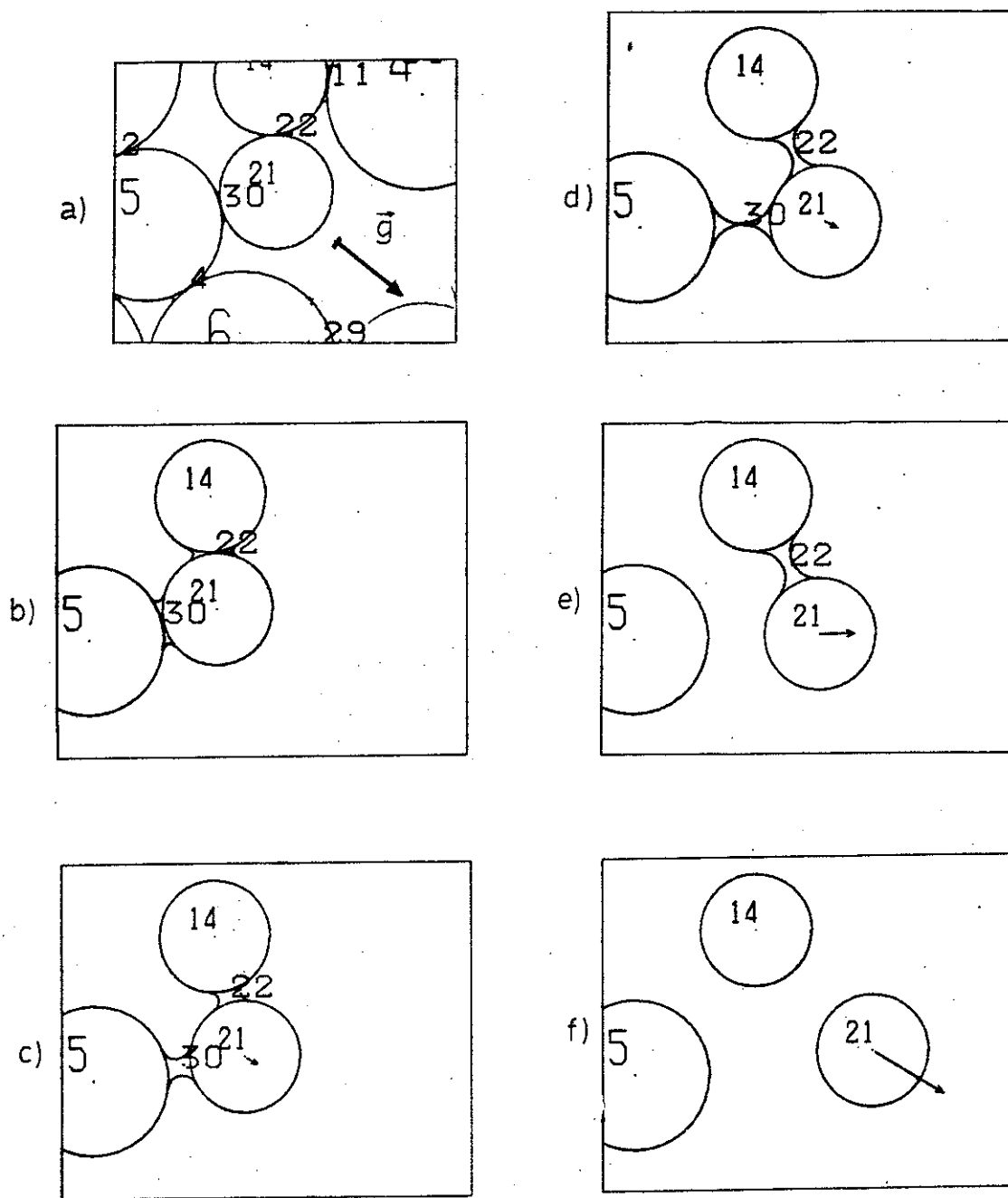


FIGURA 5.25 .- Rotura de dos meniscos inducida por variación de succión y movimiento de una partícula a favor de la gravedad (vector \vec{g} en a). En c-f se indica la velocidad instantánea de la partícula 21 (mediante un vector que tiene su origen en el centro de la partícula). El resto de partículas se han omitido para dar claridad al ejemplo.

5.3.4 ARCHIVOS DE DATOS Y POSTPROCESO

Los ensayos numéricos con el modelo pueden estructurarse en varios "run's" sucesivos, de manera que cada uno parta del punto del eje temporal al que llegó el anterior, usando sus resultados como datos. Por otro lado puede interesar en algún momento guardar un "estado" del modelo para reiniciar el mismo ensayo posteriormente; o derivar una nueva "trayectoria" (tensional y de presiones); o repetir desde ese punto varios ensayos con la misma "trayectoria" pero con distintos parámetros. Todo ello conduce a la necesidad de contar con un archivo principal de resultados (BAL9VAR.RES) que contenga toda la información necesaria para poder restituir exactamente la configuración del modelo; y que coincide con el formato (número de variables y disposición) del archivo de datos (BAL9VAR.DAT) para poder pasar de manera sencilla de uno a otro.

Estos archivos (ver anejo A3) contienen fundamentalmente información de posiciones (coordenadas de partículas, meniscos y poros); de masas en poros y meniscos (de agua, aire, vapor, etc); y de conectividades entre ellos (KPN,MB,MN,etc). En cabecera también contienen cierta información de tipo general: tiempo actual, incrementos de tiempo a usar, caso de flujos que se sigue (ICASO), número total de poros meniscos y partículas, porosidad (ENEPO), grado de saturación (GSATU) etc.

En principio, este archivo se reescribe sobre sí mismo, actualizándose la información cada IWRITE ciclos (que se especifica como dato). Aquellos "estados" que se deseen conservar deberán protegerse antes de reiniciar el ensayo numérico. Hay otro tipo de resultados de tipo "incremental" que conservan información selecta recolectada cada "IWRITE" ciclos y que constituye un poco la historia del "run" y una herramienta de seguimiento del ensayo: a voluntad se puede estudiar la evolución de posición y velocidades de determinadas partículas, de masas y presiones en poros y meniscos, etc. Estos resultados se obtienen en BAL9SEL.RES. Toda la lectura de datos y la escritura de resultados se hace con un paquete de subrutinas que se ha

llamado LEC_ES (ver anejo A3).

El "post-proceso" es el estudio de los resultados de un determinado ensayo (finales o de "estados" intermedios). Puede consistir en investigar ciertos valores del modelo o en dibujos de las situaciones geométricas dentro del mismo. En este caso la parte gráfica se considera importantísima, dada la capacidad que tiene de integrar y sintetizar gran cantidad de información. (Un archivo de resultados para un caso típico de unas quinientas partículas, mil meniscos y quinientos poros abarca unos 500 Kbytes).

El programa de postproceso DIBU (ver anejo A3) sirve para ambas cosas: para investigar valores numéricos y para hacer gráficos. Dentro de estos últimos se puede distinguir entre los dibujos sobre el plano del modelo (todo o parte de él, dibujando los "entes" a elección) y los gráficos que nos muestran los valores de una variable en función de otra: la succión en función de la distancia al centro; la frecuencia de tamaños de poros, o "porosimetría"; las fuerzas o ángulos de contacto, etc. El dibujo o la gráfica pueden obtenerse tanto por pantalla gráfica como por plotter.

Ejemplos de todo ello se verán en el siguiente capítulo.

CAPITULO 6

VERIFICACIONES DEL MODELO Y APLICACIONES A CASOS TIPICOS

El modelo conceptual de suelo no saturado que se ha enunciado en el capítulo 3 y que ha sido implementado en un modelo matemático de trabajo en el capítulo 5, debe ser calibrado, puesto a punto en un proceso de validaciones o verificaciones frente a comportamientos conocidos. Posteriormente, con el modelo calibrado se pueden simular nuevos casos.

La etapa de verificación no tiene un final concreto, debiéndose estudiar siempre críticamente los resultados del modelo. A este respecto, Scott (1987) cita la dificultad de validar los códigos numéricos de todo tipo aplicados cada vez más en condiciones de contorno y con leyes constitutivas complejas: no existe en estos casos solución analítica de comparación y tampoco pueden contrastarse con la experiencia de campo porque faltan las medidas necesarias de tensión, desplazamientos, aceleraciones, etc. Según dicho autor debe plantearse paso a paso una especie de *duda metódica*: un criterio formado y un "principio personal de la incredulidad". Jamás debe renunciarse a hacer cuantas pruebas o comprobaciones parciales se pueda sobre los nuevos resultados.

Ambas etapas (la de verificaciones con casos simples y la de aplicación del modelo a casos típicos) se presentan en este capítulo. Adicionalmente algunos ejemplos de casos simples de equilibrio (caso de 2 partículas atraídas por un menisco y caso de rotura de meniscos por acción de la gravedad) han sido incluidos en el capítulo anterior para apoyar los conceptos allí expresados.

6.1 GENERACION INICIAL, GRANULOMETRIA Y POROSIMETRIA

En el capítulo 5.2.1 se han explicado los criterios que han servido para la generación aleatoria de estados iniciales de partículas poros y meniscos en el plano del modelo, en una disposición aproximadamente circular. Allí se han incluido las generaciones correspondientes a 21 y a 592 partículas (figuras 5.12 y 5.9 respectivamente), sobre las que se han llevado a cabo la mayor parte de ensayos de flujo y deformación.

Es posible estudiar la influencia del tamaño relativo de las partículas en las configuraciones generadas y en su aspecto.

Sólo a título de ejemplo se han llevado a cabo otras cuatro generaciones aleatorias según los criterios expuestos en el apartado 5.2.1.

Según lo que allí se vió se ha adoptado: un ángulo de giro $TGIR = 100^\circ$; factor de desplazamiento, $RTRAV = 2$; factor de generación $TRIES = 50$. Los resultados se muestran en las figuras 6.1 a 6.4. Cabe resaltar como el entramado de partículas menores que une a las mayores forma en algunas zonas estibaciones de tipo hexagonal (por ejemplo, en la figura 6.4).

En las figuras 6.1, 6.2 y 6.3 el tamaño máximo de partículas es el mismo y progresivamente se van incluyendo tamaños menores. Ello resulta en un mayor "llenado" del espacio, con poros que cada vez resultan menores, así como también decrece la porosidad. En la figura 6.5 se ha "realizado" una "porosimetría" sobre las tres muestras obteniéndose la distribución acumulada de tamaños de poros. El diámetro equivalente, D_{eq} , en abcisas sería el de aquella esfera con igual volumen que el "real" del poro, no esférico. Para cada diámetro equivalente, en ordenadas se calcula la suma de volúmenes de todos los poros que lo tienen mayor, dividido por el volumen total de poros. Esta curva acumulada, que contiene mayor información que la porosidad, va desplazándose efectivamente hacia la izquierda para las muestras de

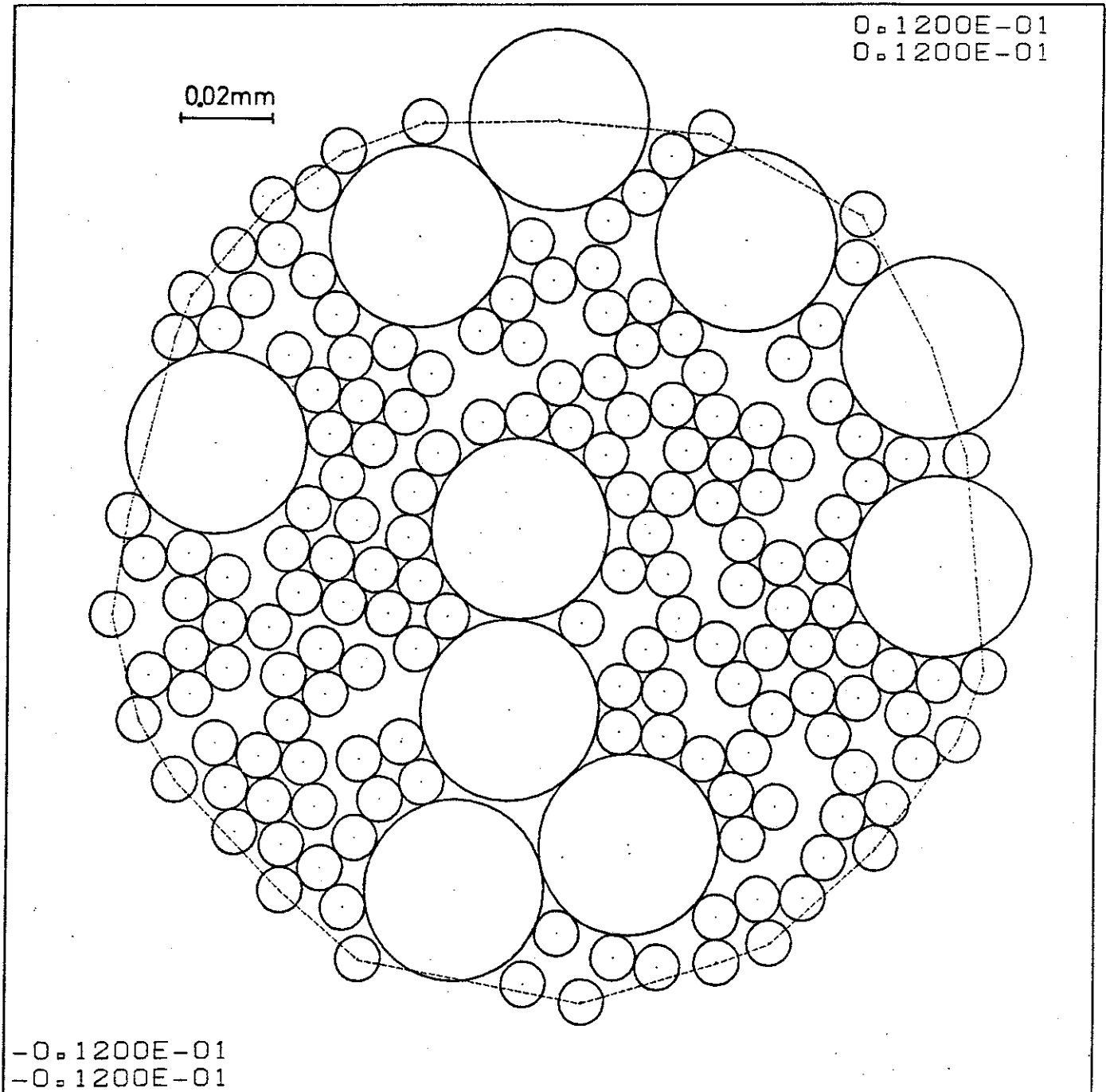


FIGURA 6.1 .- Generación de 175 partículas dentro de un recinto circular de $R_{MAX} = 0.1$ mm. Por diámetros: 10 de 0.04 mm; 165 de 0.001 mm. Presentan 277 contactos-menisco y delimitan 124 poros. Porosidad resultante (en volumen) $n = 0.684$

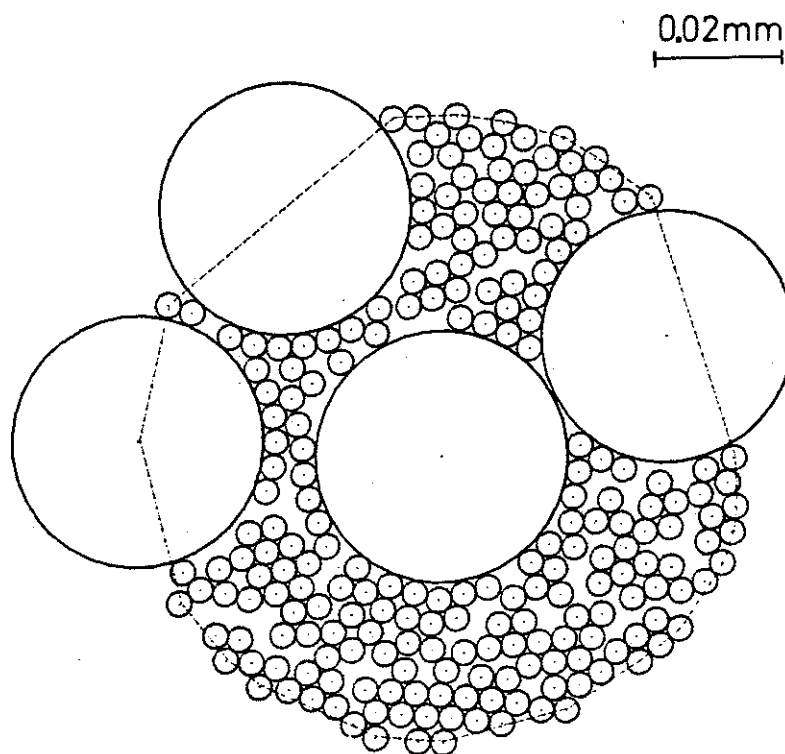


FIGURA 6.2 .- Generación de 223 partículas dentro de un recinto circular de $R_{MAX}=0.005$ mm. Por diámetros: 4 de 0.04 mm; 219 de 0.004 mm. Presentan 367 contactos-menisco y delimitan 164 poros. Porosidad resultante (en volumen) $n= 0.670$

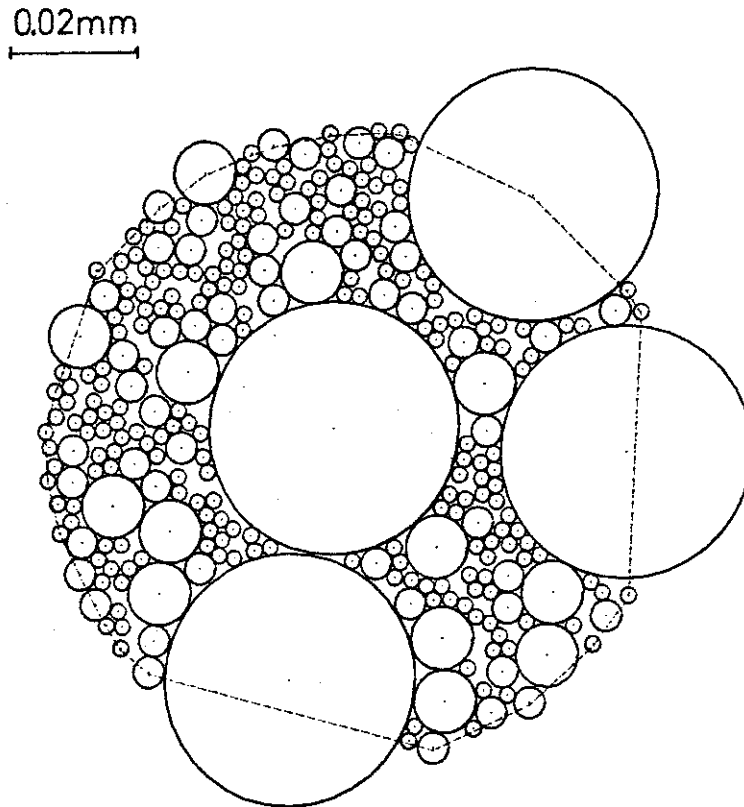


FIGURA 6.3 .- Generación de 292 partículas dentro de un recinto circular de $R_{MAX} = 0.05$ mm. Por diámetros: 4 de 0.04 mm; 13 de 0.01 mm; 52 de 0.005 mm; 223 de 0.0025 mm. Presentan 496 contactos-menisco y delimitan 227 poros. Porosidad resultante (en volumen) $n = 0.651$

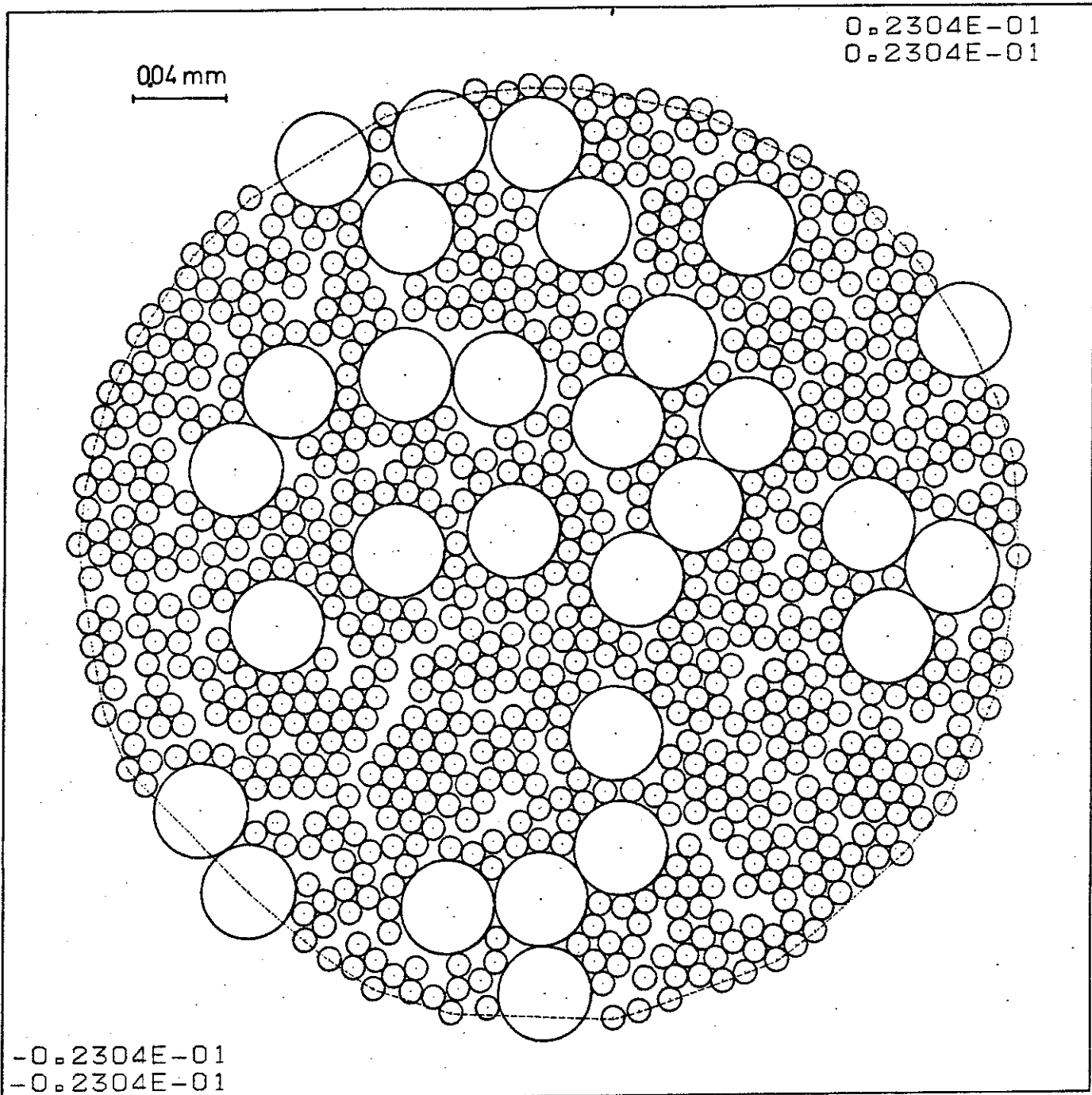


FIGURA 6.4 .- Generación de 811 partículas dentro de un recinto circular de $R_{MAX} = 0.2$ mm. Por diámetros: 29 de 0.04 mm; 782 de 0.01 mm. Presentan 1388 contactos-menisco y delimitan 605 poros. Porosidad resultante (en volumen) $n = 0.70$

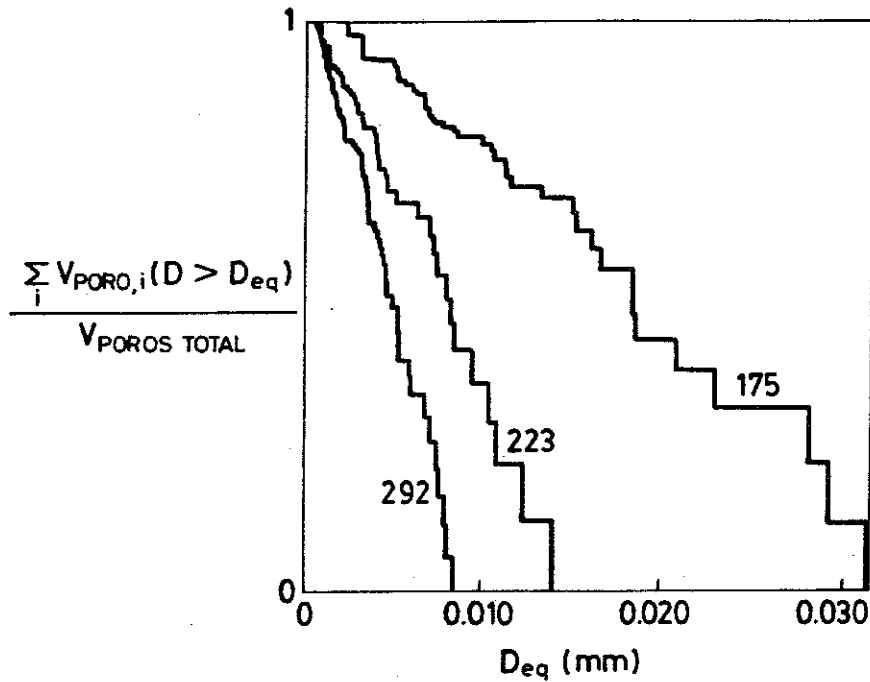


FIGURA 6.5.- Porometrías (explicaciones en el texto).

175, 223 y 292 partículas. Para la muestra de 811 partículas no se ha incluido por motivos de claridad, dado que es muy similar a la de 175 partículas.

Por otro lado la inclusión de tamaños menores comportará que la influencia de la succión sea mucho mayor. Como se cita en el anejo A1, el efecto neto equivalente del agua, σ_w , aumenta al disminuir el tamaño. El efecto del agua a succión será superior si dos partículas mayores (tipo arena fina) están unidas por un entramado de otras menores (tipo limo, ver figura 2.8b), que si ambas partículas estuvieran unidas directamente por un menisco de agua (Figura 2.8a). Como ya se ha dicho en el capítulo 2, el efecto aún sería mayor si los poros menores entre las partículas pequeñas se encontraran saturados de agua a succión.

6.2 ENSAYOS DE FLUJO

En el grupo de ensayos que se presentan en este epígrafe se ha centrado la atención en el aspecto de *flujo* del modelo. En la mayor parte de ellos se han mantenido las partículas sin moverse (ICASO=0).

6.2.1 ENSAYO DE FLUJO SOBRE 9 PARTICULAS

El conjunto de nueve partículas, veinticuatro meniscos y dieciseis poros que aparece en la figura 5.5 sirvió para poner a punto el módulo de flujos del programa principal. Coincide con la configuración de nueve partículas que utilizan Cundall y Strack (1979a) como prueba de calibración de su "D.E.M.", a las que se ha añadido una cierta cantidad inicial de agua (10^{-10} cm^3) en cada menisco alrededor de los contactos entre ellas y con las paredes.

Este "ensayo" se ha usado básicamente para estudiar comparativamente las modificaciones que se han introducido (o no) sobre el esquema puramente explícito aplicado a flujo, que se han comentado en el capítulo 5 y en el apartado 5.3.1. (esquema implícito o explícito; "flujo exponencial"; "actualización inmediata"; "inicio aleatorio"; implícito de línea; iteración dentro de un mismo incremento de tiempo; aumento progresivo del incremento de tiempo usado; etc.), y cuyo detalle desbordaría los objetivos del presente documento.

A la par se ha usado para determinar el incremento de tiempo adecuado para obtener resultados *ajustados* a la solución "exacta". La situación inicial (de igual volumen de agua en los 24 meniscos) se traduce en distinta deficiencia de presión de agua en los meniscos interiores y los meniscos exteriores (partícula-pared). Al iniciarse el ensayo, los flujos (de acuerdo a los parámetros recogidos en el epígrafe

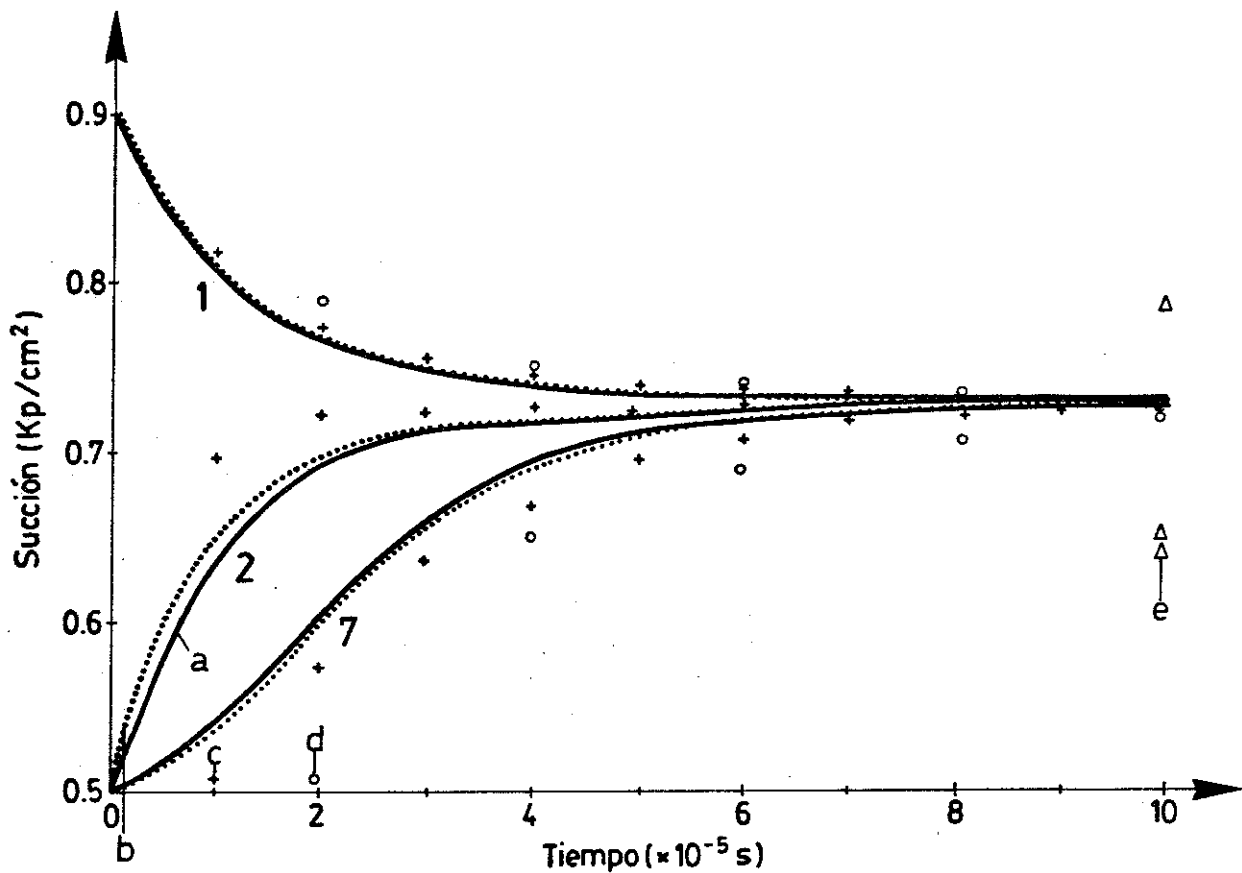


FIGURA 6.6 .- Evolución de la succión en los meniscos 1, 2 y 7 en el ensayo de flujo sobre nueve partículas.

a: solución "exacta"

b: $\Delta t = 10^{-6} s$

c: $\Delta t = 10^{-5} s$

d: $\Delta t = 2 \cdot 10^{-5} s$

e: $\Delta t = 10^{-4} s$

5.3.1) tienden a cancelar la diferencia de succiones. Este ensayo es "no drenado", en el sentido de que no hay intercambio de masa de agua o de aire con el exterior, aunque sí interiormente. En la figura 6.6 se incluyen los "tanteos", con Δt decrecientes, sobre la evolución de las succiones en los meniscos 1, 2 y 7 (ver figura 5.5). Se ha escogido la succión como variable de análisis de sensibilidad porque es la que tiene una influencia más directa en el comportamiento mecánico, que es en última instancia el de interés

final. Como solución "exacta" se ha adoptado la solución numérica obtenida con un incremento de tiempo de 10^{-9} s por ciclo de flujos, a falta de ninguna solución analítica para el problema.

Todo el resto de soluciones numéricas convergen con mayor o menor rapidez a la situación de equilibrio (presión de agua $\simeq 0.271$ Kp/cm^2 ; succión $\simeq 0.729$ Kp/cm^2); a partir de Δt menores de 10^{-6} s se puede considerar el ajuste temporal como suficientemente bueno. Y así se han adoptado valores de ese orden tanto para este caso de situación inicial altamente no estacionaria, como en otros casos en los cuales la no-linealidad pueda ser mayormente de tipo geométrico.

6.2.2 ENSAYO DE FLUJO SOBRE UNA "COLUMNA" DE 100 PARTICULAS

El conjunto de cien partículas, 197 meniscos y 98 poros que aparece en la figura 5.5 se ha usado para llevar a cabo un ensayo numérico simulando los de laboratorio denominados de "columna de suelo". En este caso la columna es de reducidas dimensiones y está dispuesta horizontalmente. Las condiciones de contorno en el ensayo son "abiertas", especificándose una presión de fluidos en ambos extremos: presión atmosférica para la fase gaseosa; presión de agua igual a 0.5 Kp/cm^2 en el menisco 1, y 0.272 Kp/cm^2 en el menisco 197.

Los parámetros de flujo utilizados corresponden a los recogidos en el epígrafe 5.3.1. El incremento de tiempo usado en el esquema numérico ha sido de 10^{-5} s. Otros detalles del ejemplo pueden encontrarse en Gili (1986).

El "ensayo" cuenta con dos partes diferenciadas: una primera de "estabilización de flujo" y una segunda de "inoculación".

En la primera, a partir de una situación inicial no en equilibrio, y mediante flujos internos e intercambio de masa con el exterior, la muestra evoluciona hasta un

estado estacionario, con flujo constante entre los meniscos extremos a través de la muestra, de acuerdo a la condición de succión controlada impuesta. Cada menisco adopta un volumen de acuerdo con lo anterior. Este proceso se ha llevado desde el instante $t=0$ hasta $t=0.2$ s, momento en el cual se ha considerado alcanzada la estabilización (dinámica) de flujo de agua. El grado de saturación de la columna en ese estado ronda el 15%, teniendo en cuenta el agua de los meniscos y la que recubre las partículas en forma de "films". En la figura 6.7 se puede apreciar la distribución de succiones para varios instantes de tiempo a lo largo de la columna. En un primer instante entra agua por los dos extremos de la columna ($L=0$ y $L=1$); posteriormente el flujo en $L=1$ se invierte; hasta que al final, en condiciones estacionarias, el caudal de agua que entra por $L=0$ es igual al que sale por $L=1$ (aprox. $Q = 3.25 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{s}$).

Esta situación estabilizada es un tanto irreal, por cuanto la diferencia de presiones que se ha impuesto entre los extremos de la muestra es excesiva para su exigua dimensión, resultando un gradiente hidráulico, I , superior al millar. Presumiblemente en estas condiciones el flujo no se correspondería en absoluto con las sencillas leyes lineales planteadas en el capítulo 3 y 5, ni el esqueleto sólido podría permanecer inmóvil. La velocidad de flujo resultante de dividir el caudal Q por la sección recta de la columna (aproximadamente $4 \cdot 10^{-3} \text{ cm} \times 3.5 \cdot 10^{-3} \text{ cm}$) resulta por lo mismo, excesiva: $q \simeq 2.38 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$ (velocidad tipo Darcy, distinta a la real del agua).

Sin embargo el cociente entre ambos valores (q/I) sí que puede dar una estimación de la permeabilidad efectiva o equivalente (K_e) del modelo de suelo no saturado descrito. Resulta $K_e \simeq 2 \cdot 10^{-6} \text{ cm/s}$. Este valor, que es moderado, encaja en orden de magnitud con los valores esperados para este "material". Para limos saturados y arenas limosas las permeabilidades pueden ser típicamente de 10^{-3} a 10^{-4} cm/s (Jiménez Salas y Justo, 1975). La K_e determinada para el modelo sería de 2 a 3 órdenes de magnitud menor; los trabajos de Topp y Miller (1966), por ejemplo, sobre la permeabilidad de una muestra de balines de vidrio a varias saturaciones también sugieren cambios de ese estilo entre el estado saturado y el no saturado. En dichos ensayos, para un grado de saturación del 10%, resulta una permeabilidad aproximada de $5 \cdot 10^{-6} \text{ cm/s}$. Otros investigadores, en otros materiales ya más arcillosos, encuentran también ese cambio de 2 ó 3 órdenes de magnitud en

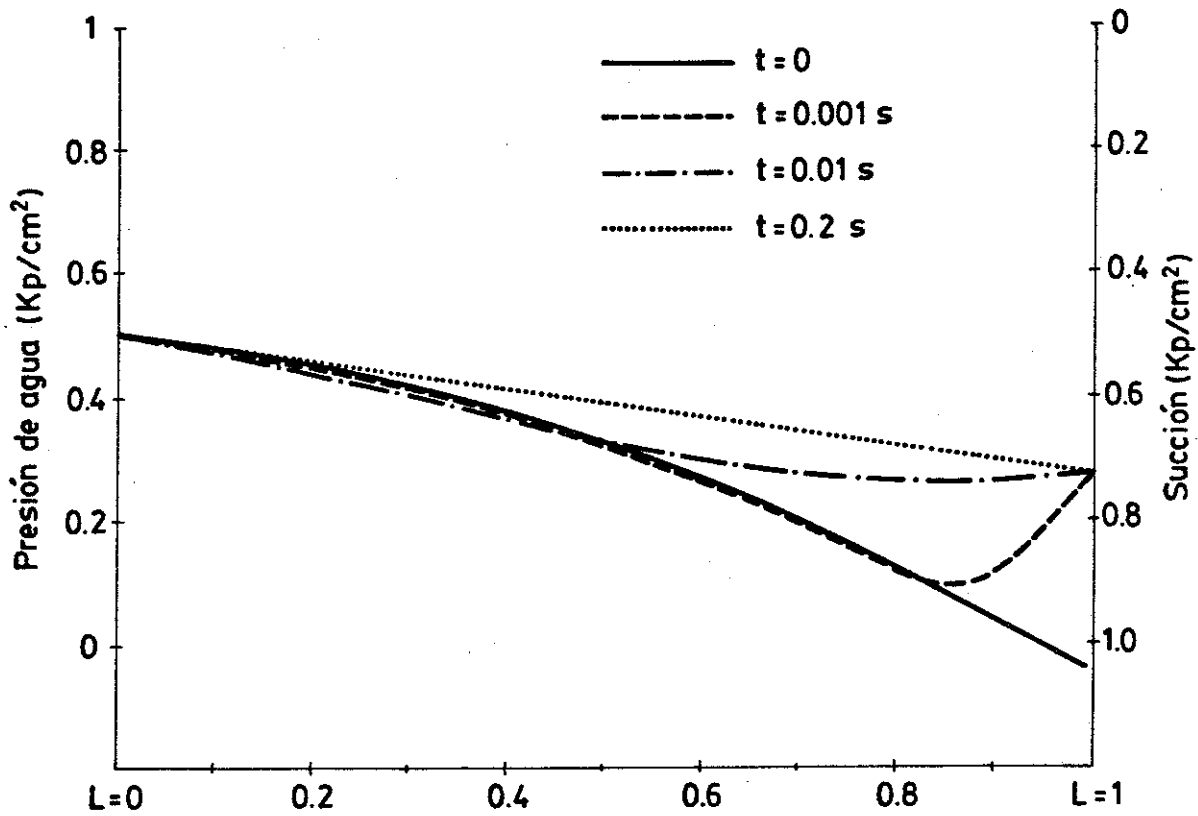


FIGURA 6.7.- Distribución de succiones a lo largo de la columna para los instantes $t=0$, $t=0.001$ s, $t=0.01$ s y $t=0.2$ s.

la permeabilidad al variar S_r de 100% a ~10% (por ejemplo Nakano et al, 1986 o Grismer et al 1986a).

Para el valor de K_e determinado es sin duda relevante el espesor de la película de agua adherida. Para determinarlo en función de la succión se ha utilizado la ecuación 3.4 con $C_k = 2.5 \cdot 10^{-3}$; los espesores resultantes son del orden de $7 \cdot 10^{-5} \text{ cm}$. Como se ha comentado en el capítulo 3, este valor podría tomarse menor, de acuerdo a determinaciones de otros autores, con lo que la permeabilidad resultante sería menor.

En el ensayo numérico se ha podido determinar también que la circulación de agua en forma de vapor a través de los poros es de 3 a 4 órdenes de magnitud inferior a la masa de agua que ha circulado en forma líquida. Evidentemente esta relación variaría (en el sentido de reducir diferencias) si el gradiente hidráulico o el espesor del "film" fueran menores.

En la segunda parte del ensayo, en el instante $t=0.2$ s. se introdujo un inóculo de soluto ($I_s = 1.4 \cdot 10^{-14} \text{ g}$) en el menisco 49, a un cuarto de la longitud total de la columna (ver figura 6.8a). A partir del instante inicial, el soluto se propaga a los meniscos vecinos a favor del flujo preexistente, por convección con el agua; y también por difusión molecular, "desparramándose" aguas arriba y aguas abajo, en forma de campana. Como se puede apreciar el "pico" de la campana viaja sensiblemente a la misma velocidad "real" del agua, v , a través de los meniscos de la muestra. Como se deduce en Gili (1986), la migración del soluto se ajusta bastante bien a una ecuación del tipo:

$$C(x, t') = \frac{I_s}{\sqrt{4\pi D_e t'}} \exp\left[-\frac{(x - vt')^2}{4D_e t'}\right] \quad (6.1)$$

que es la que se encuentra para la propagación de un soluto a partir de la ecuación del transporte en una dimensión (x) en medio poroso saturado (Custodio y Llamas, 1983). En ella D_e sería el coeficiente de dispersión hidrodinámica efectivo, que se puede calcular a partir de los resultados como $7 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$. Este coeficiente englobaría al de dispersión mecánica y al de dispersión molecular. Este último se fijó en el ensayo igual a $2 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$. La dispersión o convección mecánica tendría pues mucha importancia, como parece lógico que resulte dada la velocidad del agua impuesta en el experimento.

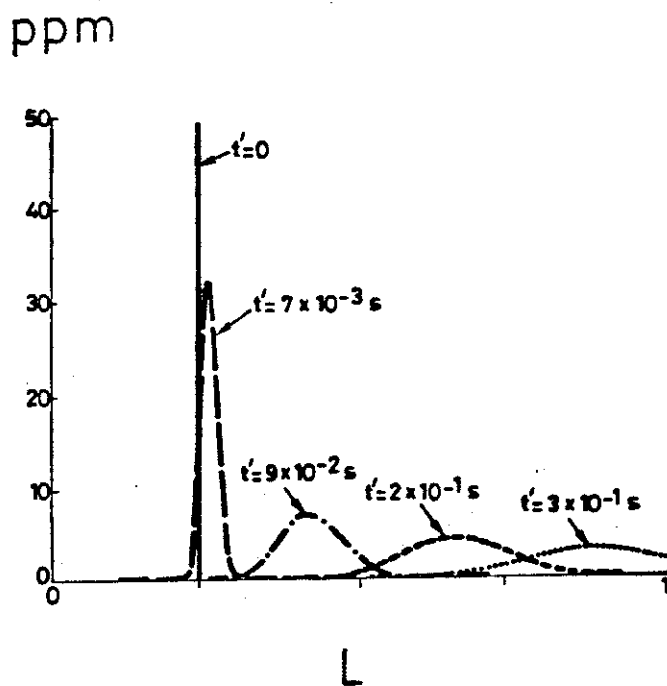
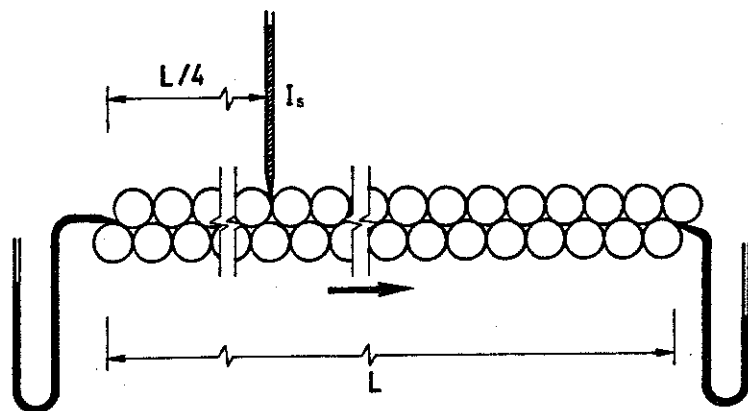


FIGURA 6.8 - a) Inoculación de un soluto en la columna de suelo.
 b) Evolución de las concentraciones de soluto disuelto en los meniscos (en partes por millón en relación al agua, ppm) para los instantes que se indican tras la inoculación ($t' = t - 0.2$ s).

6.2.3 ENSAYO DE FLUJO SOBRE UN CONJUNTO CIRCULAR DE PARTICULAS

El conjunto de 592 partículas de la figura 5.9 ha sido generado con los criterios aleatorios de GENAL4. Posteriormente se han identificado los poros y definido las condiciones iniciales con GAPLUS7.

En concreto las partículas están inicialmente en contacto estricto y se ha asignado a cada menisco un volumen de agua igual a $2.5 \cdot 10^{-11} \text{cm}^3$. En función de cuales sean los radios de las partículas que soportan a cada menisco (1.5, 2, ó $2.5 \cdot 10^{-3} \text{cm}$) la situación inicial equivaldrá a una u otra succión. Las combinaciones de los tres tamaños dan lugar a seis succiones distintas, entre 0.95Kp/cm^2 y 1.43Kp/cm^2 . Estos seis niveles de succión pueden distinguirse en la figura 6.9 (a). Los gráficos que aparecen en dicha figura presentan, para distintos instantes, los valores de la succión de los 981 meniscos, en ordenadas, situados sobre una abcisa igual a la denominada "distancia radial". Esta es igual a la que media entre el menisco (XM, YM) y el centro del modelo (XO, YO).

Las condiciones de contorno impuestas en el ensayo son de presión de fase gaseosa (aire + vapor) igual a la atmosférica, y presión de agua de 0.1Kp/cm^2 . En cualquier instante del ensayo, "el contorno", puede proveer aire seco y agua desaireada a los poros y meniscos que "le pertenecen" para que cumplan las condiciones de contorno. Los meniscos del contorno (resaltados en la figura 5.11) tendrán pues la succión permanentemente igual a 0.9Kp/cm^2 . Por este motivo en la figura 6.9a aparece un nivel de meniscos a esa succión en la parte exterior de la muestra.

Los parámetros de flujo utilizados corresponden a los recogidos en el epígrafe 5.3.1. Los incrementos de tiempo usados han sido:

- $t=0$ a $t=10^{-5} \text{s}$, $\Delta t = 10^{-7} \text{s}$;
- $t=10^{-5} \text{s}$ a $t=10^{-4} \text{s}$, $\Delta t = 10^{-6} \text{s}$;
- $t=10^{-4} \text{s}$ a $t=6 \cdot 10^{-3} \text{s}$, $\Delta t = 10^{-5} \text{s}$.

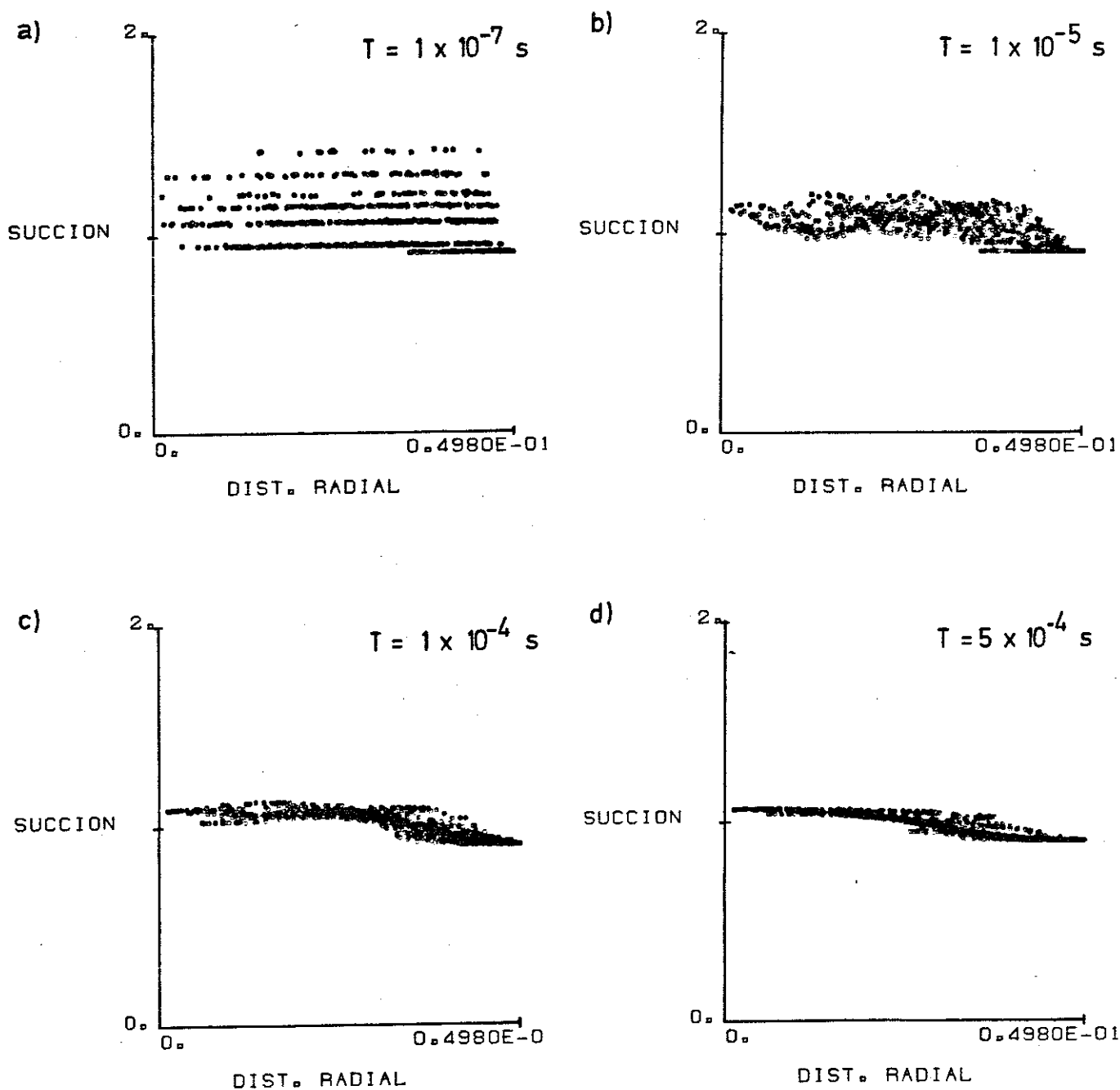


FIGURA 6.9 .- (a-d): Evolución de la succión en los meniscos de un conjunto circular de 592 partículas por flujos en su interior hasta alcanzar la succión impuesta en el contorno de 0.9 Kp/cm^2 . Abcisa: distancia "radial" al centro del conjunto, en cm. Ordenadas: succión en Kp/cm^2 .

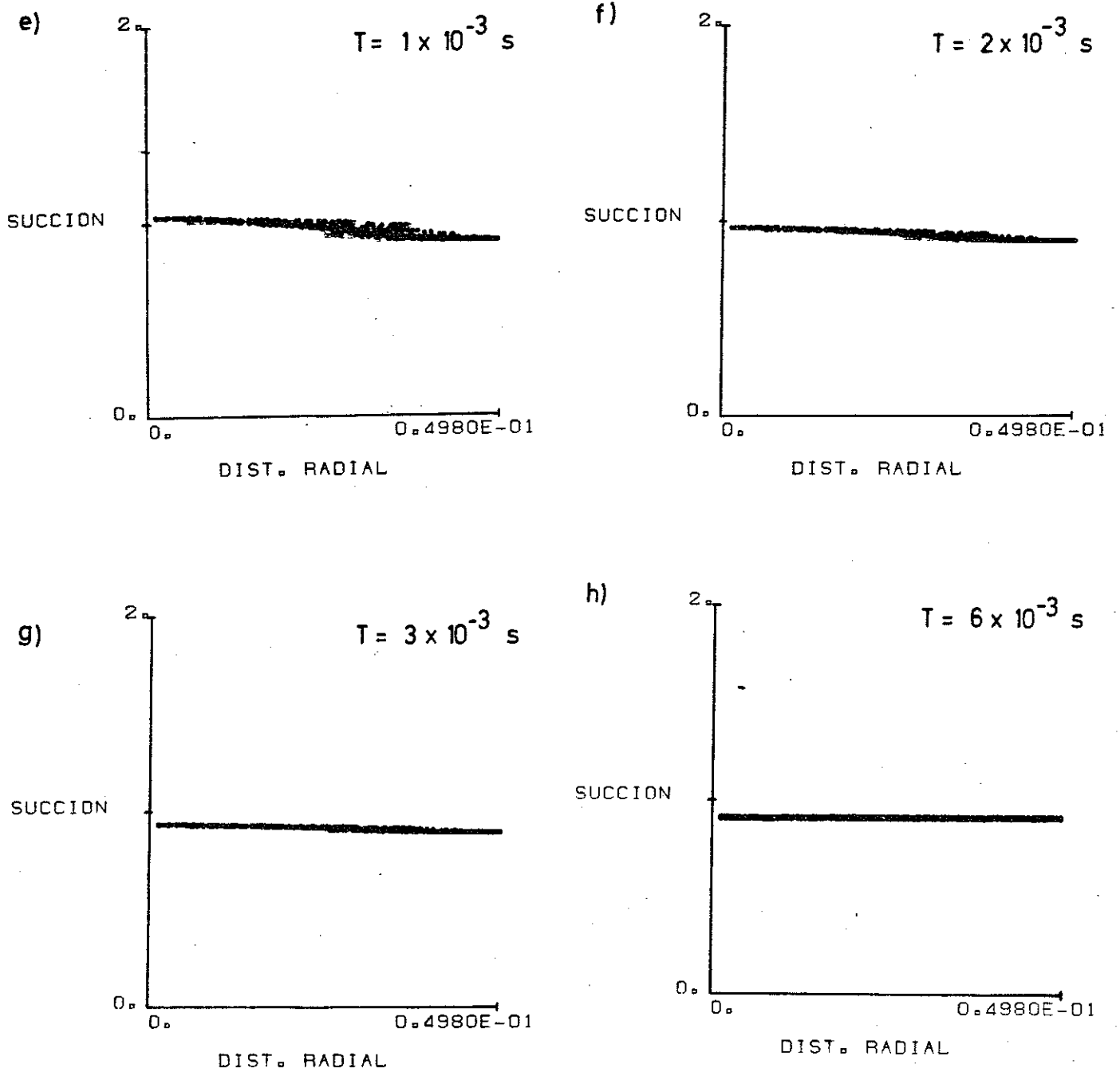


FIGURA 6.9 (Cont.) .- (e-h)

Al ponerse en marcha el contador de tiempo, las succiones tienden inicialmente a equilibrarse entre sí, localmente entre meniscos inmediatos (subfiguras b y c). Progresivamente toda la muestra va tendiendo a la succión impuesta (d-h), que se alcanza prácticamente a partir de $t=6 \cdot 10^{-3} s$. Para ello a nivel global la muestra ha admitido una cierta cantidad de agua por el contorno que ha circulado hacia los meniscos interiores.

Una vez corregidos los desequilibrios locales, la pendiente de la gráfica en el centro de la "isla" (distancia radial = 0) es nula, como se debe ser, por simetría. A partir de ese instante, la "succión en el centro" decrece de manera aproximadamente lineal con el logaritmo del tiempo y también casi linealmente con \sqrt{t} .

A partir de la situación final de succión equilibrada a $0.9 Kp/cm^2$ ($t=6 \cdot 10^{-3} s$, figura 6.9 h) se procedió a la "carga" tensional en el contorno de la muestra, liberándose las partículas que hasta entonces se habían mantenido inmóviles, y entrando propiamente en el ámbito mecánico. Esta parte del ensayo se reseña en 6.3.

Es interesante resaltar que en las fases iniciales de determinados incrementos (bruscos) de carga, el movimiento de las partículas bajo estos cambios puede traducirse en cambios en la geometría de los meniscos aislados (básicamente distancia D entre las partículas que lo soportan). En un primer instante los flujos no tienen aún ocasión de compensar el cambio y restituir la succión impuesta en el contorno ($0.9 Kp/cm^2$). Hasta que esto no ocurre algunos meniscos ostentan succiones distintas a aquella, como puede apreciarse en un ejemplo en la figura 6.10. La "succión local" de algunos meniscos (y por ende la fuerza capilar, F_w) será transitoriamente distinta (en el ejemplo hasta un 40%) a la "succión global" o especificada. Esto no es más que un nuevo ejemplo del acoplamiento intrínseco flujo-mecánico que se registra en el suelo no saturado desde los niveles más microestructurales.

En una etapa posterior de ensayo, una vez estabilizada la muestra bajo una carga isotrópica absoluta de $1.1 Kp/cm^2$, se dió paso a una variación de la succión impuesta en el contorno, aumentándose paulatinamente la presión de agua en el contorno hasta $0.9 Kp/cm^2$ (succión igual a $0.1 Kp/cm^2$).

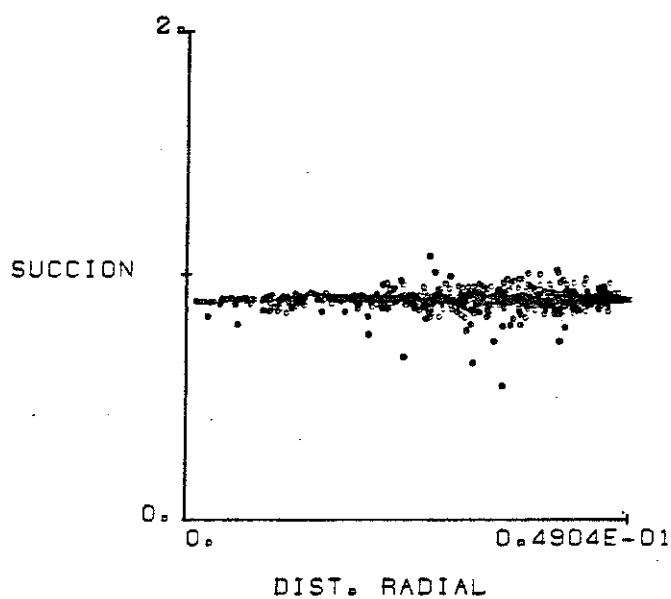


FIGURA 6.10 .- Cambios en la succión "local" de los meniscos, producidos por los movimientos de las partículas bajo un cambio brusco de carga. Abcisa: distancia radial, en cm. Ordenadas: succión en Kp/cm².

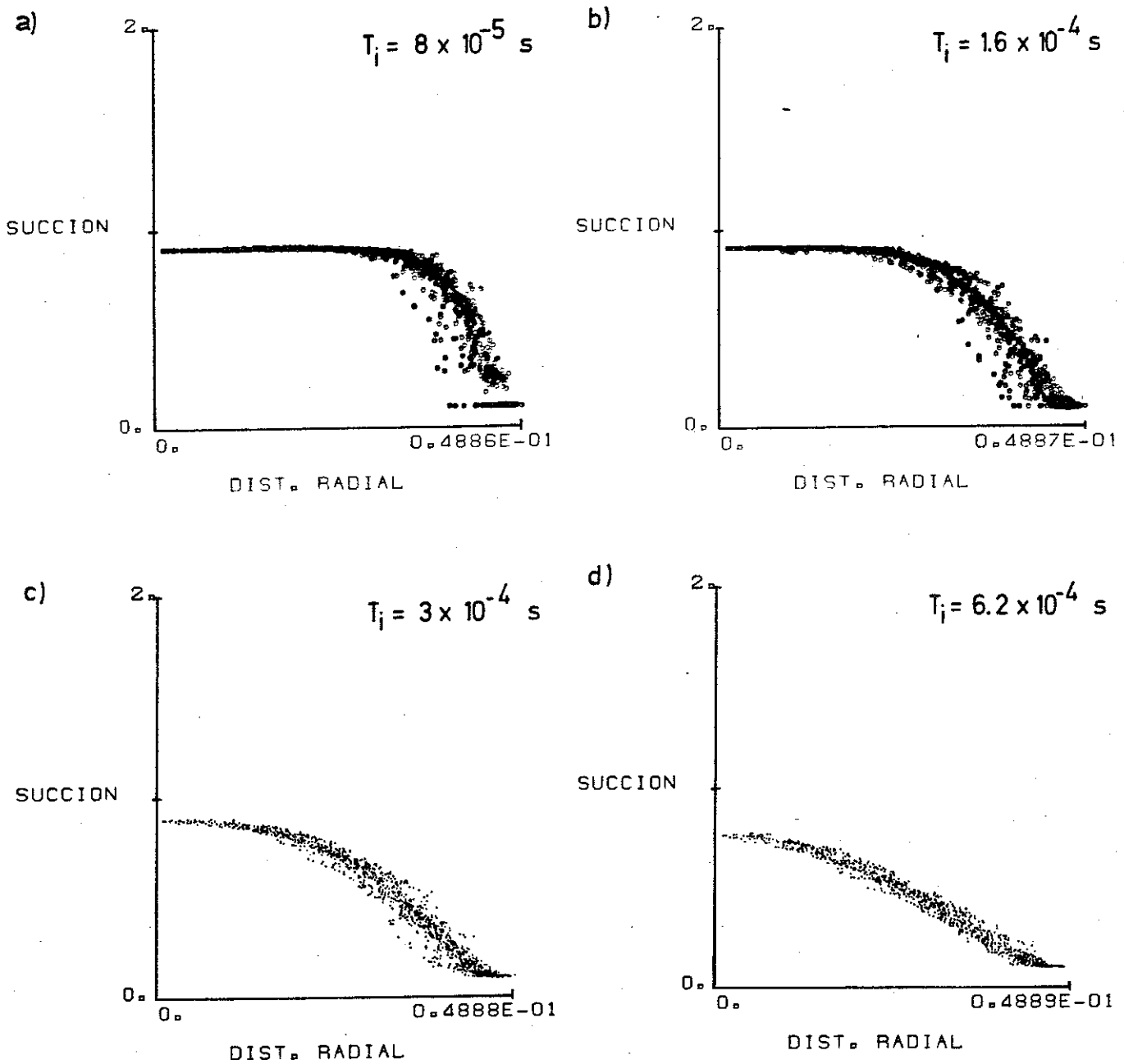


FIGURA 6.11 .- (a-d): Evolución de las succiones con el tiempo para un descenso de la succión de contorno desde 0.9 a 0.1 Kp/cm². Son 592 partículas (móviles) con carga isotrópica de 1.1 Kp/cm². Abcisa: distancia radial en cm. Ordenadas: succión en Kp/cm².

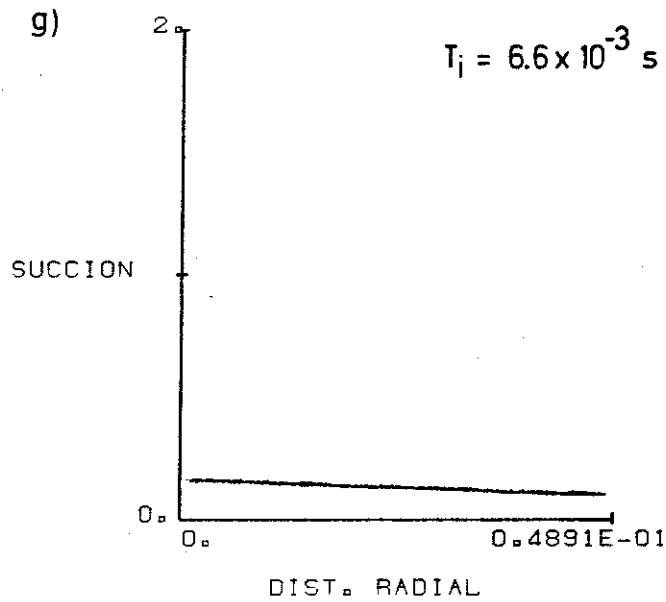
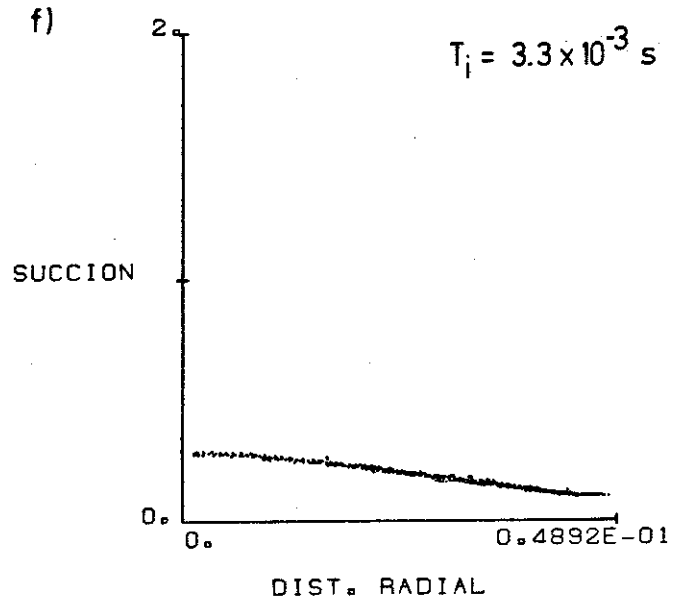
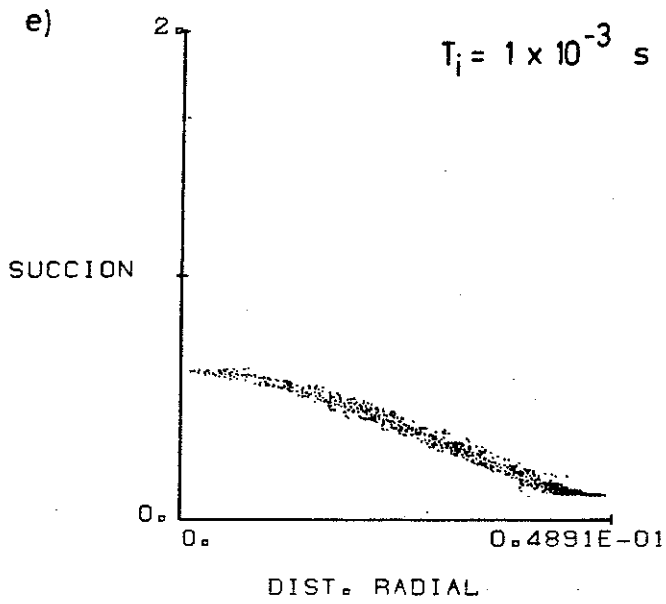


FIGURA 6.11 (Cont.) .- (e-g)

En este caso las partículas podían moverse, y el ensayo numérico llevó paralelamente los cálculos de flujo (con $\Delta t_f = 5 \cdot 10^{-7} s$) y los cálculos mecánicos (con $\Delta t_m = 5 \cdot 10^{-9} s$). En la figura 6.11 se incluye el seguimiento de las succiones desde prácticamente el estado inicial (tiempo incremental, $t_i = 8 \cdot 10^{-5} s$, subfigura a).

En esta subfigura los meniscos del contorno (abajo a la derecha) tienen la succión prescrita a $0.1 Kp/cm^2$. El resto de meniscos va tendiendo progresivamente a este valor (b-g) disminuyendo su succión gracias al agua que "atraen" del contorno. En conjunto la muestra aumenta la cantidad de agua en forma de meniscos, por lo que puede considerarse este ensayo como una cierta "inundación parcial". La reducción parcial de fuerza capilar a nivel de los contactos ha producido un colapso moderado que se acotará en 6.3.

Gracias a las pendientes de las gráficas de la figura 6.11, y evaluando la cantidad de agua que ha ido penetrando en la muestra, se ha podido obtener una estimación de la permeabilidad media de la muestra en distintos instantes. Los valores han resultado del mismo orden que el K_e deducido del ensayo con 100 partículas (epígrafe anterior). Sin embargo son algo inferiores debido a que el número de "camino" entre meniscos es menor, al ser la estructura más "abierto" que en aquel caso.

Nuevamente en este caso los gradientes, que pueden apreciarse en cualquiera de las subfiguras 6.11 son grandes. No obstante las partículas (movibles en este caso) no quedan afectadas de manera notable. Esto es debido a que los posibles cambios de presión de agua quedan englobados en fuerzas normales, no habiéndose considerado otro tipo de fuerzas de flujo en el modelo.

Este último ensayo abre paso a los de tipo "completo" (integrando cambios de tensión y deformación con flujos internos), que se ven en el siguiente apartado.

6.3 ENSAYOS FLUJO-DEFORMACIONALES

En este epígrafe los ensayos son de tipo "normal", con variable ICASO superior a cero. Se han llevado a cabo primordialmente sobre configuraciones circulares de partículas con tensión y succión definidas (y variables) en el contorno. A continuación se presentan varios de ellos sobre conjuntos de 21 y 592 partículas.

6.3.1 ENSAYOS SOBRE 21 PARTICULAS

El conjunto de 21 partículas que ya se trató en la figura 5.12 se ha utilizado por su sencillez para poner a punto del esquema numérico flujo-deformacional completo (Gili y Alonso, 1988). Como ya se dijo las 21 partículas han sido generadas aleatoriamente, aunque su escaso número reduce la efectividad de dicha medida.

Con la succión de 0.9 Kp/cm^2 equilibrada, la muestra ha sido sometida a una tensión isotrópica absoluta de 1.1 Kp/cm^2 . Los parámetros mecánicos del modelo son los de la relación 5.14 y consecuentemente se ha usado un $\Delta t = 5 \cdot 10^{-9} \text{ s}$.

Estabilizados los movimientos inducidos por la carga, se satura la muestra por inundación (ICASO=2), registrándose un cierto "colapso": la desaparición de los meniscos (que produce la rotura de algunos contactos), y el deslizamiento en otros contactos da paso al cambio de posición de las partículas, reduciéndose el área total ocupada por la muestra (ver figura 6.12a). También puede apreciarse la variación de los poros individuales enmarcados por las partículas en las "porosimetrías" de la figura 6.12b, cuyo significado ya ha sido explicado.

De manera igualmente tentativa se ha investigado la influencia de las tensiones desviadoras. Partiendo del mismo estado inicial se ha aplicado una tensión principal

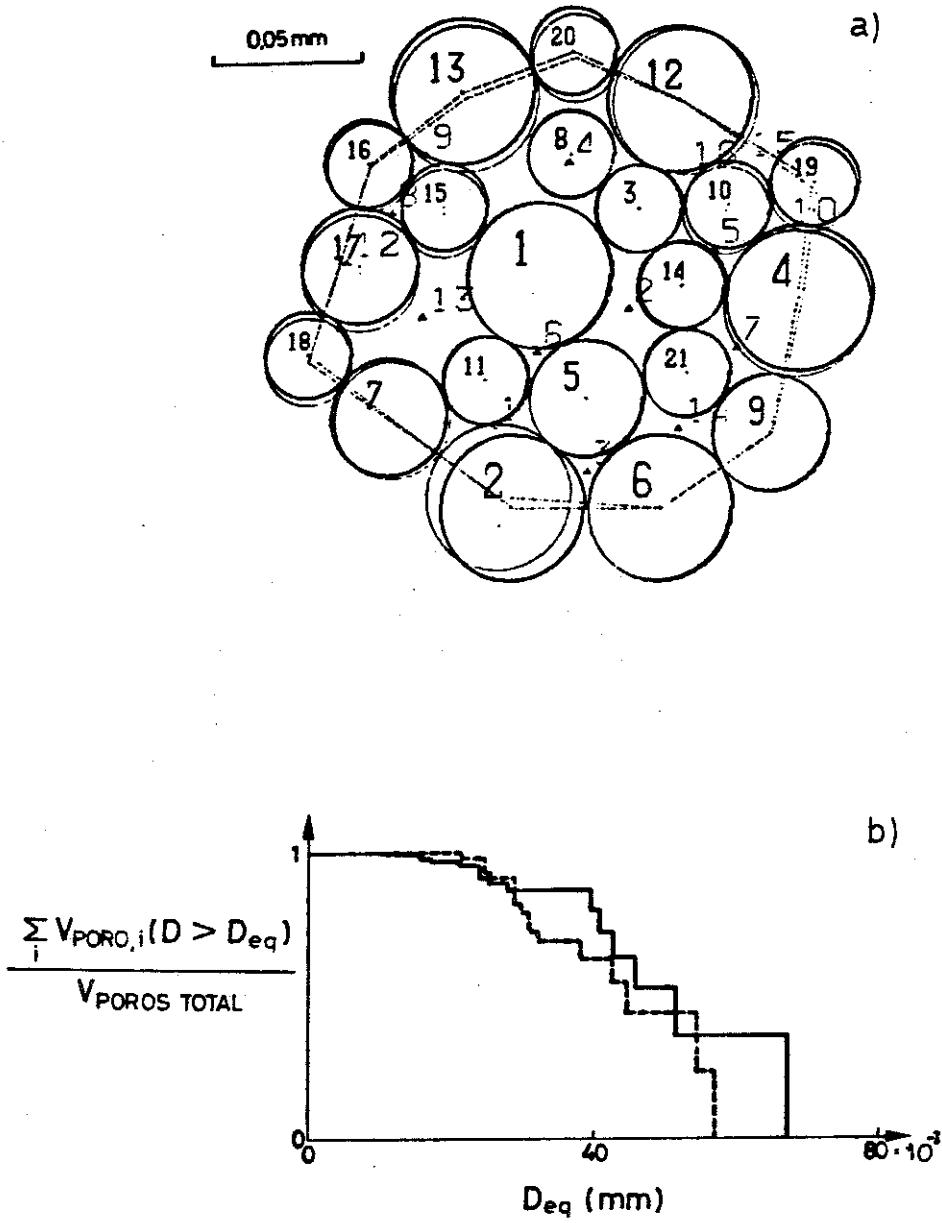


FIGURA 6.12 .- Muestra de 21 partículas sometida a carga isotrópica con succión 0.9 Kp/cm² (trazo fuerte), y posterior colapso por inundación (trazo suave o discontinuo).
 a) visión del plano del modelo.
 b) cambios en la distribución de tamaños de poros.

mayor según el eje y ($\sigma_{22} = 1.15 \text{ Kp/cm}^2$ y $\sigma_{11} = 1.05 \text{ Kp/cm}^2$, en términos absolutos). Como se ve la tensión media se mantiene.

La figura 6.13 muestra los reordenamientos producidos. Se llega a un estado equilibrado tanto antes como después de la "inundación" de la muestra. Sin duda el *acodamiento* de las escasas partículas no permite sacar ninguna conclusión, pero el ensayo ha servido para poner a punto el modelo "completo".

6.3.2 ENSAYOS SOBRE 592 PARTICULAS

La configuración de 592 partículas que aparece en la figura 5.9, con la succión estabilizada a 0.9 Kp/cm^2 (según lo visto en 6.2.3), ha sido la que ha servido como base para la mayor parte de los ensayos "completos" que se han llevado a cabo. El número relativamente elevado de partículas ha permitido el desarrollo de grandes desplazamientos y la puesta a punto de los algoritmos de cálculo y geométricos en un amplio espectro de circunstancias.

La formulación relativa a los flujos se ha mantenido esencialmente igual a lo expresado en 6.2.3, avanzando en el tiempo con $\Delta t_f = \text{TINCF} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ s}$.

En el aspecto mecánico cabe distinguir dos grandes "ambientes" de trabajo. En un primer grupo de ensayos, las partículas se han considerado relativamente "rígidas" (alta rigidez en el contacto); estos ensayos numéricos se presentan en 6.3.2.1. También se han llevado a cabo ensayos con material más deformable (rigidez en el contacto menor), que se detallan en 6.3.2.2.

En el último subapartado (6.3.2.3) se resaltan algunos detalles o mecanismos de interacción entre las fases a escala "microscópica", que se han podido caracterizar en los anteriores ensayos.

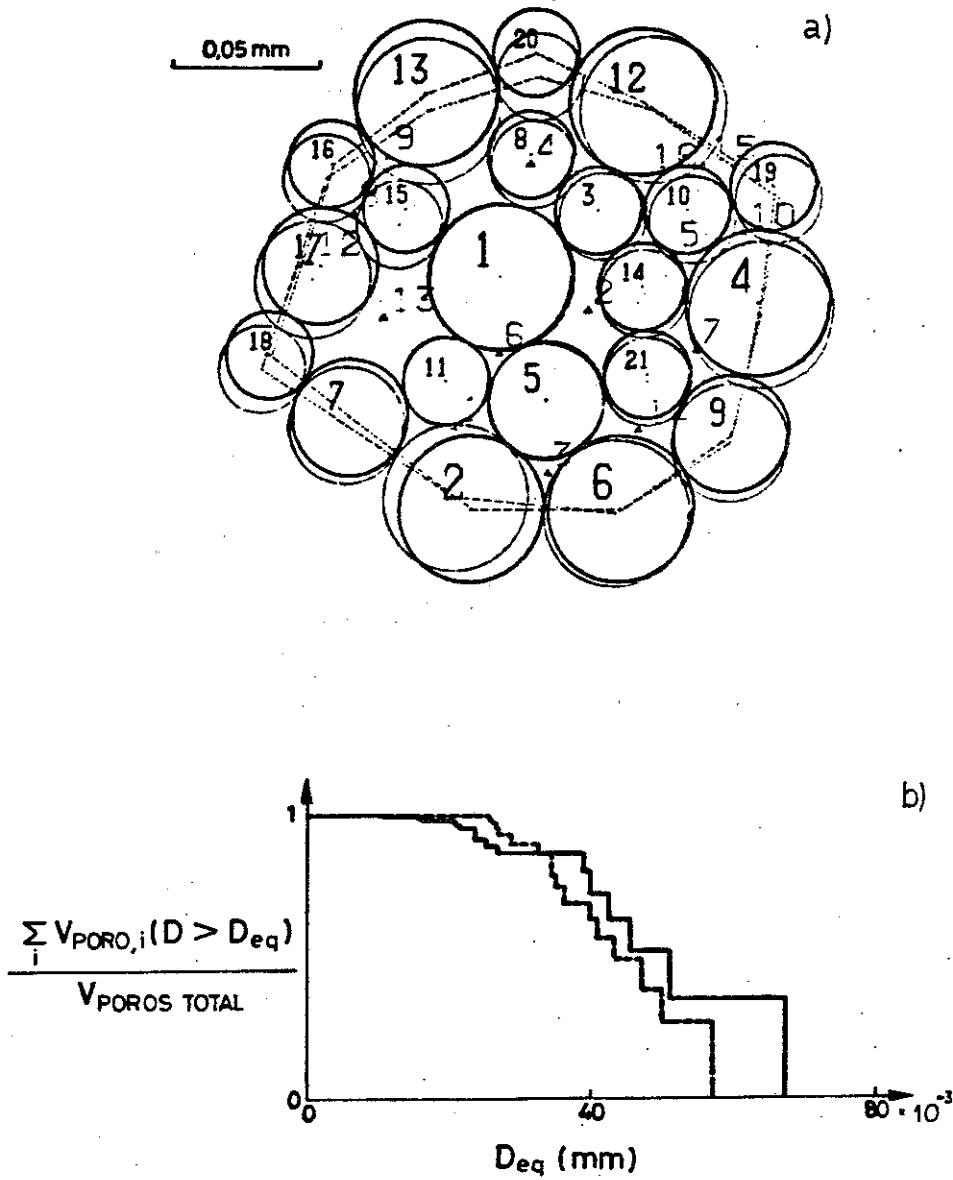


FIGURA 6.13 .- Muestra de 21 partículas sometida a carga desviadora con succión 0.9 Kp/cm^2 (trazo fuerte), y posterior colapso por inundación (trazo suave o discontinuo).

a) visión del plano del modelo.

b) cambios en la distribución de tamaños de poros.

6.3.2.1 PARTICULAS "RIGIDAS"

Los parámetros mecánicos que se han usado son los que se incluyen en la relación 5.14. La rigidez en el contacto es relativamente alta, por lo que de acuerdo con la ecuación 5.10 se ha tenido que usar un $\Delta t_m = \text{TINCM} = 5 \cdot 10^{-9} s$. Las líneas de ensayo numérico que se resumen a continuación son las de: carga isotrópica (y descarga); inundación con colapso; carga desviadora.

CARGA ISOTROPICA

Desde la situación de flujos interiores estabilizados con partículas inmóviles (figura 6.9h) se ha aplicado una tensión isotrópica creciente, simultáneamente a la "liberalización" de los grados de libertad de las esferas (posición XB, YB; giro θ_B).

Los escalones de carga utilizados han sido los siguientes (tensiones de compresión absoluta, incrementos de tiempo desde el inicio del ensayo, t_i):

- $\sigma_{ISO} = 1.02 \text{ Kp/cm}^2$, hasta $t_i = 2.34 \cdot 10^{-3} s$.
- $\sigma_{ISO} = 1.04 \text{ Kp/cm}^2$, hasta $t_i = 5.40 \cdot 10^{-3} s$.
- $\sigma_{ISO} = 1.06 \text{ Kp/cm}^2$, hasta $t_i = 8.05 \cdot 10^{-3} s$.
- $\sigma_{ISO} = 1.10 \text{ Kp/cm}^2$, hasta $t_i = 1.02 \cdot 10^{-2} s$.
- $\sigma_{ISO} = 1.02 \text{ Kp/cm}^2$ (descarga), hasta $t_i = 1.04 \cdot 10^{-2} s$.

Las cargas "netas" ($\sigma_{ISO} - p_a$) aplicadas son reducidas, porque se ha considerado que a esos niveles bajos de carga exterior, la succión y los meniscos jugarían un papel más importante en los comportamientos de colapso que se querían estudiar.

Las cargas normalmente se han aplicado progresivamente al inicio del escalón

con una "velocidad" de carga entre 100 y 500 Kp/cm^2 por segundo.

Cada incremento de carga produce en la muestra ciertos reajustes interiores para acomodarse a la tensión creciente (deformaciones normales y deslizamientos tangenciales en los contactos, creación y rotura de contactos, "cierre" de algunos poros, etc). Tras cada escalón se permitía a la muestra llegar hasta equilibrio de deformaciones (cese de los movimientos).

Es difícil decidir en qué instante ésto ocurre realmente. Siempre puede quedar cierto movimiento "de fondo", difícil de "relajar" totalmente (en todo caso muy costoso, en términos de tiempo de C.P.U.). Para esta decisión es de gran ayuda el programa de postproceso DIBU, explotado normalmente en pantalla gráfica a color. Los dibujos de la figura 6.14 muestran una serie de estados de *velocidad instantánea* en varias etapas de ensayo. Cada vector representa la velocidad de una partícula en dirección y módulo, a la escala que se indica. La subfigura (a) corresponde al inicio del primer escalón de carga. La acción en el contorno pone en movimiento primeramente a las partículas periféricas; posteriormente los movimientos se propagan y transmiten, pudiendo quedar zonas con tendencias coherentes, más o menos "simétricas" (b), o afectar a zonas localizadas del modelo (c). En esta subfigura, en la cual se han dibujado también las partículas, se ve como el deslizamiento puntual de determinados contactos puede movilizar zonas enteras (cuadrante inferior derecho y centro), buscando nuevos contactos que restituyan el equilibrio. En este sentido el comportamiento del modelo puede ser tan "caprichoso" como un suelo real.

En caso de carga desviadora las velocidades reflejan esta circunstancia (subfigura d).

Las velocidades medias de recorrido son típicamente inferiores a 1 cm/s . Progresivamente van disminuyendo, hasta aparecer insignificantes a la escala de la figura. El criterio último para dar por finalizado determinado escalón de carga es que no existan zonas con movimientos (velocidades) coherentes, aceptándose cierto "ruido de fondo": 0.1 cm/s normalmente y 0.25 cm/s en partículas aisladas (rebotes esporádicos). Esto equivale a una suma de energías cinéticas lineales menor que

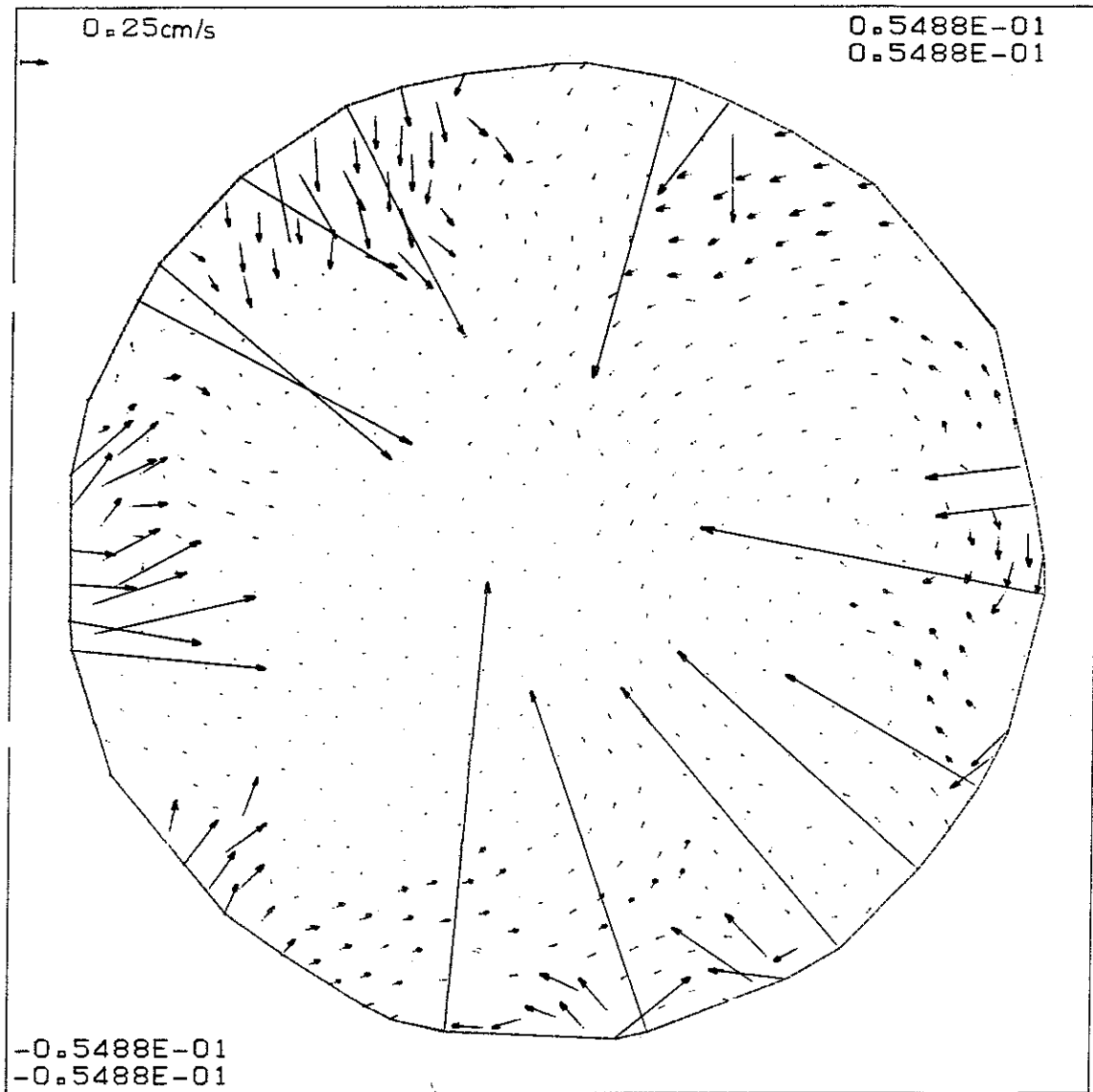


FIGURA 6.14.- a) Velocidades instantáneas de las partículas. Instante inicial de un escalón de carga.

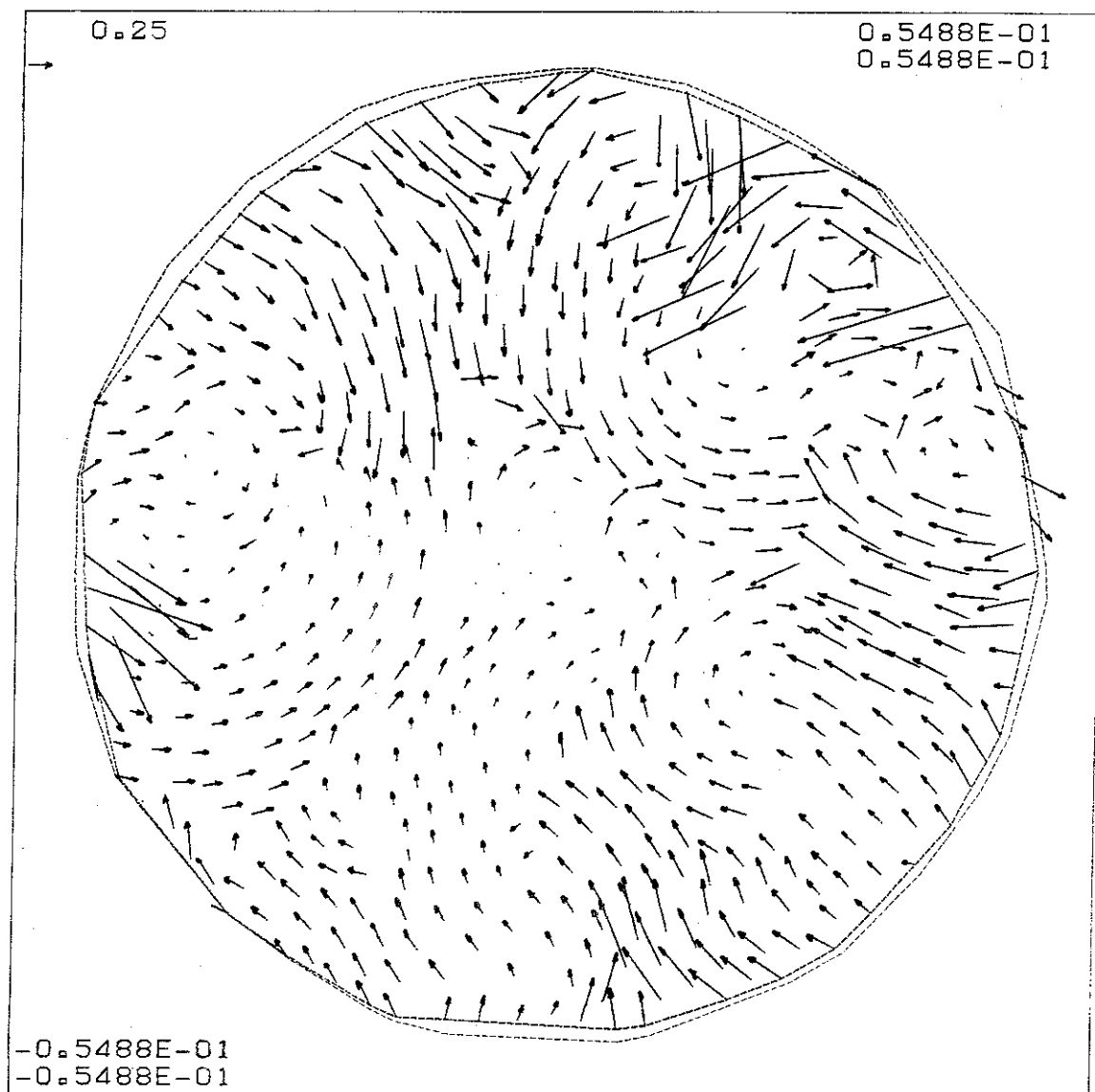


FIGURA 6.14 (Cont.) .- b) *Velocidades instantáneas de las partículas.*
Instante intermedio de un incremento de carga.

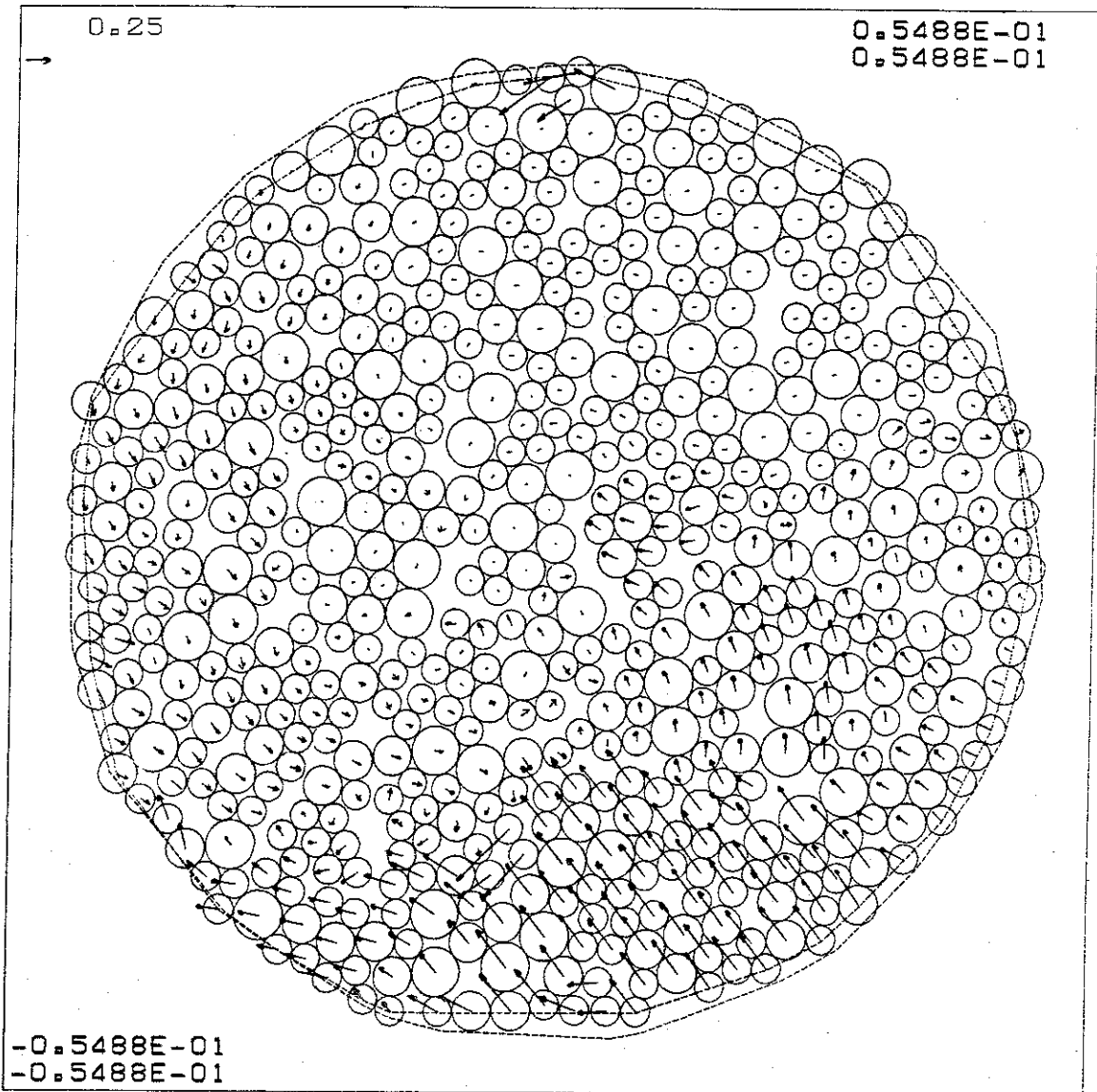


FIGURA 6.14 (Cont.) .- c) *Velocidades instantáneas de las partículas distribuidas heterogéneamente dentro del modelo.*

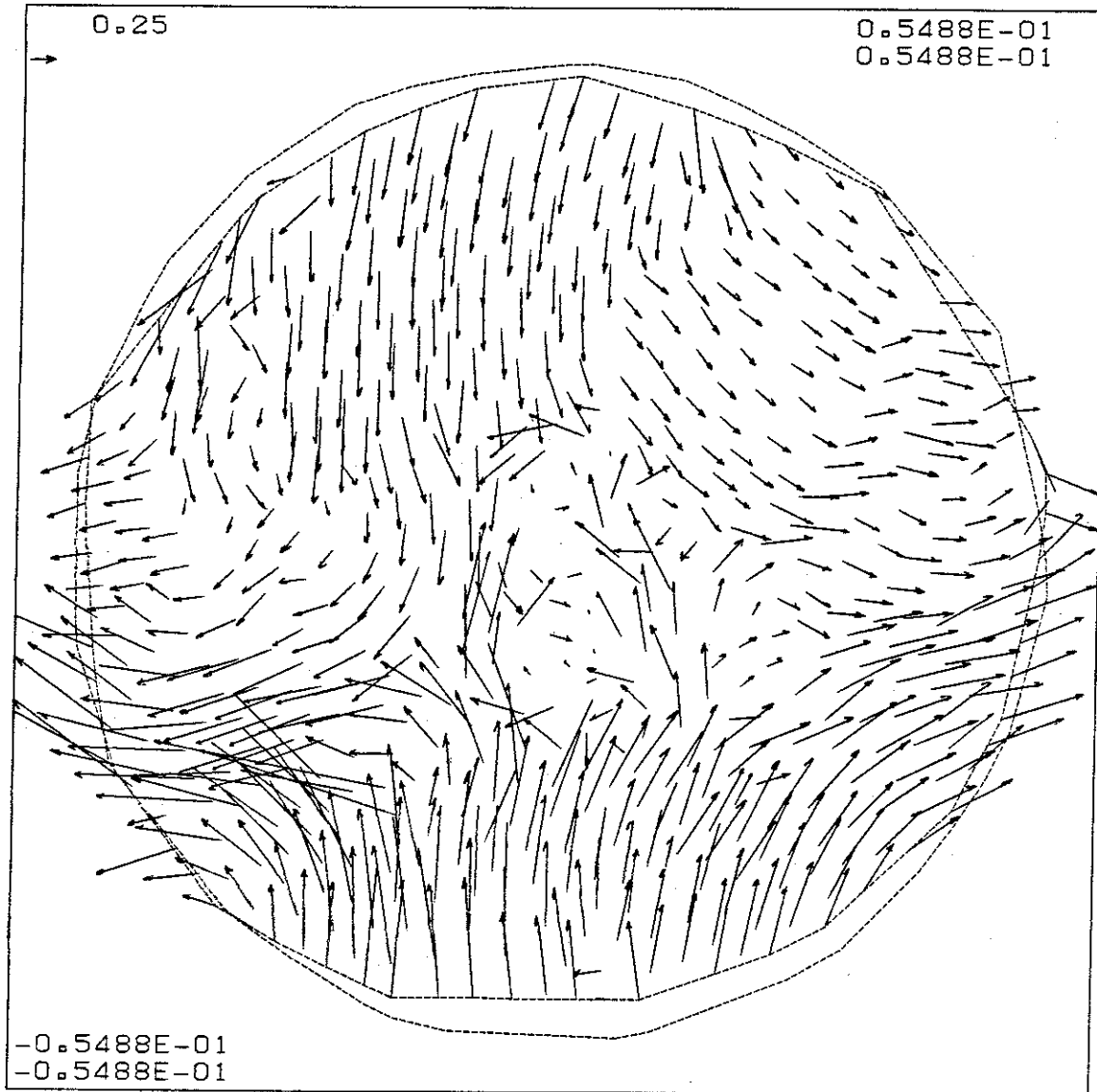


FIGURA 6.14 (cont.) - d) Velocidades instantáneas de las partículas en un caso de carga desviadora (dirección principal mayor vertical).

$1 \cdot 10^{-13} \text{ Kp} \cdot \text{cm}$, aproximadamente y para el caso de 592 partículas (la energía cinética es un valor que queda reflejado en el archivo de resultados directamente). Este último criterio ayuda a ver si globalmente el ensayo progresa hacia la estabilización.

Otro criterio, también global, es el seguimiento del área ocupada por el modelo o de la porosidad (n). Para poder finalizar un escalón de carga deberán también mantenerse estables los valores de n , el número total de contactos-menisco y el número de poros.

La porosidad final así conseguida en el conjunto de escalones de carga y descarga se puede apreciar en la figura 6.15. El modelo ha ido reduciendo sus poros a *nivel global*. En la línea de descarga ($\sigma_{ISO} = 1.1 \text{ Kp/cm}^2$ a $\sigma_{ISO} = 1.02 \text{ Kp/cm}^2$) apenas se recupera deformación por cuanto esta ha sido mayormente producida por reordenación del esqueleto de partículas (por otro lado relativamente poco deformables). La descarga sólo recupera una pequeña parte de deformación elástica normal a nivel de los contactos, con efecto global prácticamente indetectable.

En la figura 6.16 se puede apreciar directamente la deformación sufrida por el modelo a nivel del contorno. De ella, para mayor claridad se extrae un cuadrante en el que se detallan los escalones de carga (figura 6.16b).

Sin embargo el modelo puede proporcionar información a un nivel de *detalle* mucho mayor (no solo global).

Como ejemplo, en la figura 6.17 se incluye la porosimetría inicial del modelo y la porosimetría tras los sucesivos escalones de carga. La pendiente que se observa en el tramo superior corresponde a los poros menores (entre tres o cuatro partículas). Una cierta proporción del volumen de huecos está formada por ellos. Se puede apreciar claramente que el aumento de carga ha favorecido la reducción o reordenamiento de los poros mayores (formados por cadenas de 6 ó más partículas) mientras que los menores han sufrido menos cambios.

Por otro lado no solo se puede conocer la fuerza en el contorno, sino que se puede averiguar cuál es la que se transmite en cada contacto, en el sentido normal y tangencial, por "solape" físico o debido a los meniscos. En la figura 6.18 se muestra

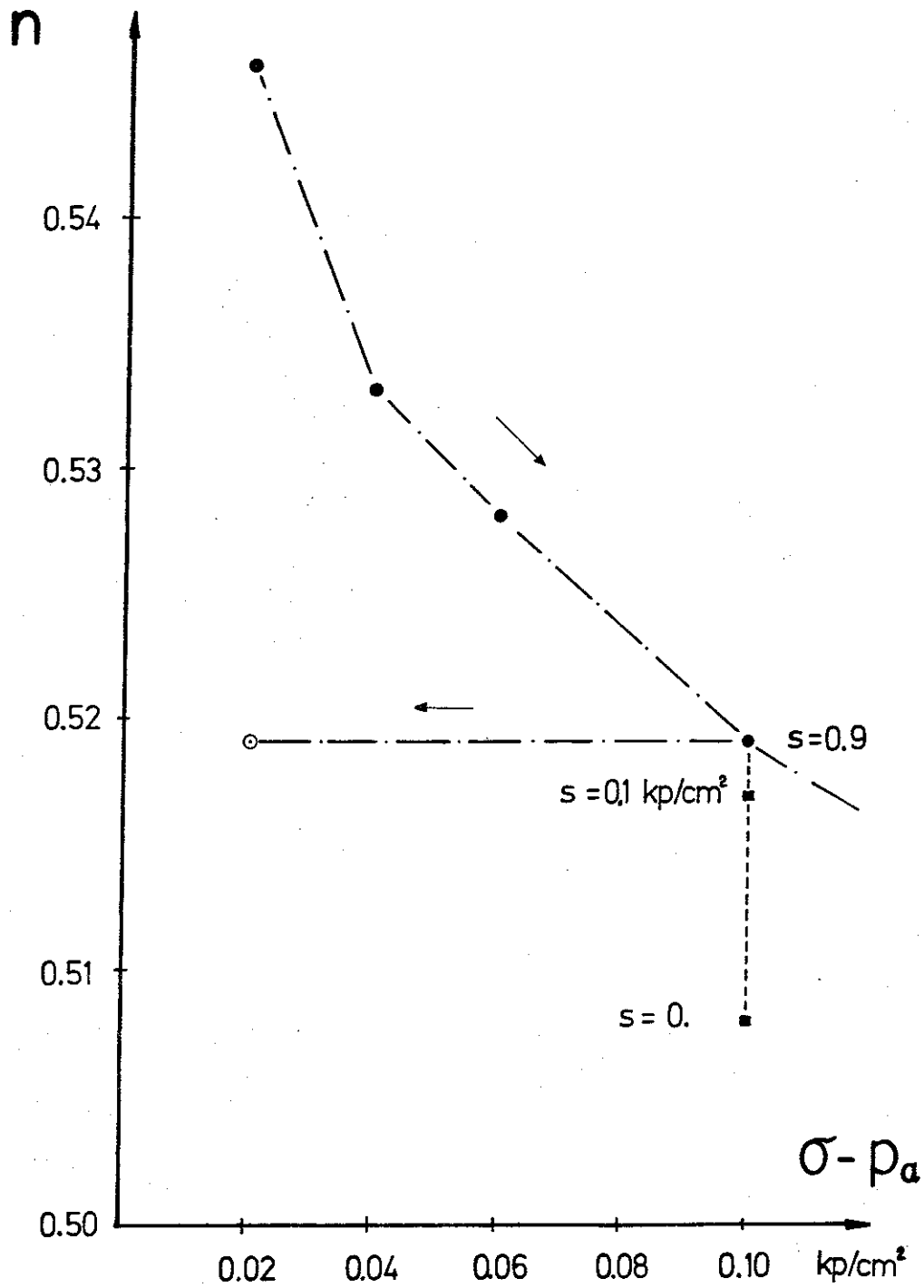


FIGURA 6.15.- Porosidad n de la muestra en los ensayos numéricos con 592 partículas en carga, descarga e inundación isotrópicas.

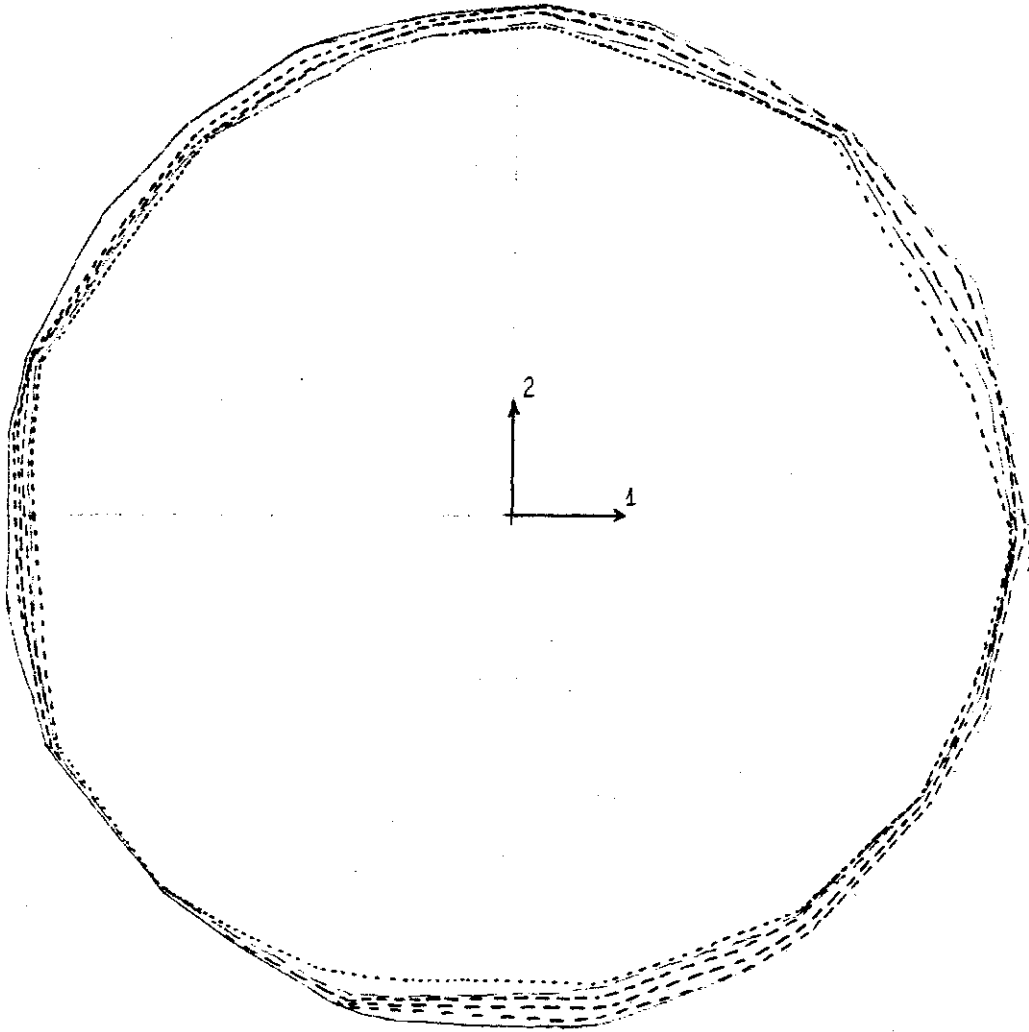


FIGURA 6.16 .- a) Evolución del contorno de la muestra de 592 partículas bajo carga isotrópica. El contorno exterior corresponde a la situación inicial tras generación, y el interior a la muestra tras colapso por inundación.

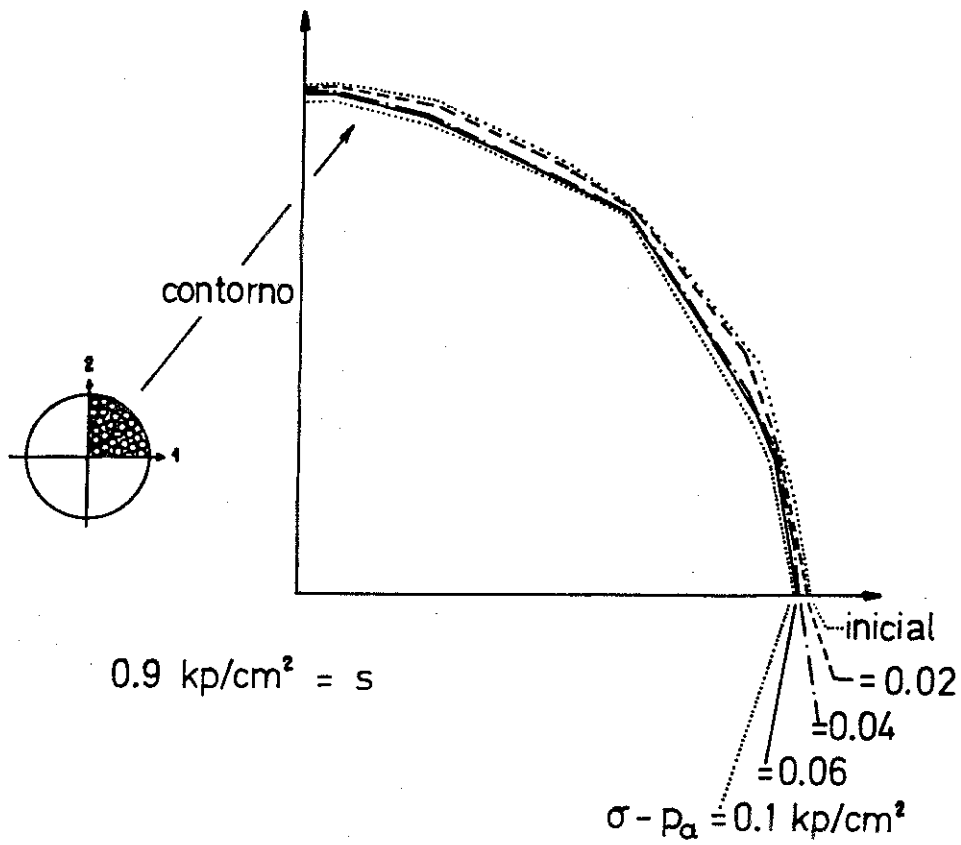


FIGURA 6.16 (Cont.) .- b) Cuadrante extraído de a).

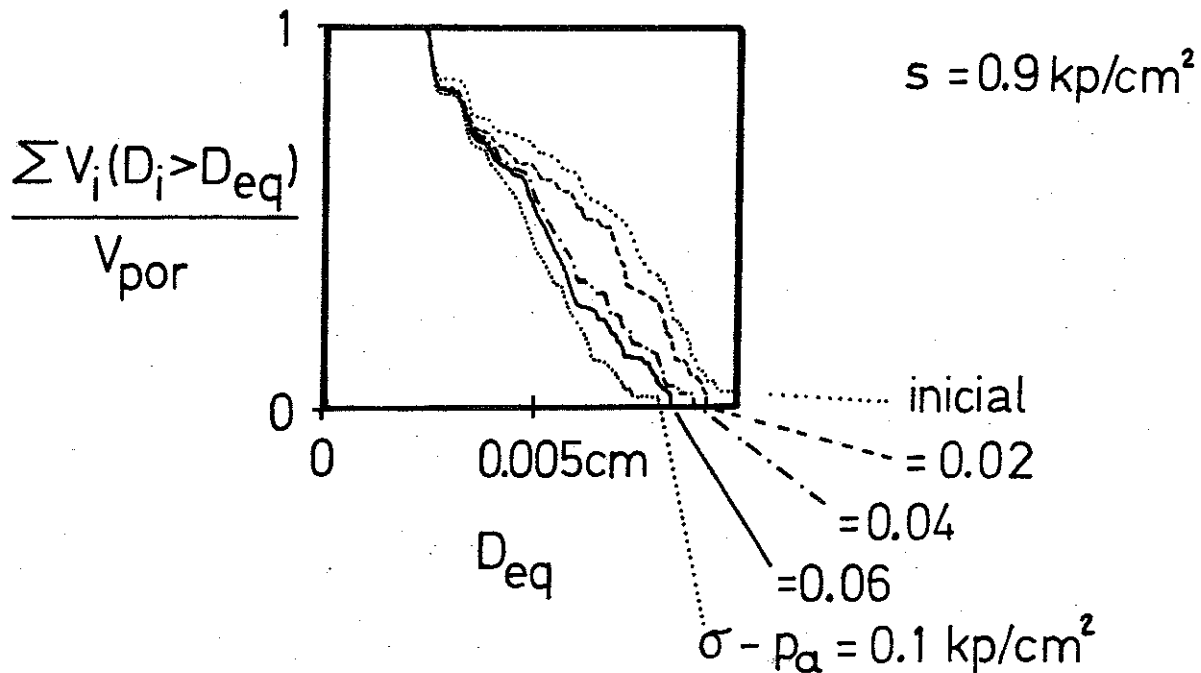


FIGURA 6.17.- Porosimetría del modelo tras los diversos escalones de carga.

un ejemplo de dibujo de este tipo. En el plano del modelo se han dibujado las 592 partículas, con unos segmentos centrados en cada contacto entre dos de ellas que representan las fuerzas transmitidas, y cuyo significado exacto y convenio de signos se explica en la figura 6.18b. Es de notar que los rectángulos “negativos” (discontinuos) se pueden asociar (aunque no directamente) a la acción del agua en los contactos.

Para clarificar esta subfigura no se han incluido las fuerzas debidas a amortiguamiento N_η y T_η , que en una situación cercana al equilibrio tenderán a cero. Justamente para evaluar visualmente el valor de las fuerzas de amortiguamiento, y en qué zonas los movimientos relativos son más importantes, se cuenta con otra opción de dibujo, que no se presenta aquí.

Sobre dibujos como el de la figura 6.18a es fácil detectar la formación de las cadenas de transmisión de carga, y las lagunas o zonas relativamente descargadas

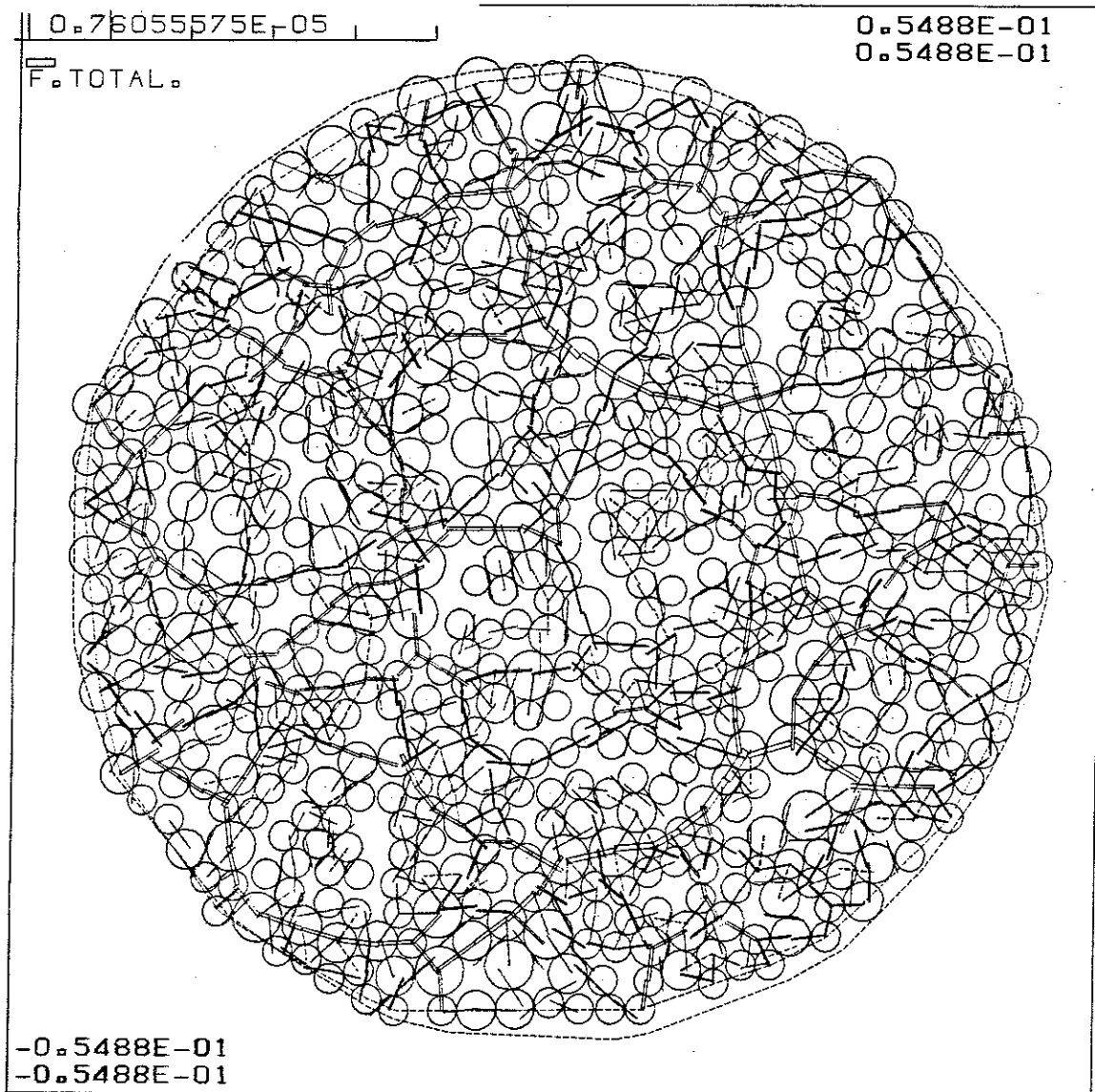


FIGURA 6.18 .- a) Dibujo del modelo incluyendo las fuerzas totales transmitidas por los contactos entre partículas. La fuerza máxima, de espesor a la escala indicada en la parte superior izquierda, es en este caso $0.76 \cdot 10^{-5}$ Kp. Sobre las partículas del contorno actúa la tensión de contorno, no indicada.

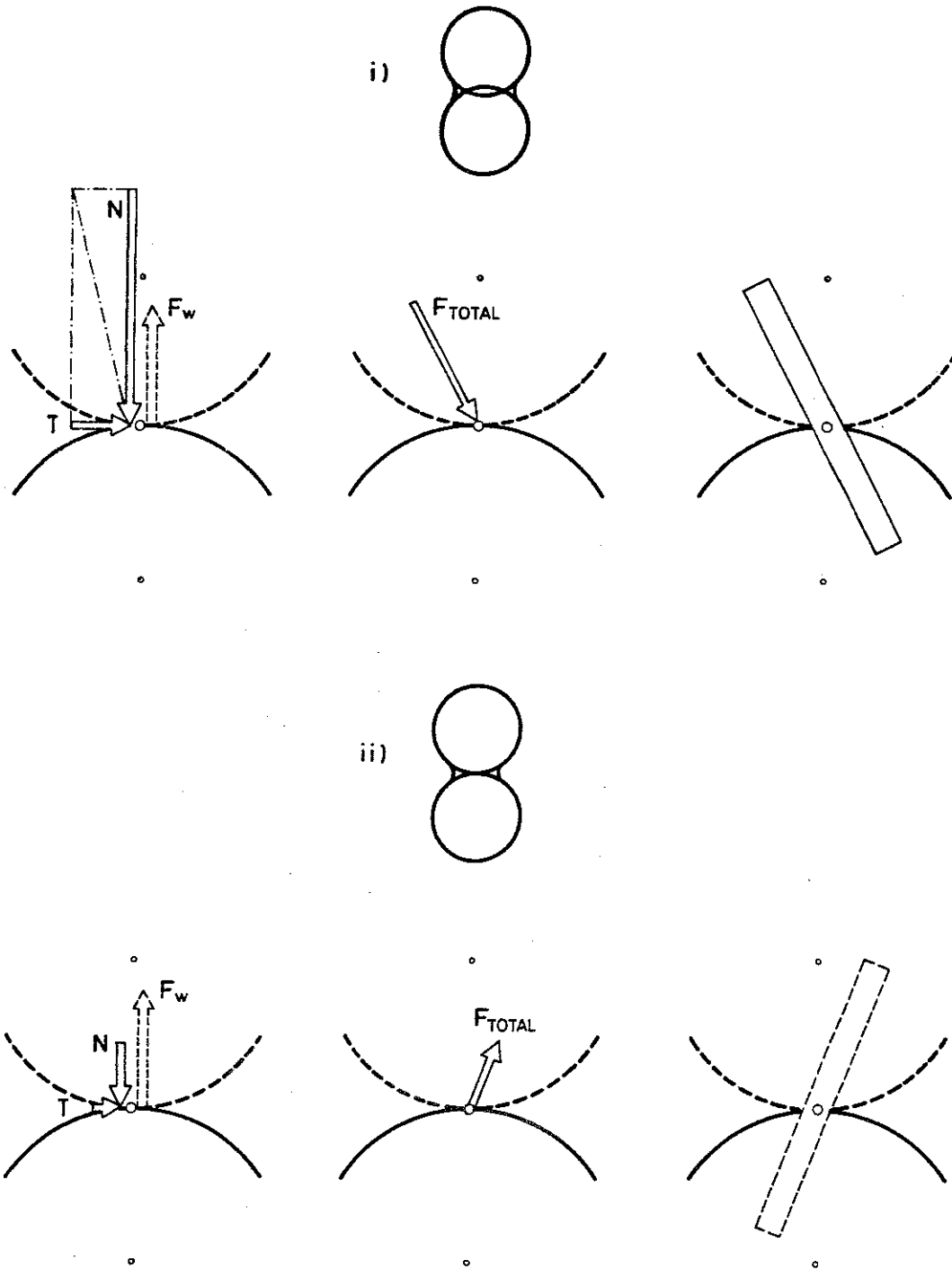


FIGURA 6.18 (Cont.) .- b) Significado y convenio de signos de las fuerzas entre contactos. Cada una viene representada por un rectángulo alargado, de longitud igual a la suma de radios de las dos partículas, de espesor proporcional al módulo de la fuerza, de inclinación paralela a ella, y con la siguiente simbología en relación a su signo (en el original se distinguen por colores):

- i) Rectángulos de línea continua, fuerza normal total positiva según la ecuación 5.7
- ii) Rectángulos de línea discontinua, fuerza normal total negativa.

que quedan en su interior. Como ocurre en los modelos de partículas con tensión controlada en el contorno, las cadenas se difuminan en otras menores en las cercanías del contorno (Cundall et al. 1982).

Para poder apreciar mejor las zonas cargadas y las descargadas es posible dibujar sólo aquellas fuerzas mayores que un determinado valor umbral (por ejemplo aquellas fuerzas totales cuyo módulo sea superior al 15% de la fuerza total máxima), y no dibujar los círculos que representan a las partículas.

Esto justamente es lo que se ha hecho para apreciar el nivel de esfuerzos internos de la muestra de 592 partículas a lo largo del proceso de carga (figura 6.19 a-e). Al iniciar la carga (a) se detecta una presencia relativamente abundante de fuerzas "negativas" (rectángulos discontinuos) que en algunos puntos ayudan a mantener las cadenas, rigidizándolas. La relativa importancia de las fuerzas debidas a succión en los meniscos ($F_w \simeq 1 \text{ a } 2 \cdot 10^{-6} Kp$) favorece la "oblicuidad" de las fuerzas totales en los contactos, desdibujando algunas cadenas de carga. Estos y otros detalles internos de la distribución de contactos se van a discutir en el epígrafe 6.3.2.3. Progresivamente dichas fuerzas van perdiendo presencia al aumentar el nivel de tensiones (b-c), hasta que en (d) las cadenas son más rotundas. El estado (e) es el mismo estado que el (d) pero con todas las fuerzas, para poder evaluar el 100% de ellas. En (f), al descargar, las variaciones de geometría son mínimas como se ha comentado (figura 6.15), y las cadenas de carga, aunque de menor entidad, se parecen más a las de (d) que a las de (a). En cierta manera se ha "congelado" la configuración ("oblicuidad" baja, etc) de las fuerzas, aunque se ha reducido su magnitud.

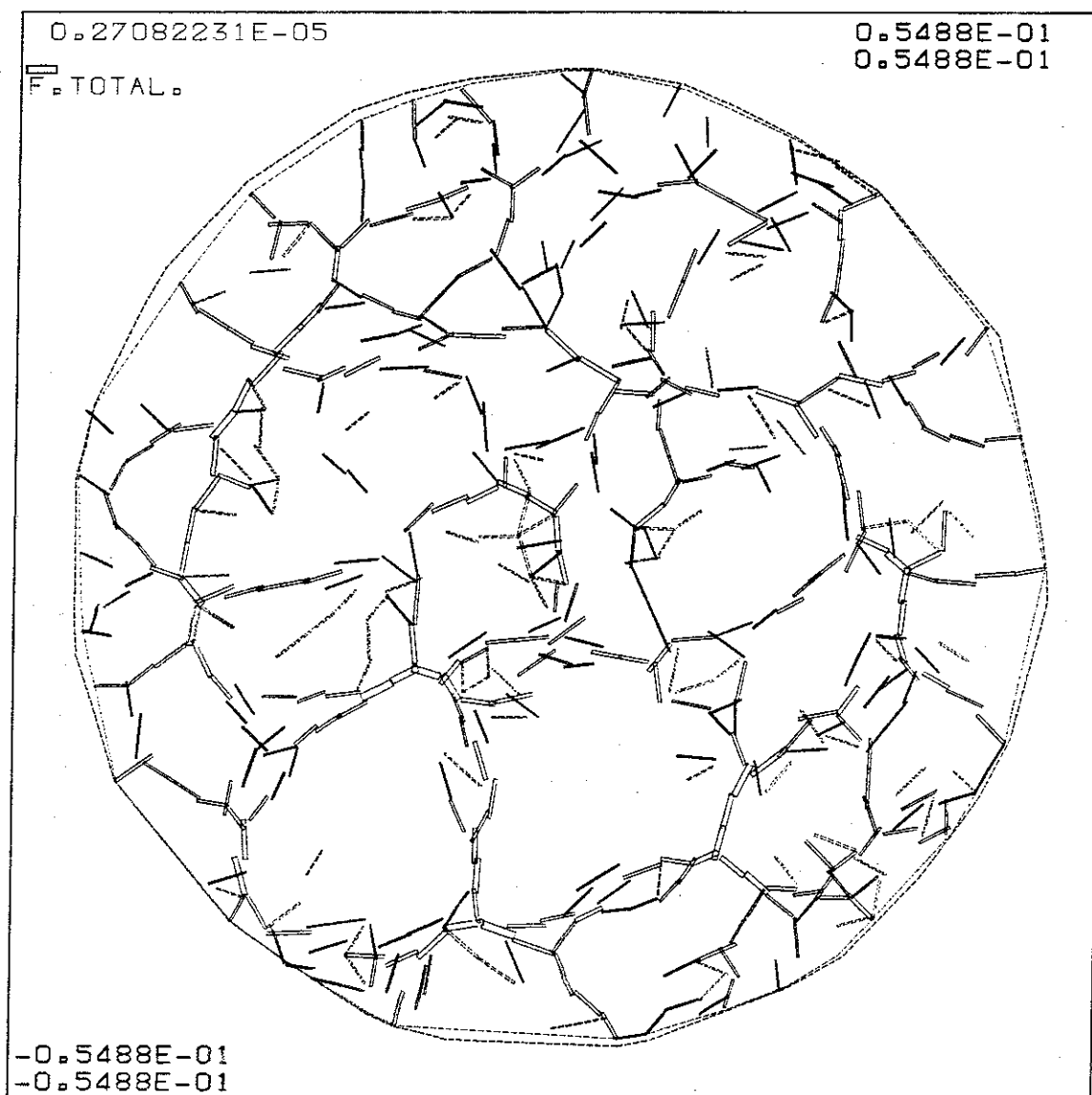


FIGURA 6.19 .- *Fuerzas totales en los contactos en la muestra de 592 partículas a lo largo del proceso de carga. Con el convenio de la figura 6.18 se han representado sólo aquellas cuyo módulo es superior al 15% de la máxima, que da escala a las correspondientes subfiguras y que se incluye en su parte superior izquierda, en Kp. Se incluye también, como perímetro común de comparación, el contorno correspondiente a la situación inicial tras generación (es decir el de la figura 5.9 y ss.).*
 a) $\sigma_{ISO} = 1.02 \text{ Kp/cm}^2$, $t_i = 2.34 \cdot 10^{-3} \text{ s}$.

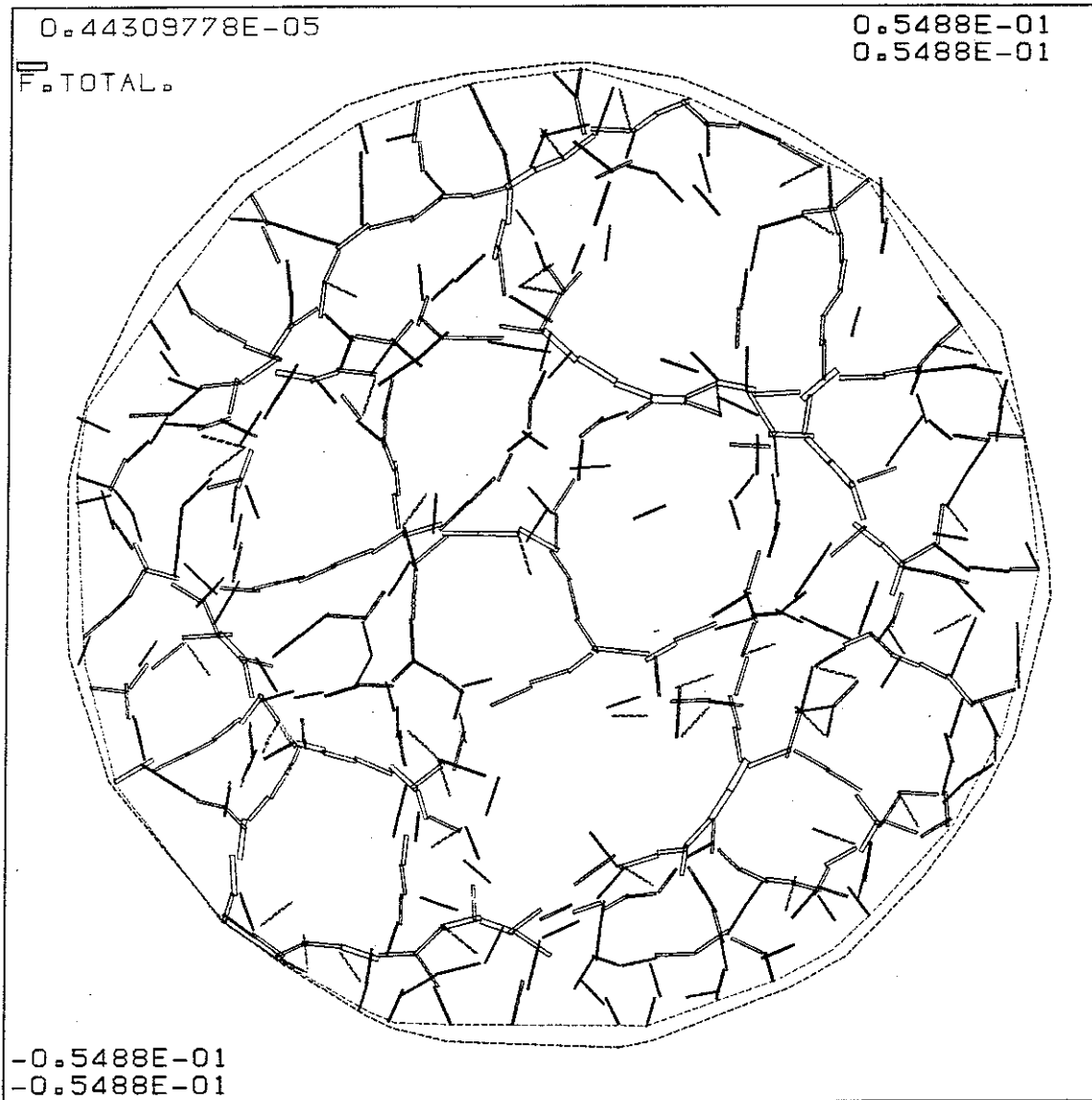


FIGURA 6.19 (Cont.) .- b) $\sigma_{ISO} = 1.04 \text{ Kp/cm}^2, t_i = 5.40 \cdot 10^{-3} \text{ s.}$

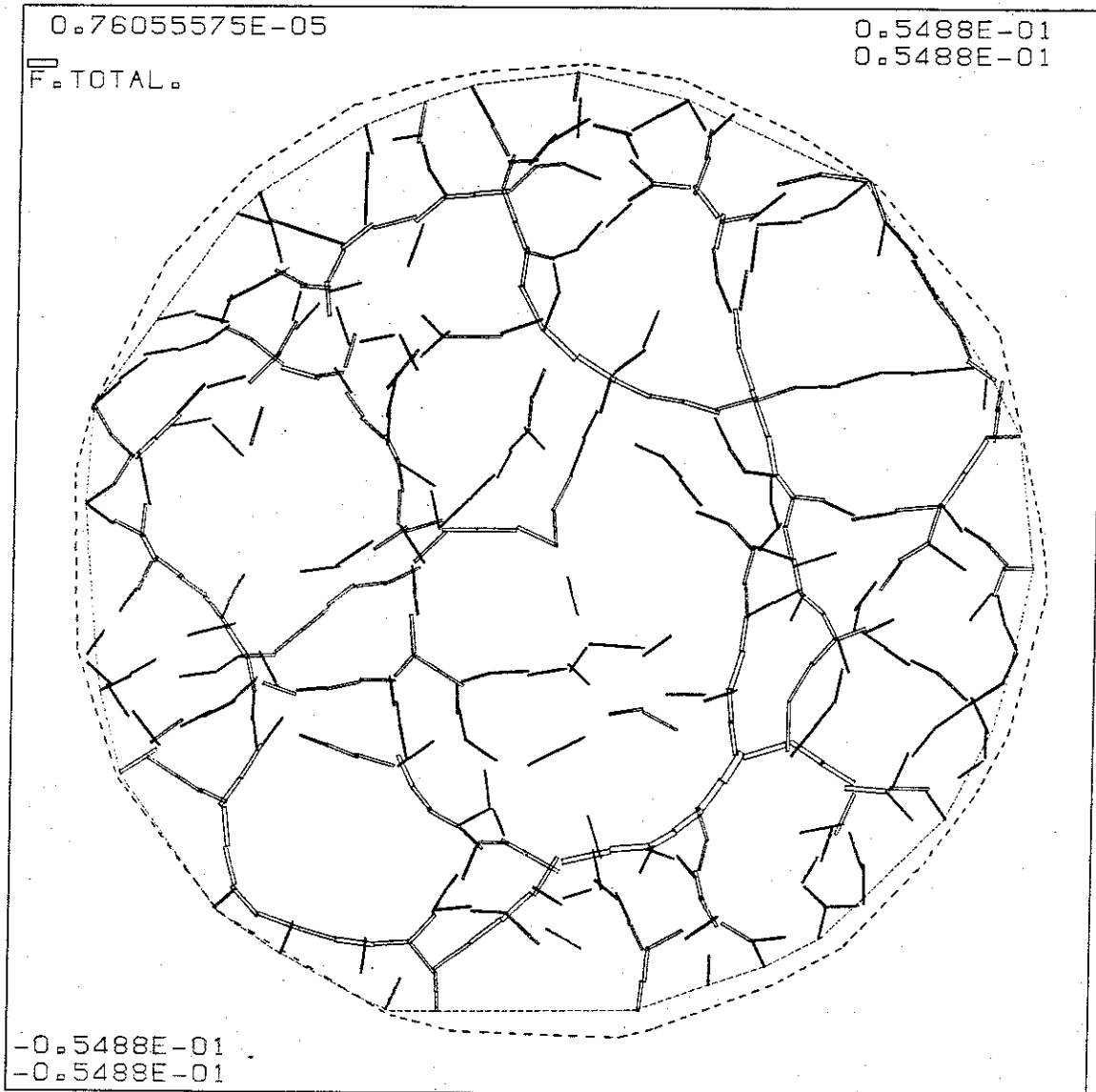


FIGURA 6.19 (Cont.) - c) $\sigma_{ISO} = 1.06 \text{ Kp/cm}^2, t_i = 8.05 \cdot 10^{-3} \text{ s.}$

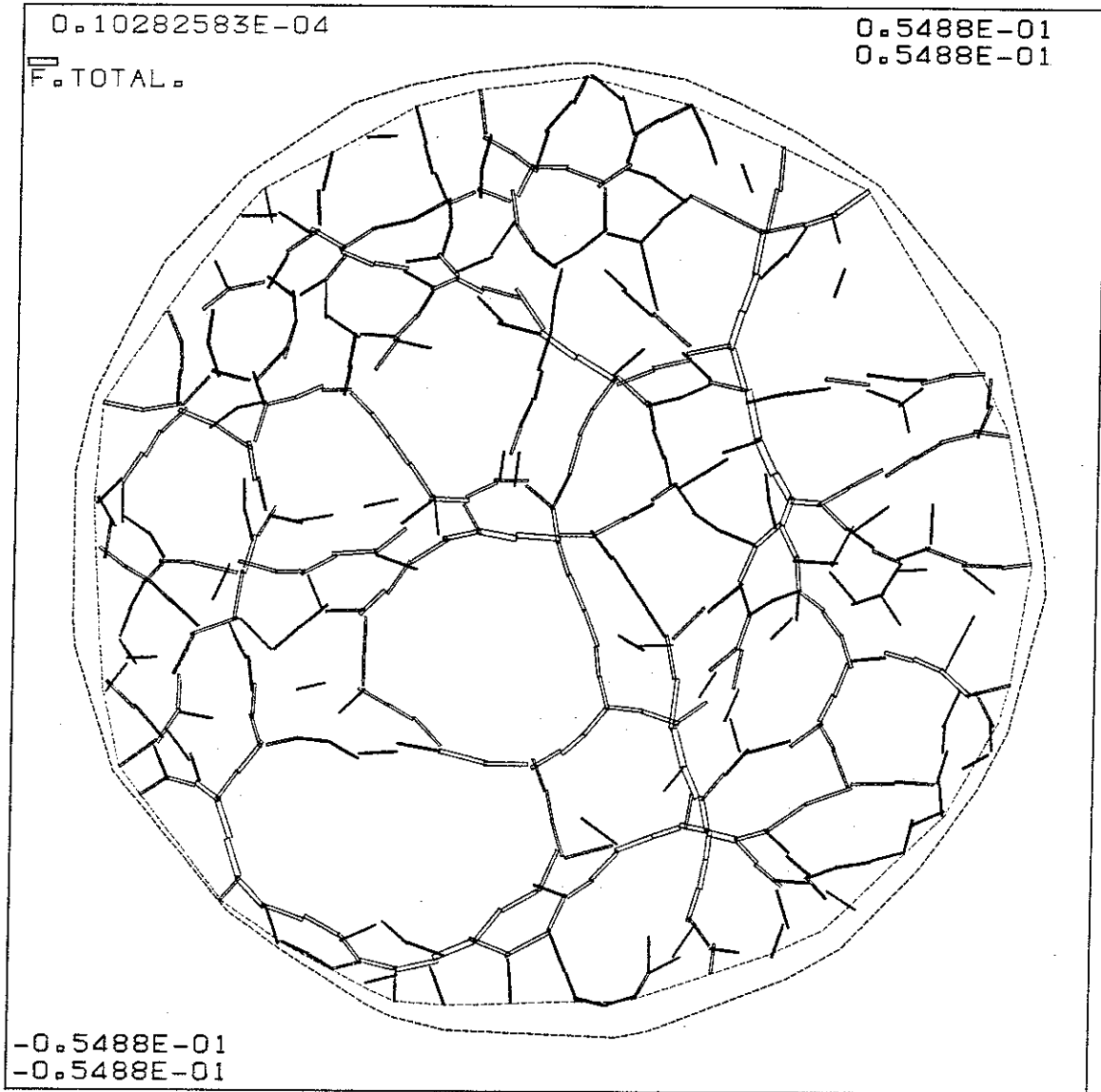


FIGURA 6.19 (Cont.) - d) $\sigma_{ISO} = 1.1 \text{ Kp/cm}^2, t_i = 1.02 \cdot 10^{-2} \text{ s}$.

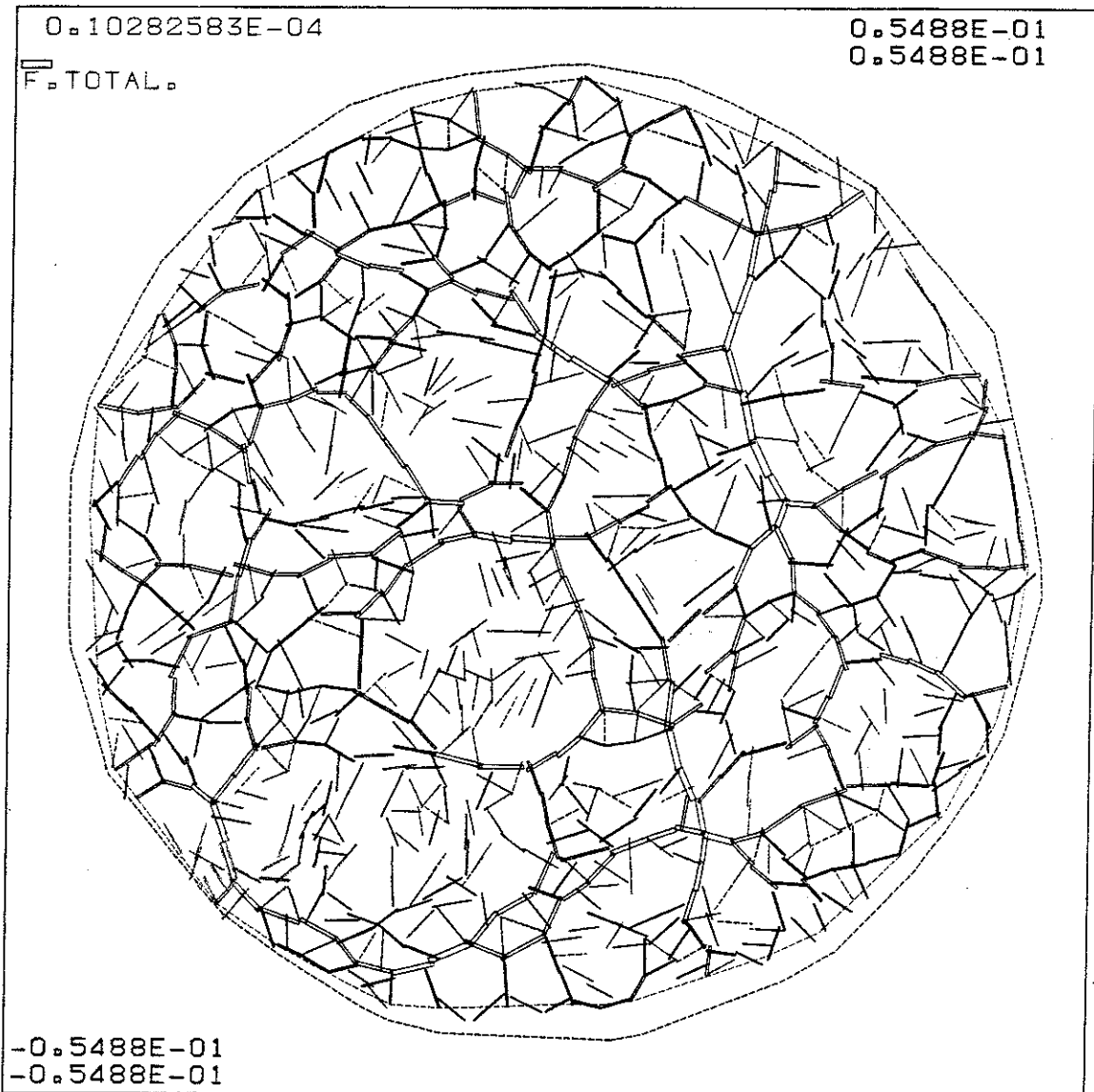


FIGURA 6.19 (Cont.) .- $e) \sigma_{ISO} = 1.1 \text{ Kp/cm}^2, t_i = 1.02 \cdot 10^{-2} s$
(todas las fuerzas).

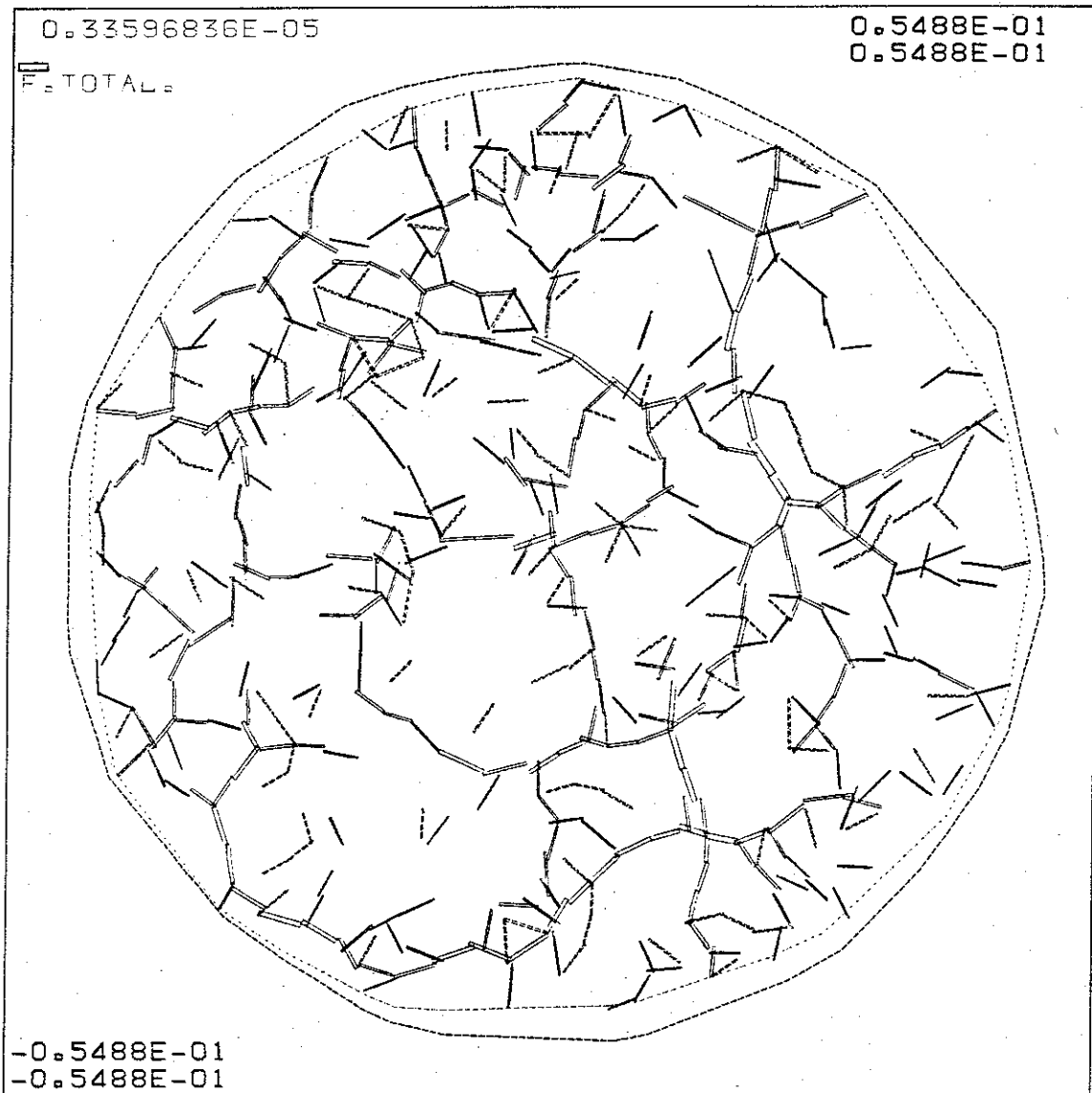


FIGURA 6.19 (Cont.) - $f) \sigma_{ISO} = 1.02 \text{ Kp/cm}^2, t_i = 1.04 \cdot 10^{-2} \text{ s.}$

INUNDACION CON COLAPSO

Desde el estado con carga isotrópica a $\sigma_{ISO} = 1.1 \text{ Kp/cm}^2$ con presión de fase gaseosa en el contorno de 1 Kp/cm^2 y presión de fase líquida 0.1 Kp/cm^2 ($s = 0.9 \text{ Kp/cm}^2$), se ha iniciado una nueva línea de ensayo numérico consistente en reducir la succión.

Por un lado se ha ensayado una inundación "parcial", rebajando la succión de 0.9 Kp/cm^2 a $s = 0.1 \text{ Kp/cm}^2$ (ensayo que ya se ha visto en su aspecto de flujo en el apartado 6.2.3). La reducción de porosidad es moderada (ver figura 6.15).

Por otro lado se inundó súbitamente la muestra (ICASO=2, pasando a situación saturada, succión nula) siguiendo las deformaciones provocadas en la muestra (un auténtico colapso), hasta alcanzar un nuevo estado de equilibrio (en $t_i = 1.62 \cdot 10^{-2} \text{ s}$, con el mismo origen de tiempos). La desaparición de los meniscos y de las fuerzas capilares (F_w) asociadas abre paso a deslizamientos y rotura de contactos, razón última del colapso, como se detalla en 6.3.2.3. A nivel global puede verse que la muestra ha reducido notablemente su volumen (ver figura 6.15).

En la figura 6.20 se puede seguir la disminución del índice de poros con el tiempo, durante el colapso. Parece ajustarse bien a expresiones de tipo hiperbólico con el tiempo o exponenciales como indica Popescu (1986).

La comparación de los contornos antes y después de inundar se muestra en la figura 6.21.

Mayor información se obtiene con la comparación de los volúmenes de los poros antes y después del colapso (figura 6.22) y con el dibujo de las fuerzas totales en los contactos en el interior de la muestra (figura 6.23). Como puede observarse (comparando dicha figura con la 6.19d) el entramado de cadenas de carga es más denso, soportando una carga menor, y dejando zonas intermedias "en blanco" menores también. Las fuerzas, en general, son menos oblicuas en relación a la normal

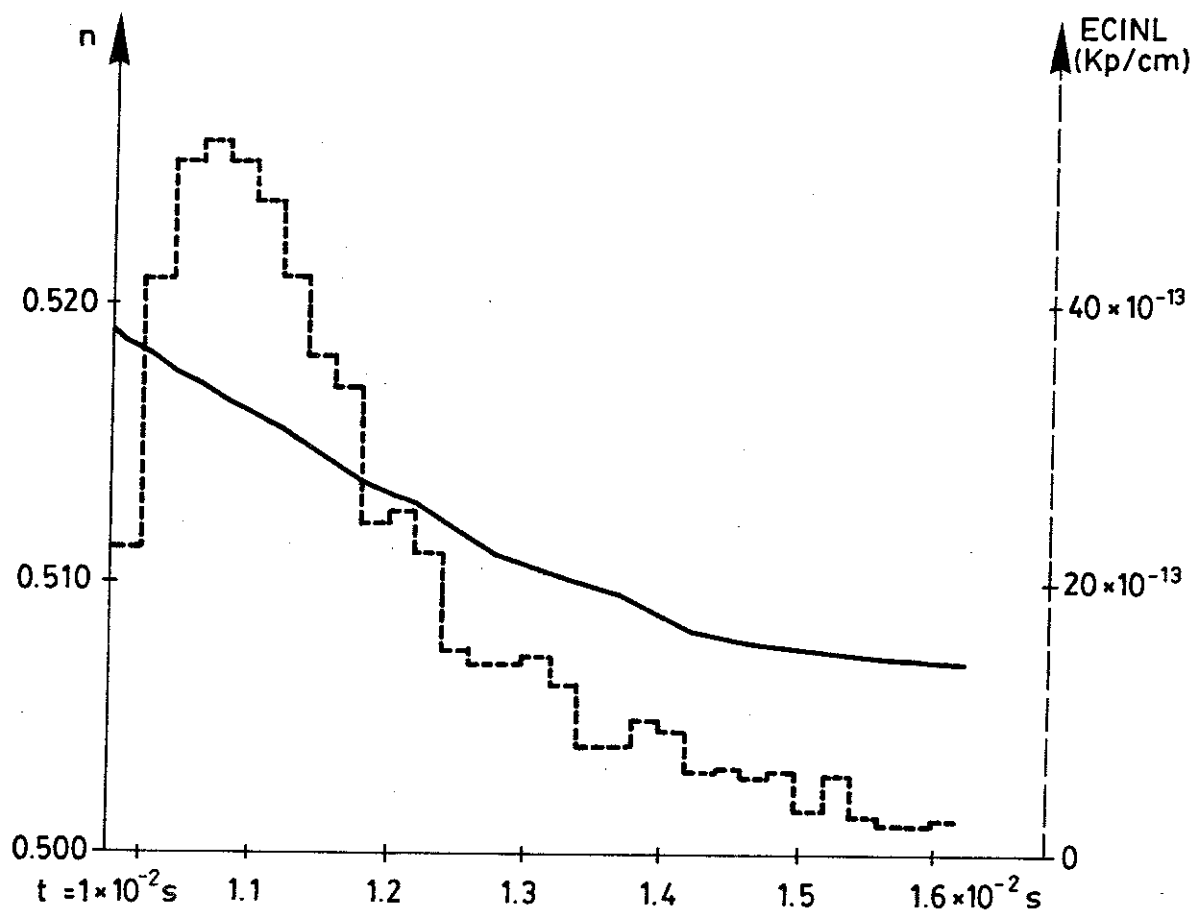


FIGURA 6.20 .- Disminución de la porosidad, n , con el tiempo en un proceso de colapso sobre 592 partículas. En línea discontinua se incluye la evolución de la suma de energías cinéticas lineales de las partículas (ECINL, medias temporales) hacia el equilibrio.

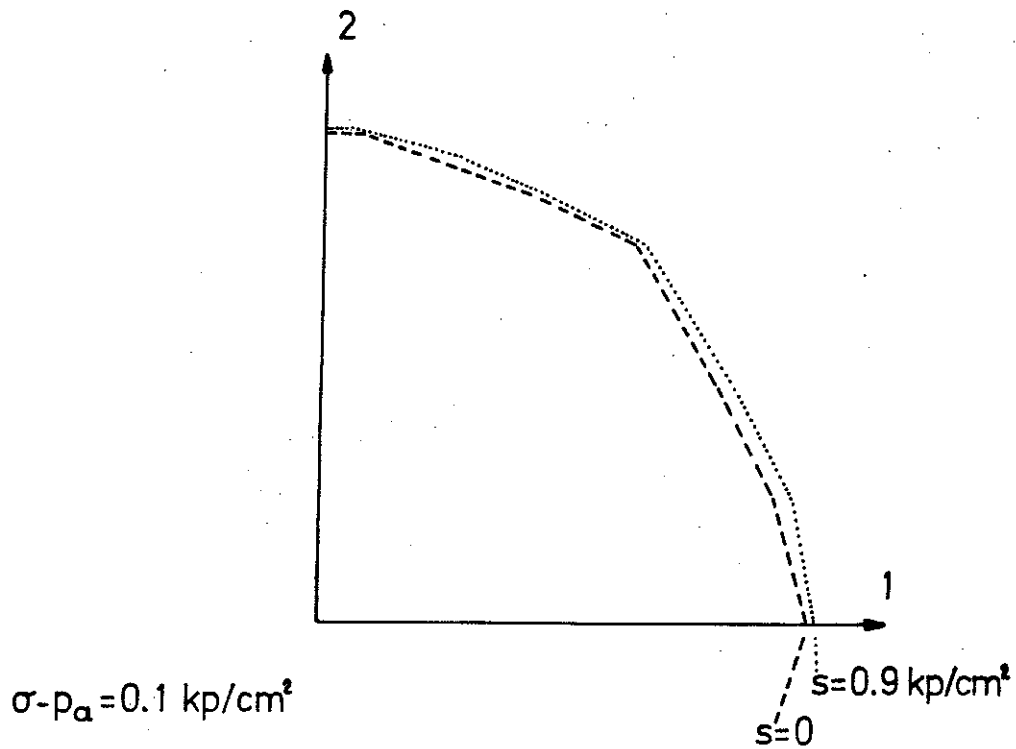


FIGURA 6.21.- Comparación del contorno de la muestra de 592 partículas bajo una carga isotrópica de 1.1 Kp/cm^2 (absoluta) antes y después de rebajar la succión de 0.9 Kp/cm^2 a cero (colapso).

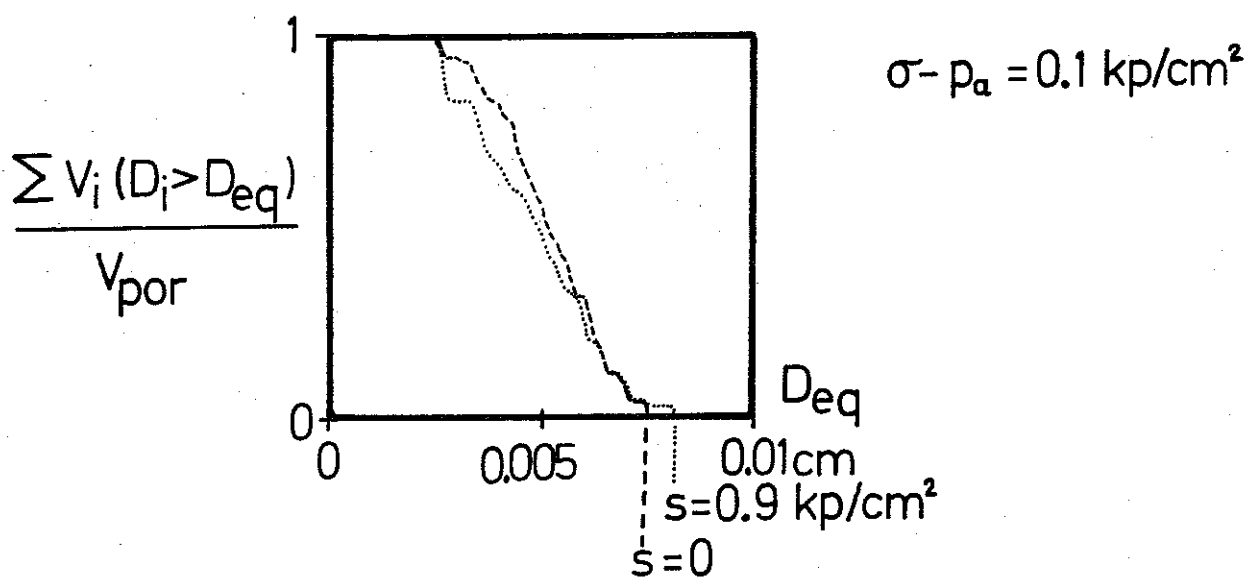


FIGURA 6.22 .- Porosimetría del modelo antes y después de rebajar la succión de 0.9 Kp/cm^2 a cero (colapso).

al contacto, al haberse disipado la fuerza capilar (F_w) que así lo favorecía.

El modelo se comporta frente a inundación (total o "parcial") como lo hace el suelo no saturado real. Mientras en los suelos saturados una variación de la presión intersticial producirá una pequeña disminución de volumen sin distorsión (Wood, 1979), en suelos no saturados una variación de la presión del agua (de la succión en definitiva), puede producir distorsiones locales y reducción de volumen apreciable.

CARGA DESVIADORA

Desde el estado de carga isotrópica absoluta $\sigma_{ISO} = 1.06 \text{ Kp/cm}^2$ con succión de 0.9 Kp/cm^2 , se ha iniciado una nueva línea de ensayo numérico consistente en aumentar la tensión desviadora, manteniendo la tensión media y la succión.

El eje principal mayor es el vertical. En tres escalones de carga la tensión principal mayor ha ido aumentando desde 1.06 Kp/cm^2 hasta $\sigma_{22} = 1.092 \text{ Kp/cm}^2$ y la menor disminuyendo hasta $\sigma_{11} = 1.028 \text{ Kp/cm}^2$ (absolutas). En esta última situación el ángulo de rozamiento movilizado (tangente al círculo de Mohr desde el origen) es de 32.2° :

$$\sin \phi_{mov} = \frac{(\sigma_I - p_a) - (\sigma_{II} - p_a)}{(\sigma_I - p_a) + (\sigma_{II} - p_a)} \quad (6.2)$$

Este es un estado realmente cercano a la rotura, aunque la muestra tras una apreciable deformación (ver figura 6.24) parecía que lentamente iba equilibrándose (reducción de velocidades). Lo dilatado del ensayo en tiempo ha impedido su prolongación. Es muy interesante constatar en dicha figura como las reordenaciones internas producidas por la carga conducen a la formación de unas cadenas muy notables para resistirla. A nivel de poros en la figura 6.25 se incluye la porosimetría comparada antes y después del desviador. El esfuerzo de corte ha provocado la subdivisión de algunos de los poros mayores en otros menores.

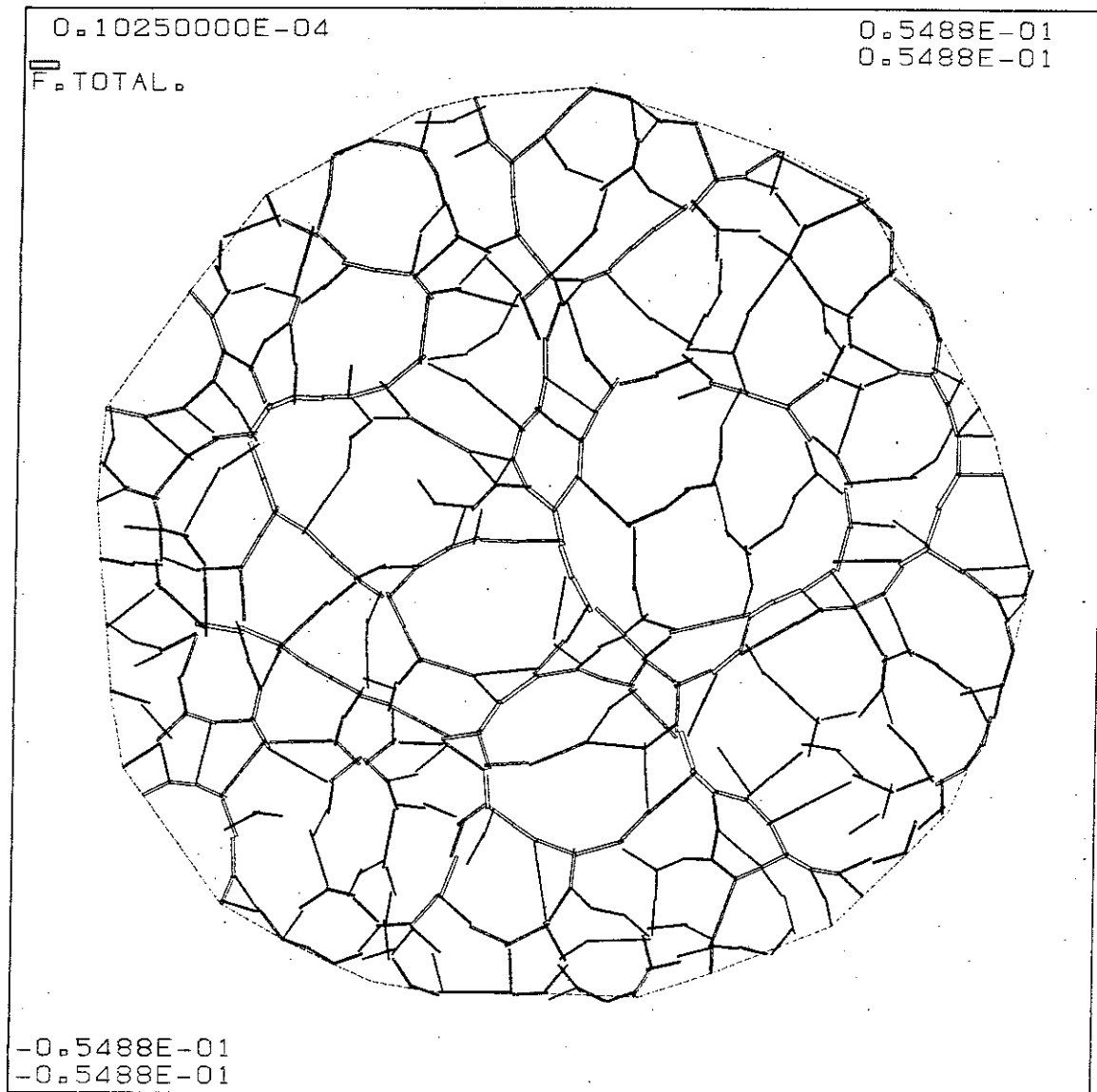


FIGURA 6.23 .- Fuerzas totales en los contactos de las 592 partículas tras la reducción de la succión de 0.9 Kp/cm^2 a cero. $\sigma_{ISO} = 1.1 \text{ Kp/cm}^2$, $t_i = 1.62 \cdot 10^{-2} \text{ s}$. Sólo se han incluido aquellas fuerzas cuyo módulo es superior al 15% de la máxima, que es de $6.86 \cdot 10^{-6} \text{ Kp}$. Sin embargo los espesores de los segmentos de la figura se han escalado con el valor de $1.025 \cdot 10^{-5} \text{ Kp}$ para su comparación directa con la figura 6.19 d (antes del colapso).

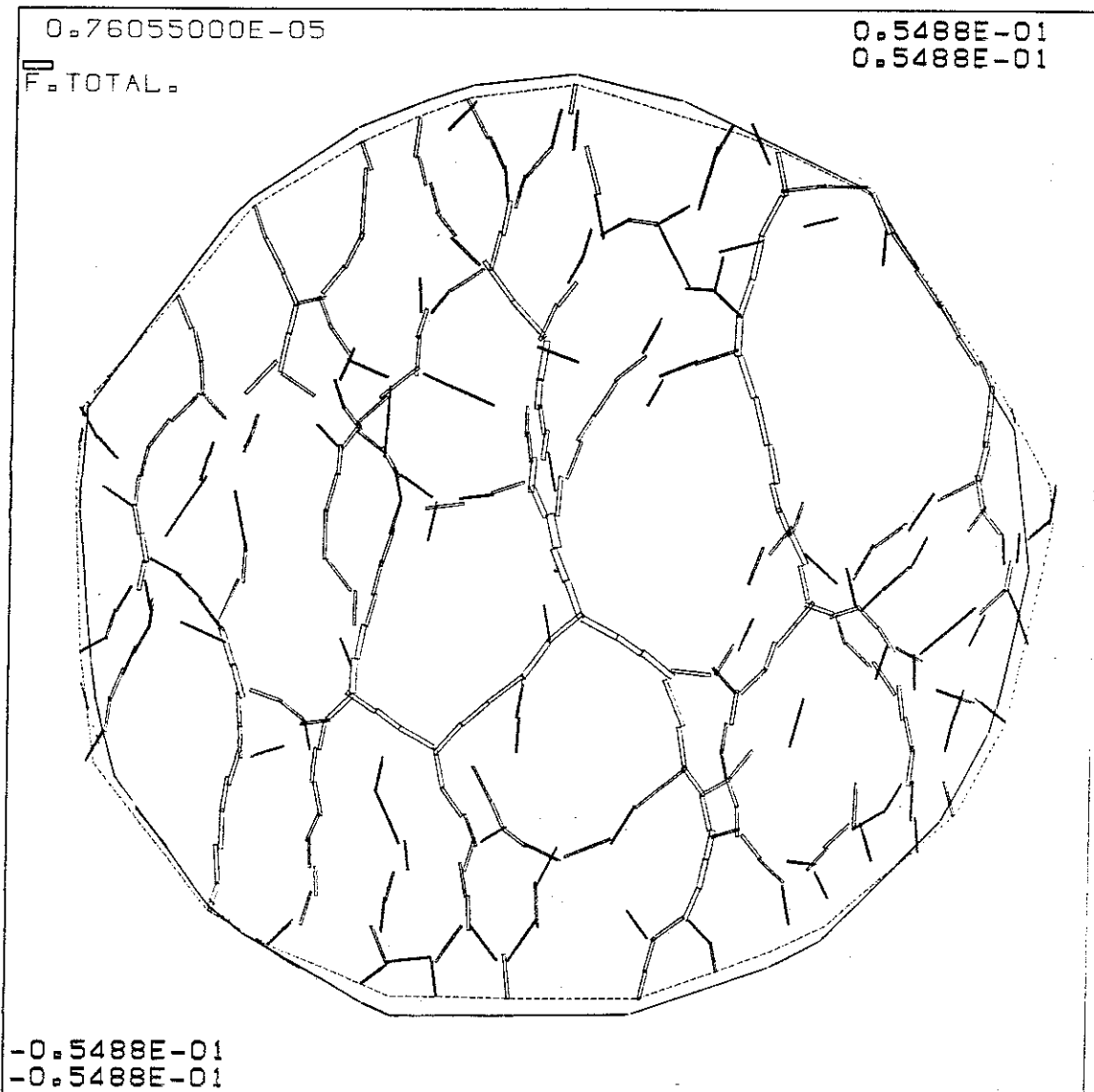


FIGURA 6.24 .- Fuerzas totales en los contactos de las 592 partículas tras el aumento del desviador ($\sigma_{11} = 1.028 \text{ Kp/cm}^2$, $\sigma_{22} = 1.092 \text{ Kp/cm}^2$, succión = 0.9 Kp/cm^2 , $t_i = 1.112 \cdot 10^{-2} \text{ s}$). Sólo se han incluido aquellas fuerzas cuyo módulo es superior al 15% de la máxima, que es de $8.734 \cdot 10^{-6} \text{ Kp}$. Sin embargo los espesores de los segmentos de la figura se han escalado con el valor de $7.605 \cdot 10^{-6} \text{ Kp}$ para su comparación directa con la figura 6.19 c (igual tensión media, $\sigma_{150} = 1.06 \text{ Kp/cm}^2$). Justamente el "contorno" que se incluye con línea continua corresponde a ese estado previo a la aplicación del desviador.

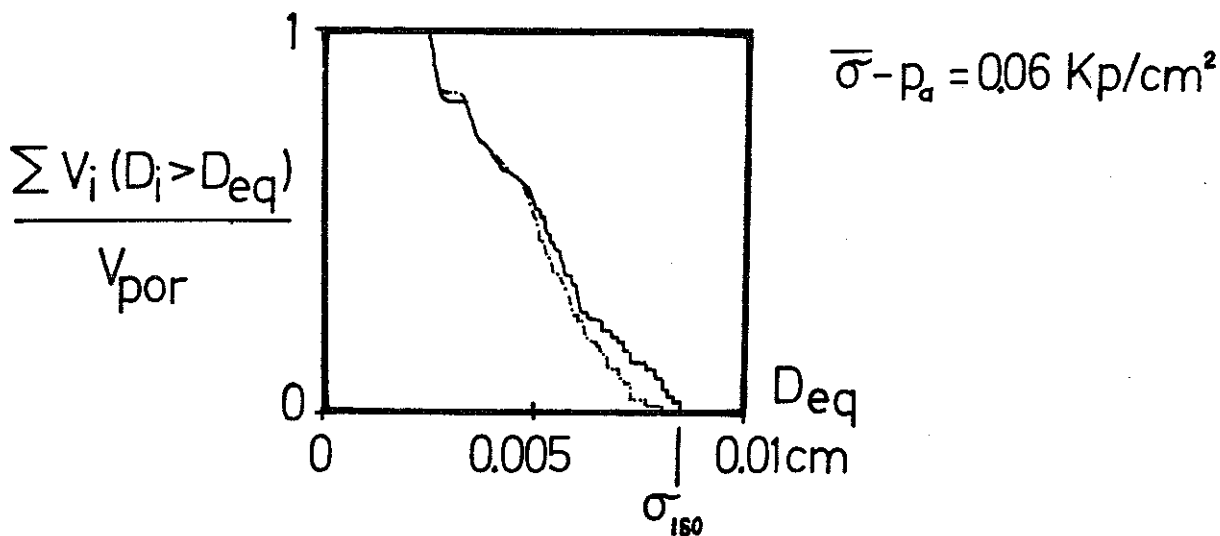


FIGURA 6.25 .- Porosimetría del modelo antes y después de aplicar el desviador (a $t_i = 1.112 \cdot 10^{-2} s$).

6.3.2.2 PARTICULAS “COMPRESIBLES”

En este caso, a las 592 partículas se les ha asignado el conjunto de parámetros mecánicos de la relación 5.15. De acuerdo a la ecuación 5.10 se ha podido usar un $\Delta t_m = \text{TINCM} = 1.25 \cdot 10^{-7} s$.

Puede pensarse que las esferas del modelo no están formadas por un único grano de material continuo sino que son agregados de partículas más finas, tipo arcilla, saturadas, con una deformabilidad varios órdenes de magnitud superior. Por ello los valores de los solapes entre partículas resultan mayores, debiéndose anular el “residuo” (debido al aire) del cálculo de F_w (ver anejo A2, ecuación A2.12).

Los ensayos numéricos se han seguido a través de dibujos de velocidad instantánea de la partícula similares a los de la figura 6.14, hasta la no existencia

de zonas con movimientos coherentes. Las velocidades medias de recorrido son del orden de 3 cm/s. El "ruido de fondo" aceptado al final de una línea ha sido de 0.3 cm/s normalmente y de hasta 2 cm/s en partículas aisladas, normalmente ligadas al contorno. Esto equivale a una suma de energías cinéticas lineales menor que $1 \cdot 10^{-11} \text{ Kp} \cdot \text{cm}$. También la porosidad, la dimensión total horizontal (l_{11}) y vertical (l_{22}) y el número de poros y meniscos debían mantenerse estables.

Las líneas de ensayo numérico que se resumen a continuación son las de: ciclo cerrado en un plano carga-succión con aumento monótonico del grado de saturación; ciclo cerrado carga-succión, no monótonico; ciclos humedecimiento-secado; colapsos con desviador; y finalmente partículas compuestas poliesféricas.

CICLO CERRADO

CARGA-SUCCION CON AUMENTO MONOTONICO DEL GRADO DE SATURACION

Desde la situación de flujos interiores estabilizados (succión 0.9 Kp/cm^2 , figura 6.9 h) se ha aplicado una $\sigma_{ISO} = 1.02 \text{ Kp/cm}^2$, dejando libertad a las esferas para moverse hasta equilibrarse en lo que constituirá el punto de partida del ciclo en cuestión (punto A, figura 6.27). En los primeros instantes del movimiento las esferas han mostrado una tendencia a acercarse mutuamente, apiñándose, debido a que la compresibilidad ahora es alta, los solapes eran nulos al principio y la fuerza capilar (o "de sobrecontacto", F_w , debida a los meniscos) las obligaba a ello (ver figura 6.26). Posteriormente los movimientos han respondido más a reorganizaciones generales debidas a la carga en el contorno, llegándose finalmente a la situación "A" (figura 6.28i).

A partir de esta situación se ha iniciado un ciclo cerrado con variaciones alternativas de tensión exterior y succión de manera que en cada una de dichas variaciones de sollicitación el grado de saturación aumenta en relación al punto de partida. Esto se consigue si los cambios son en el sentido de aumentar la carga

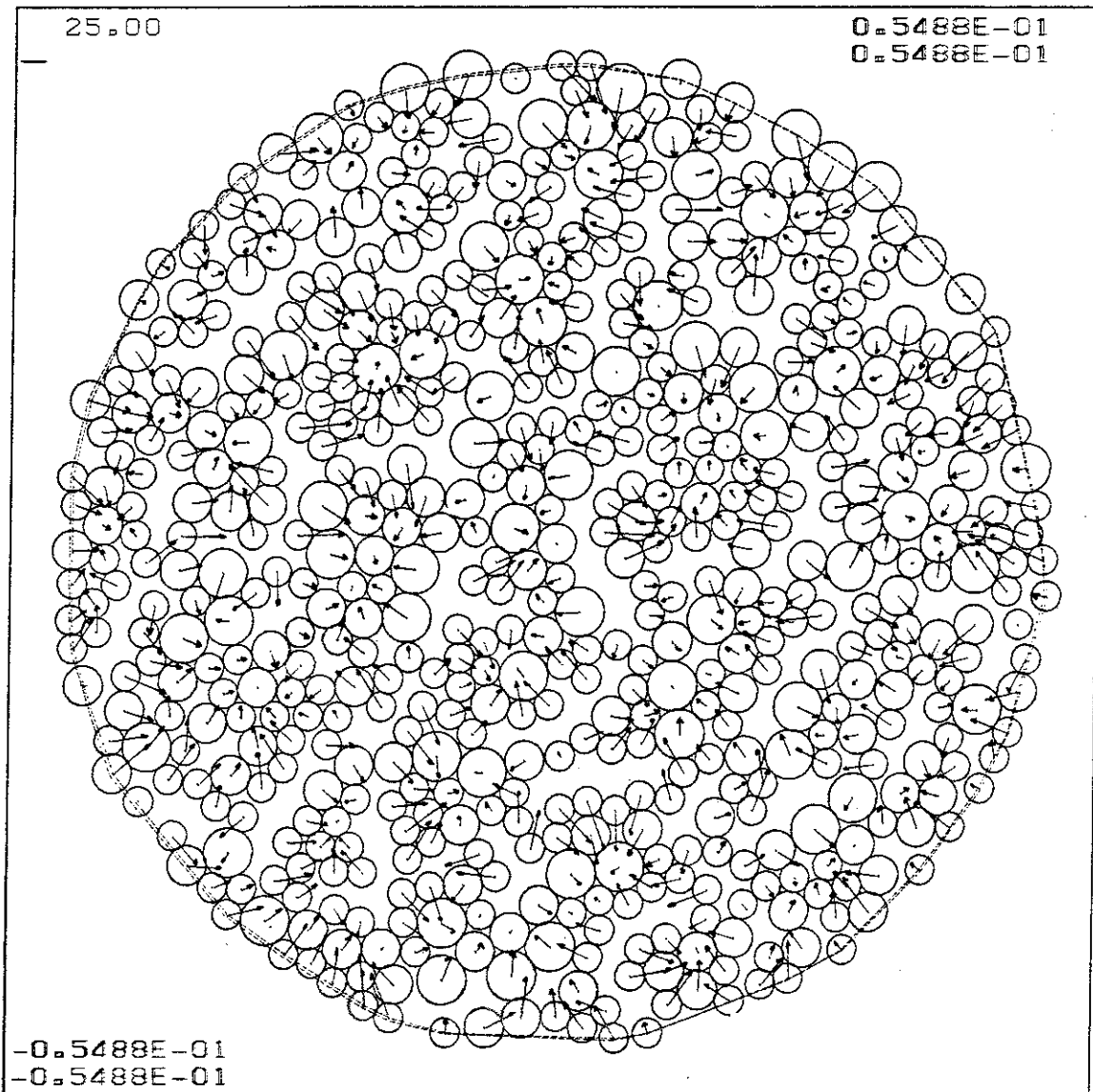


FIGURA 6.26 .- Acercamientos iniciales entre esferas a partir de la situación con solapes nulos, debido a la acción de los meniscos y a la compresibilidad de las esferas.

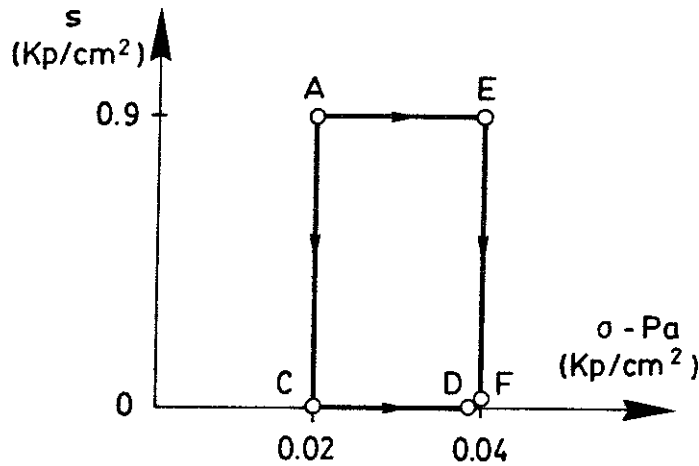
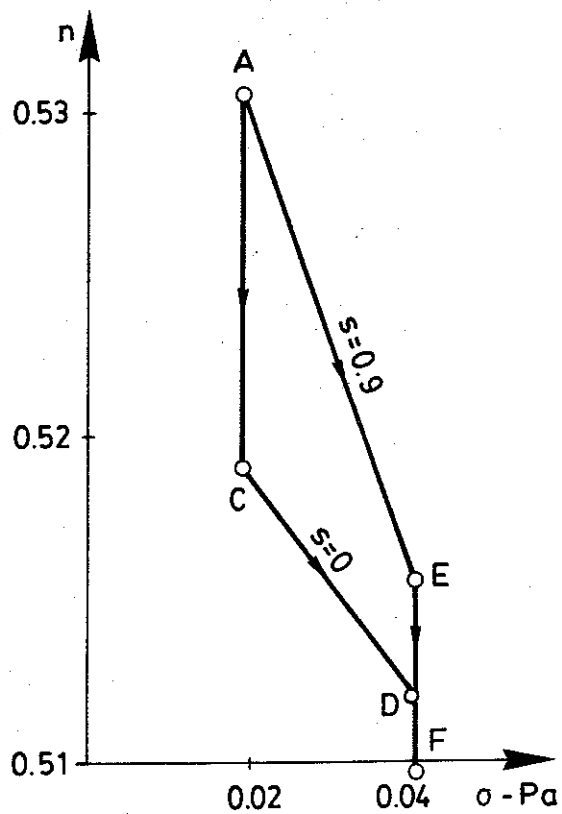


FIGURA 6.27 .- a) Ciclo cerrado carga-succión, con aumento monótonico del grado de saturación. Plano $(\sigma - p_a) \times s$. El punto de partida es el A ($\sigma_{ISO} = 1.02 \text{ Kp/cm}^2$, $s = 0.9 \text{ Kp/cm}^2$), y el final el ($\sigma_{ISO} = 1.04 \text{ Kp/cm}^2$, $s = 0$). Las dos trayectorias seguidas son la ACD y la AEF.

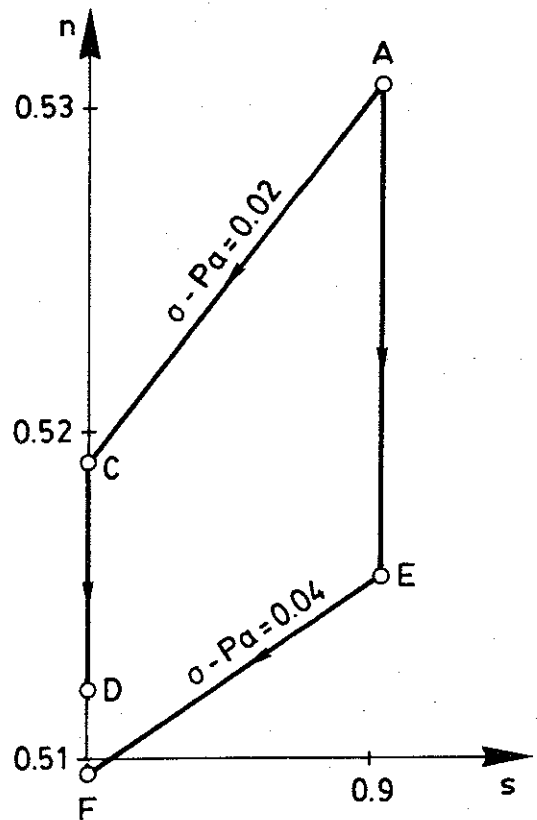
exterior (que reducirá el volumen de huecos y hará aumentar S_r) o en el sentido de disminuir la succión (con efecto de mismo signo sobre S_r , ver figura 6.27). El ciclo en cuestión, partiendo del punto "A" ($\sigma - p_a = 0.02 \text{ Kp/cm}^2$, $s = 0.9 \text{ Kp/cm}^2$) lleva por dos caminos distintos hasta la situación $\sigma - p_a = 0.04 \text{ Kp/cm}^2$ y $s = 0$. Por el primer camino se inunda primero la muestra (estado C) y luego se aumenta la carga (estado D), mientras que por el segundo camino los cambios son en orden inverso (puntos E y F). En estas condiciones los estudios basados en superficies de estado para el grado de saturación y la porosidad predicen una situación final independiente del camino (ver capítulo 2).

Los resultados obtenidos al ir acometiendo los distintos "ejes" del ciclo descrito se presentan en la figura 6.28 (Fuerzas totales en contactos), 6.29 (disposición de las esferas en el plano del modelo) y 6.30 (porosimetrías).

Al inundar la muestra (paso de A a C ó de E a F) en realidad se anula súbitamente el efecto de los meniscos de agua (la atracción mutua que ejerce entre



b)



c)

FIGURA 6.27 (Cont.) - (b y c). Valores de la porosidad obtenidos en las dos trayectorias (sólo corresponden a puntos en equilibrio los extremos A, C, D, E, y F, de los segmentos).

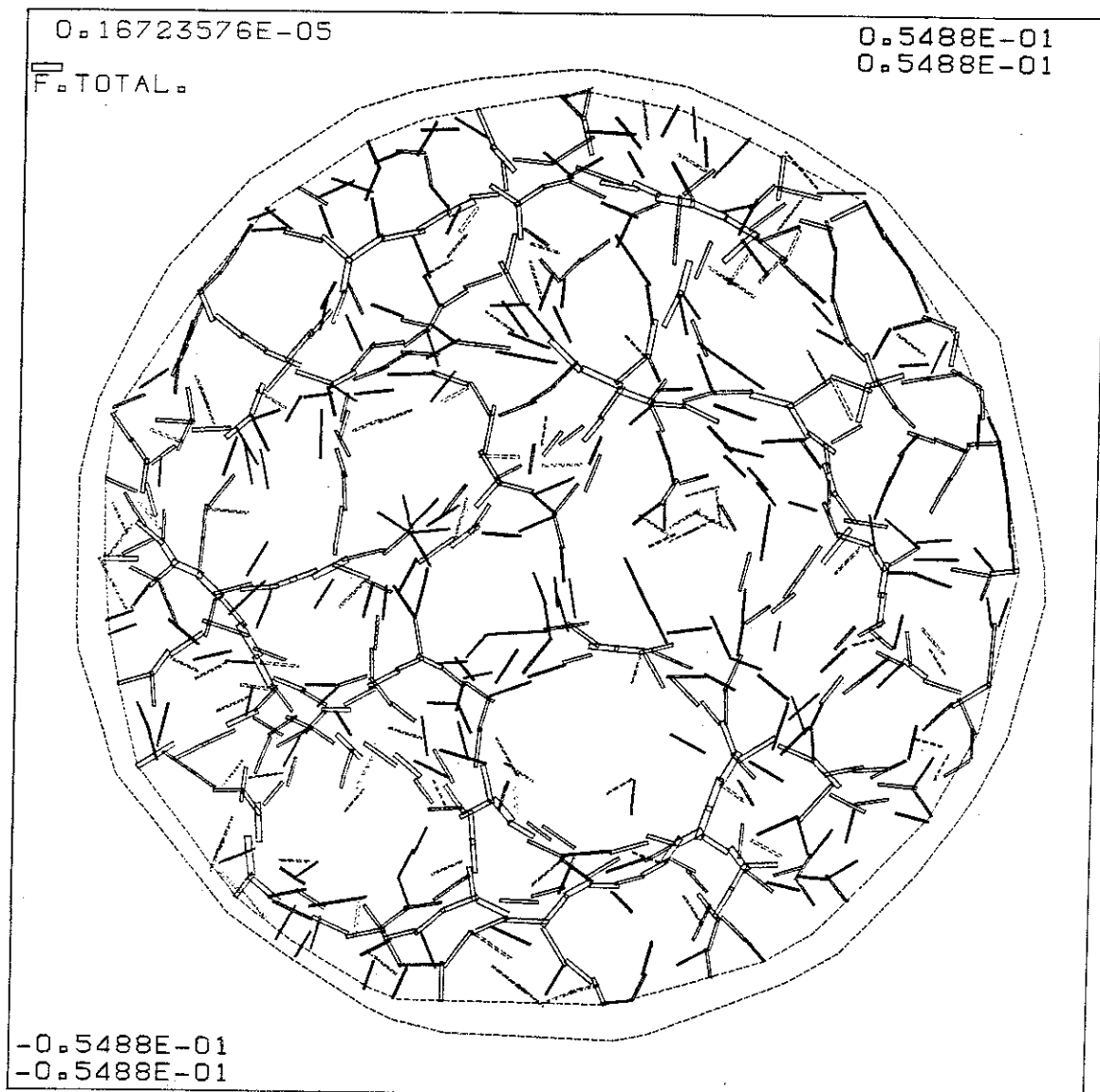


FIGURA 6.28 .- Ciclo cerrado carga-succión monótonico. Fuerzas totales en los contactos entre partículas. Se han representado las superiores al 15% de la máxima, cuyo valor se incluye en la parte superior izquierda, en Kp. El contorno correspondiente a la situación inicial tras generación se incluye también como perímetro común de comparación.

i) Estado A. $\sigma_{ISO} = 1.02 \text{ Kp/cm}^2$, $s = 0.9 \text{ Kp/cm}^2$, $t_i = 1.9 \cdot 10^{-3} \text{ s}$.

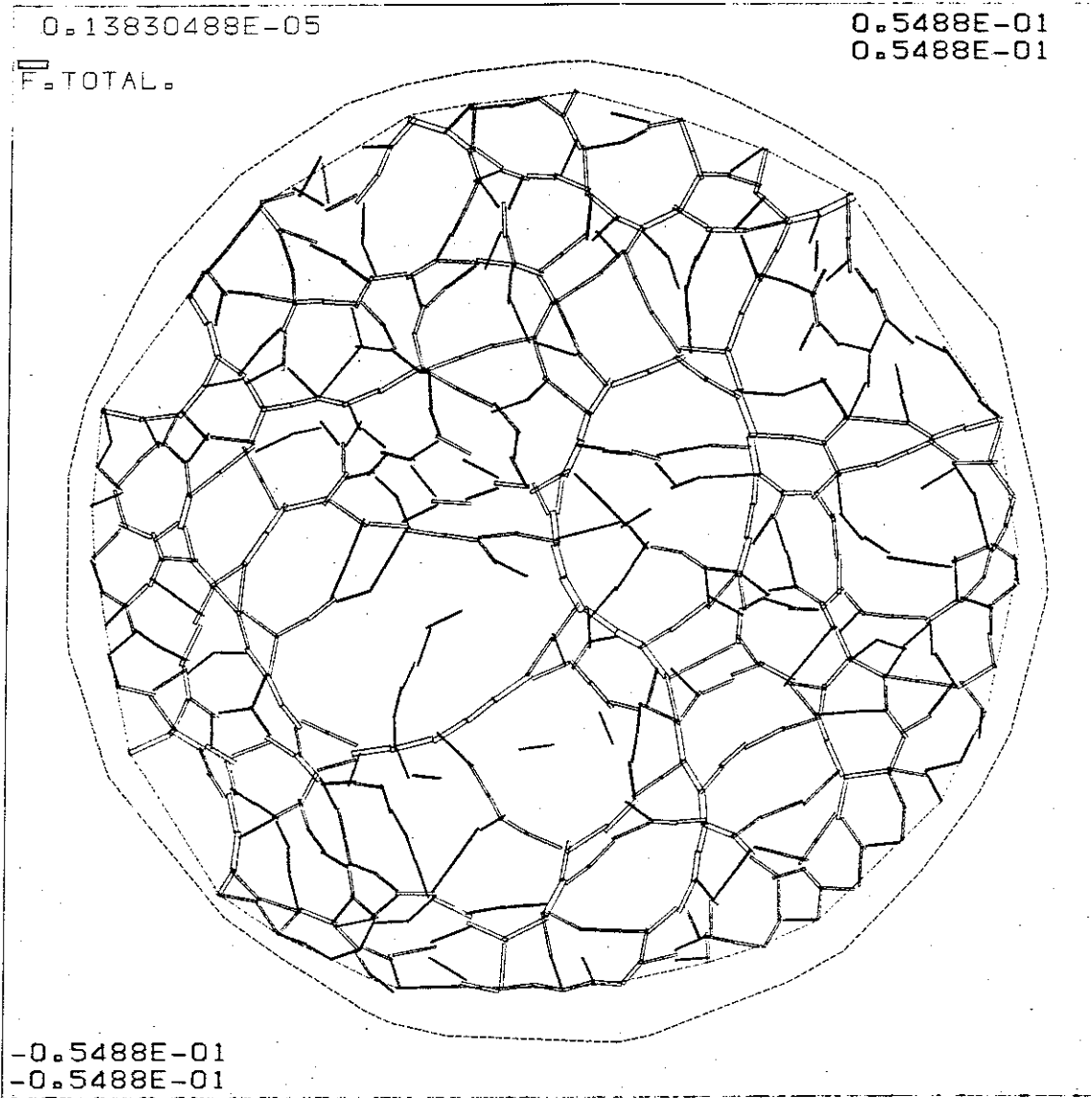


FIGURA 6.28 (Cont.) .- ii) Estado C. $\sigma_{ISO} = 1.02 \text{ Kp/cm}^2$, $s = 0$, $t_i = 10^{-2} s$.

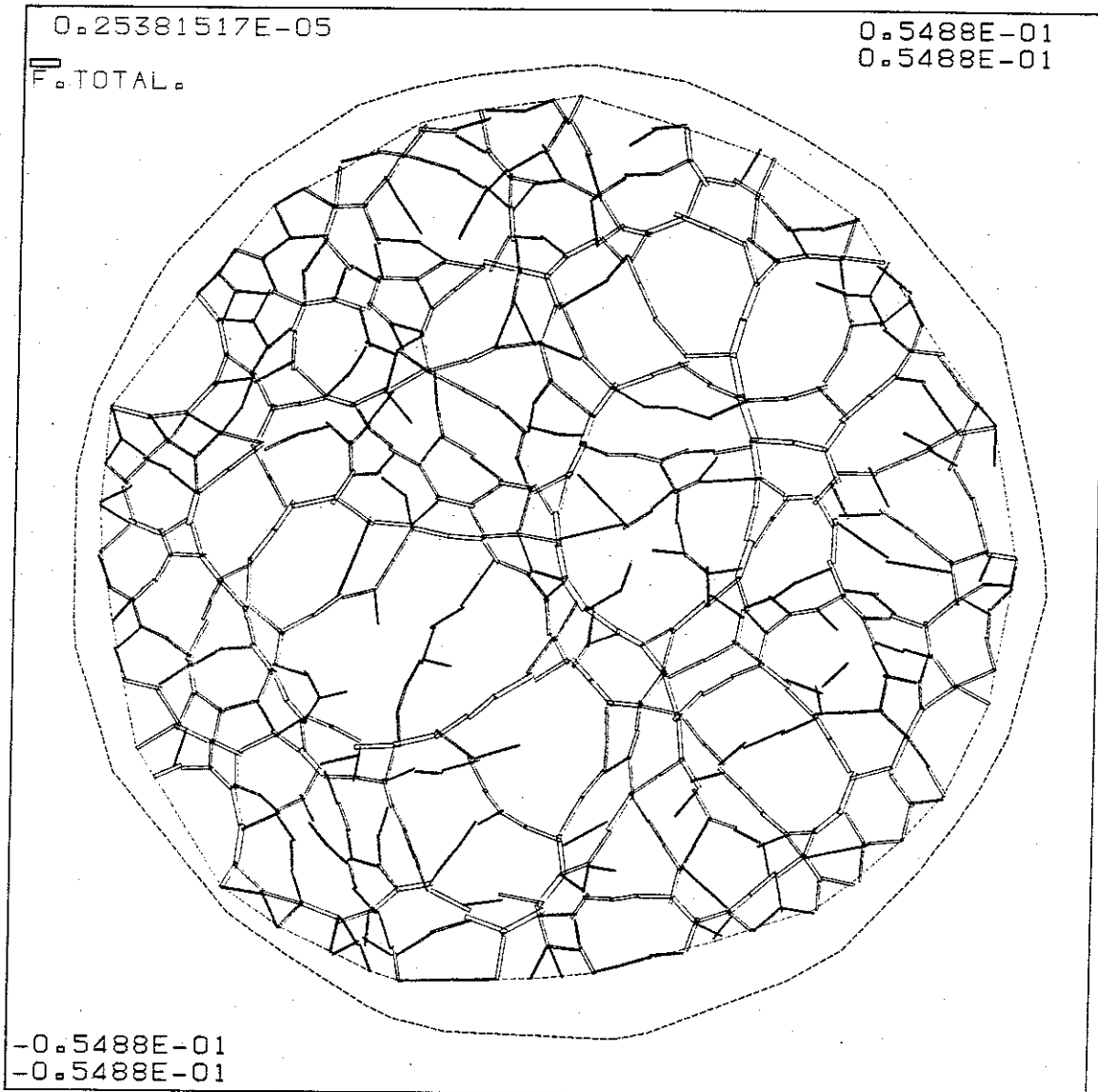


FIGURA 6.28 (Cont.) .- iii) Estado D. $\sigma_{ISO} = 1.04 \text{ Kp/cm}^2$, $s = 0$, $t_i = 1.6 \cdot 10^{-2} s$.

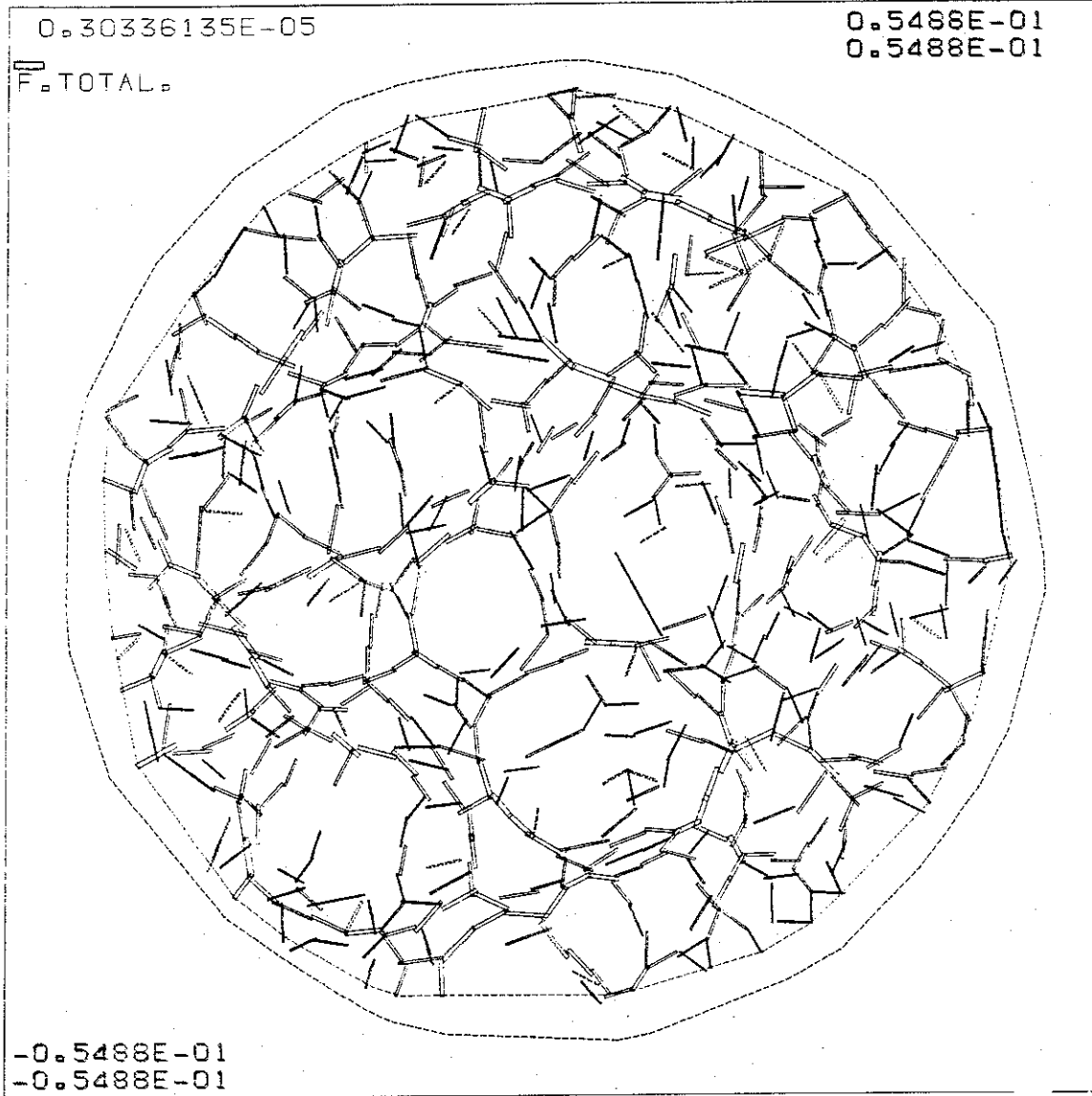


FIGURA 6.28 (Cont.) .- iv) Estado E. $\sigma_{ISO} = 1.04 \text{ Kp/cm}^2$, $s = 0.9 \text{ Kp/cm}^2$, $t_i = 2.4 \cdot 10^{-3} \text{ s}$.

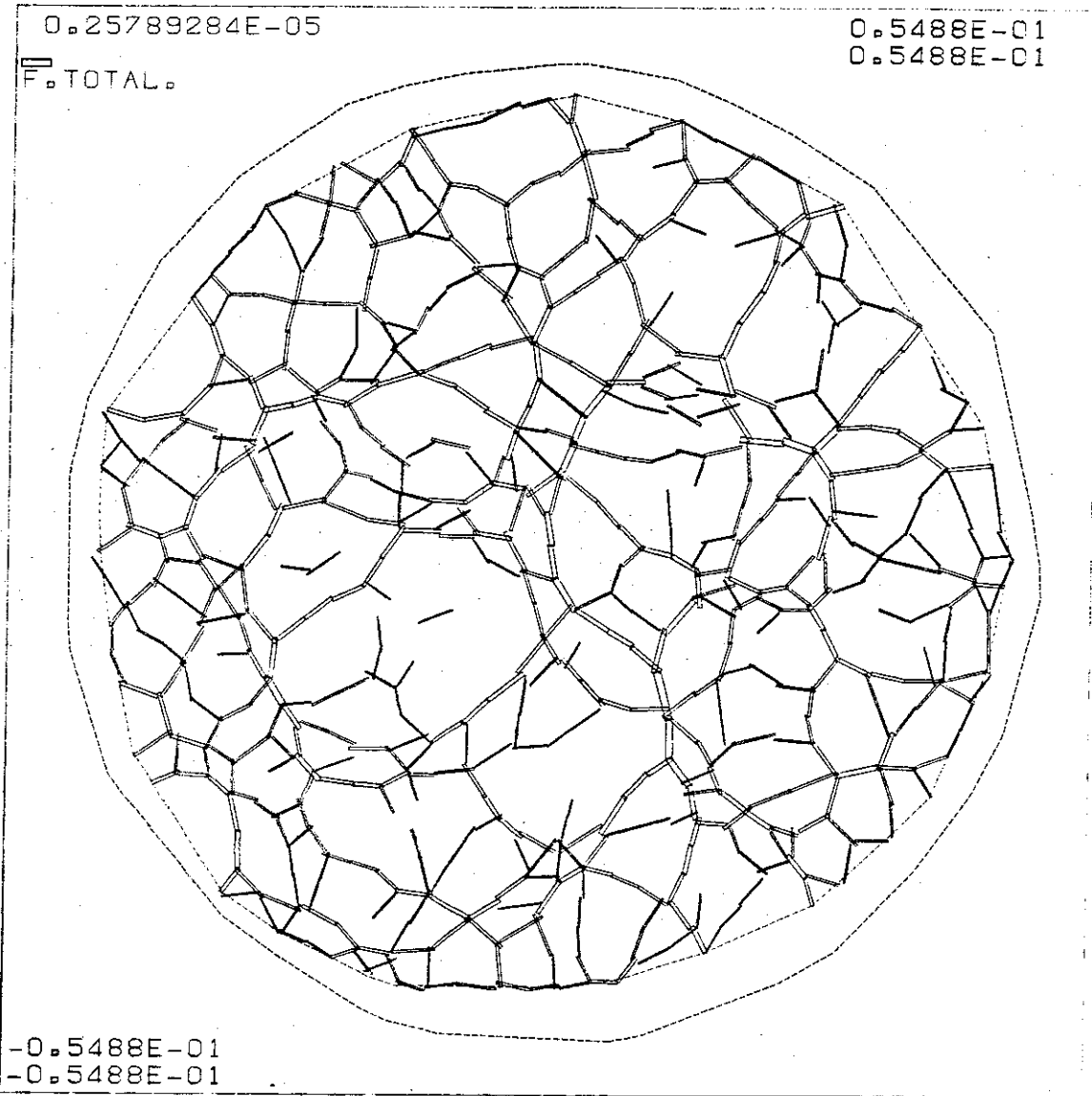


FIGURA 6.28 (Cont.) .- v) Estado F. $\sigma_{ISO} = 1.04 \text{ Kp/cm}^2$, $s = 0$, $t_i = 9 \cdot 10^{-3} \text{ s}$.

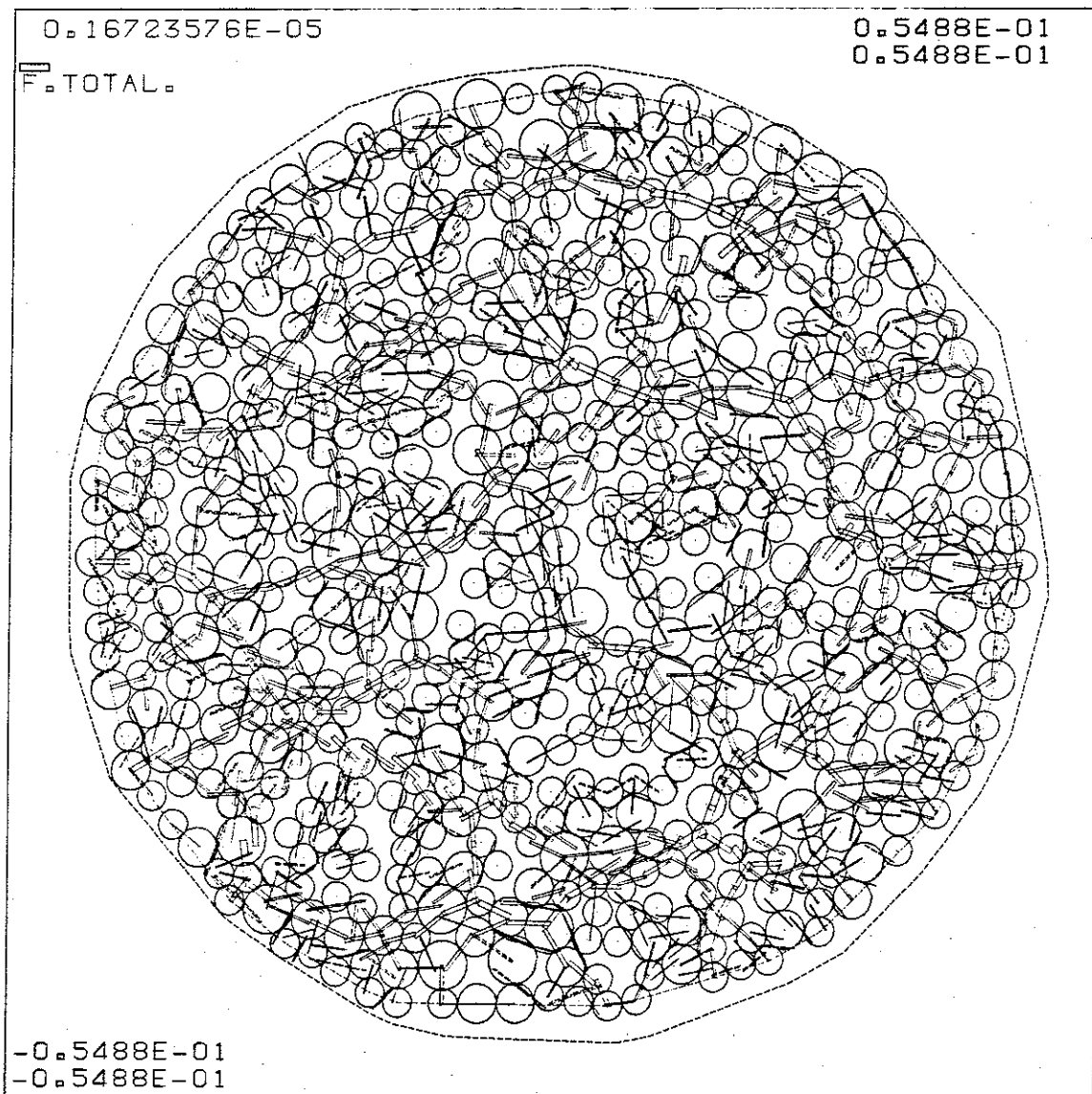


FIGURA 6.29 .- Ciclo cerrado carga-succión monotónico. Disposición de las esferas en el plano del modelo.

i) Estado A. $\sigma_{ISO} = 1.02 \text{ Kp/cm}^2$, $s = 0.9 \text{ Kp/cm}^2$, $t_i = 1.9 \cdot 10^{-3} \text{ s}$.
Adicionalmente se incluyen todas las fuerzas en los contactos entre esferas.

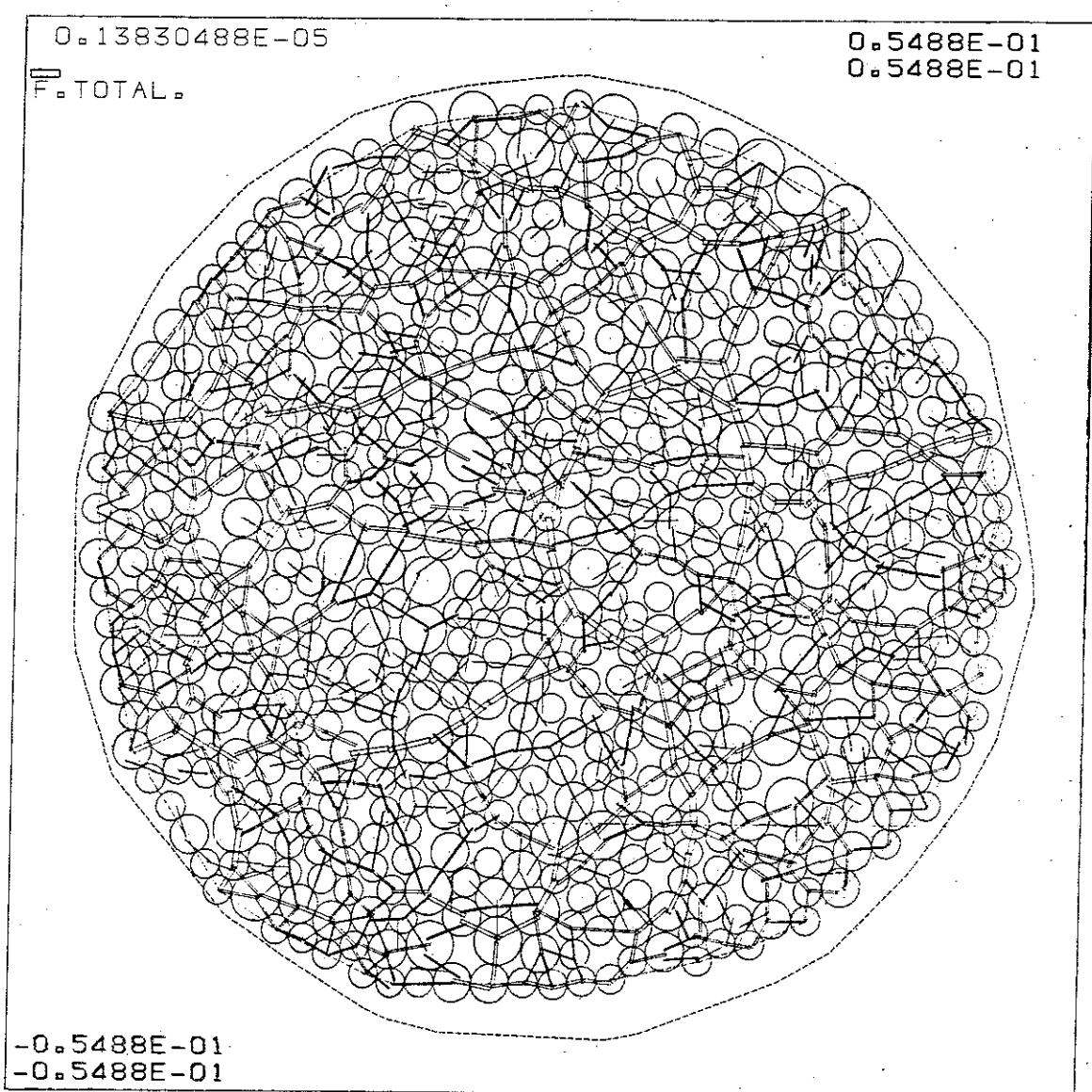


FIGURA 6.29 (Cont.) .- ii) Estado C. $\sigma_{150} = 1.02 \text{ Kp/cm}^2$, $s = 0$, $t_i = 10^{-2} s$. Adicionalmente se incluyen todas las fuerzas en los contactos entre esferas.

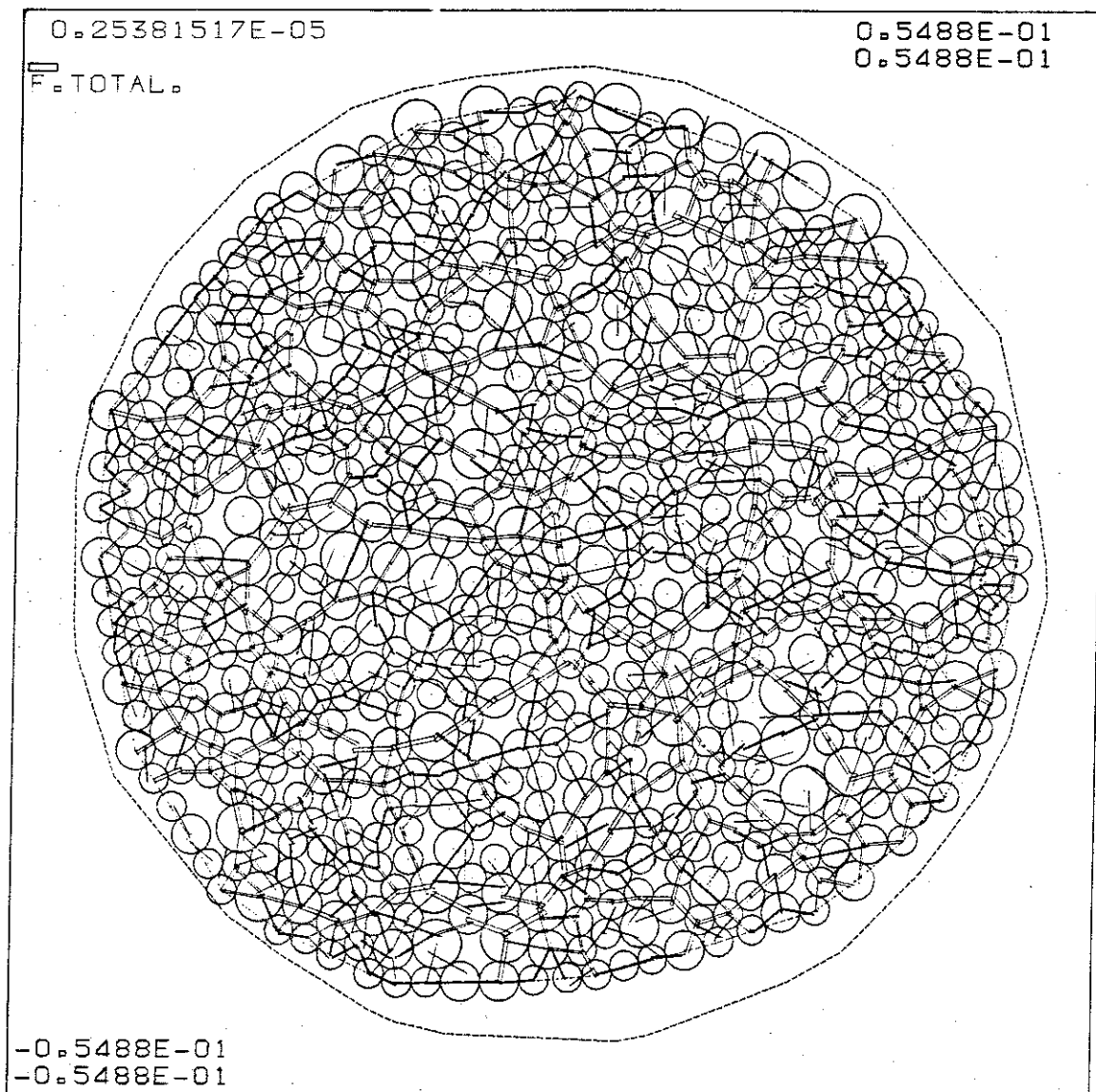


FIGURA 6.29 (Cont.) .- iii) Estado D. $\sigma_{ISO} = 1.04 \text{ Kp/cm}^2$, $s = 0$, $t_i = 1.6 \cdot 10^{-2} \text{ s}$. Adicionalmente se incluyen todas las fuerzas en los contactos entre esferas.

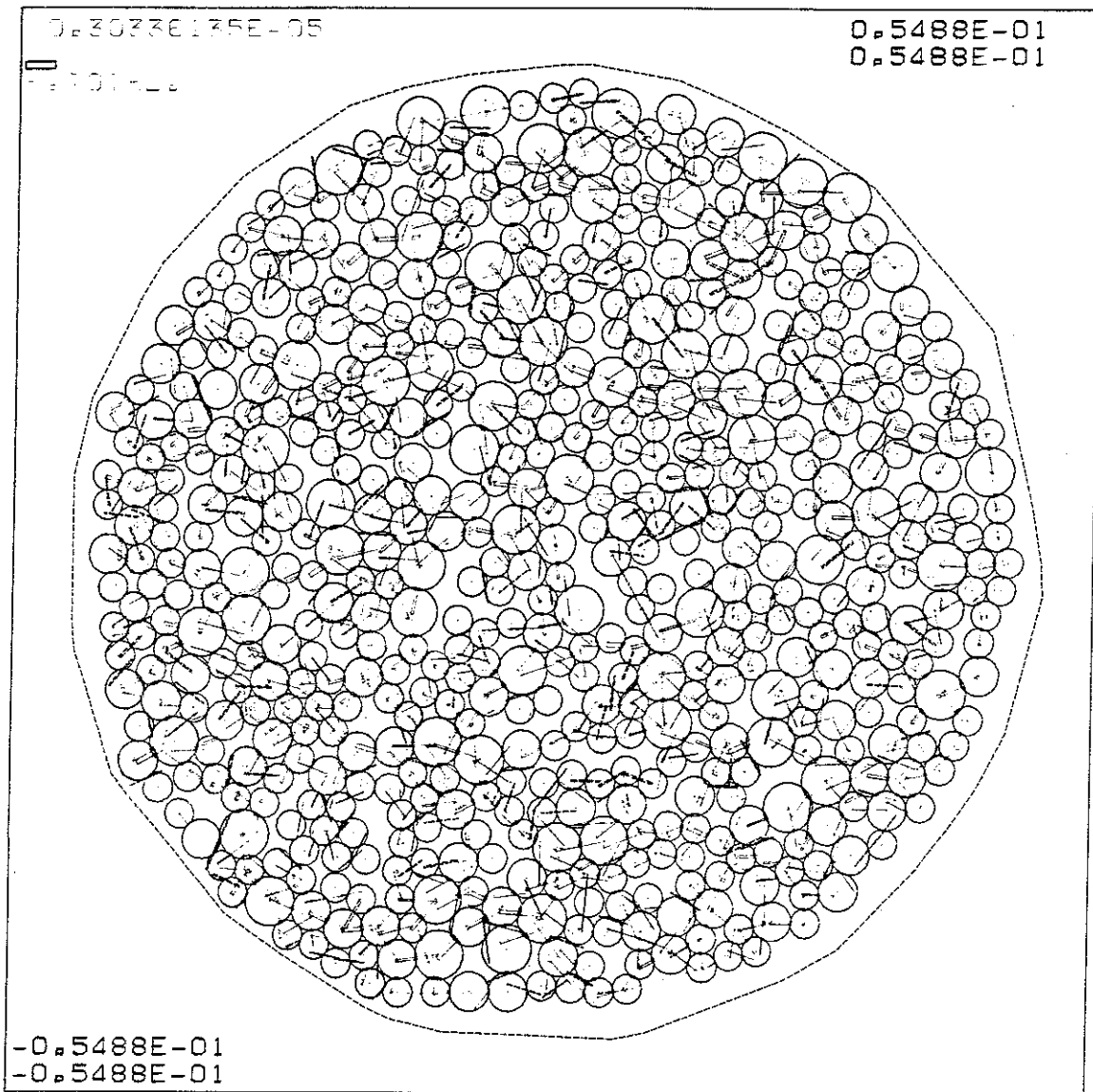


FIGURA 6.29 (Cont.) .- iv) Estado E. $\sigma_{ISO} = 1.04 \text{ Kp/cm}^2$, $s = 0.9 \text{ Kp/cm}^2$, $t_i = 2.4 \cdot 10^{-3} \text{ s}$. Adicionalmente se incluyen todas las fuerzas en los contactos entre esferas.

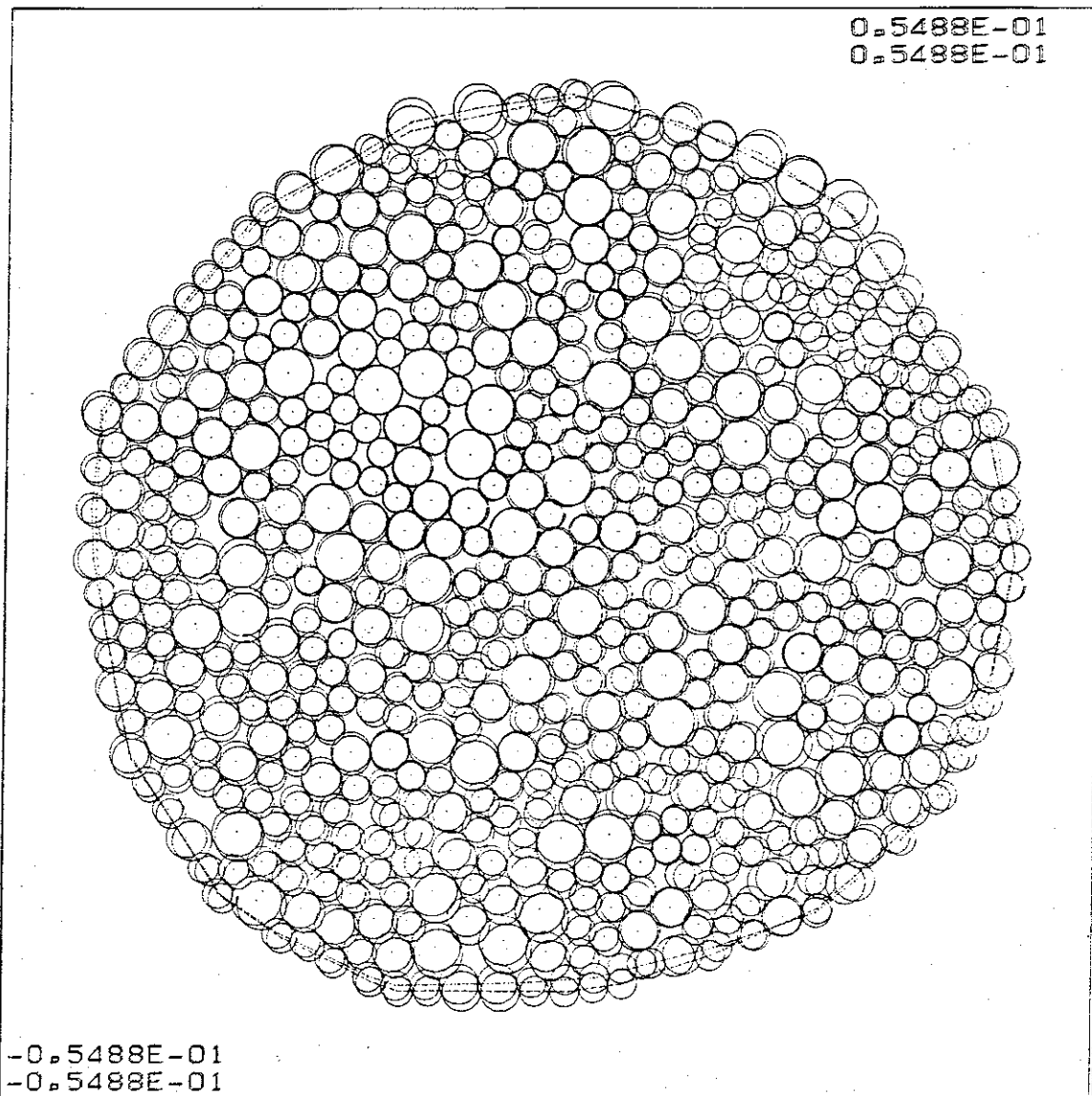


FIGURA 6.29 (Cont.) .- v) Dibujo diferencial entre el estado *D* y el *F* (final de trayectoria por dos caminos distintos).

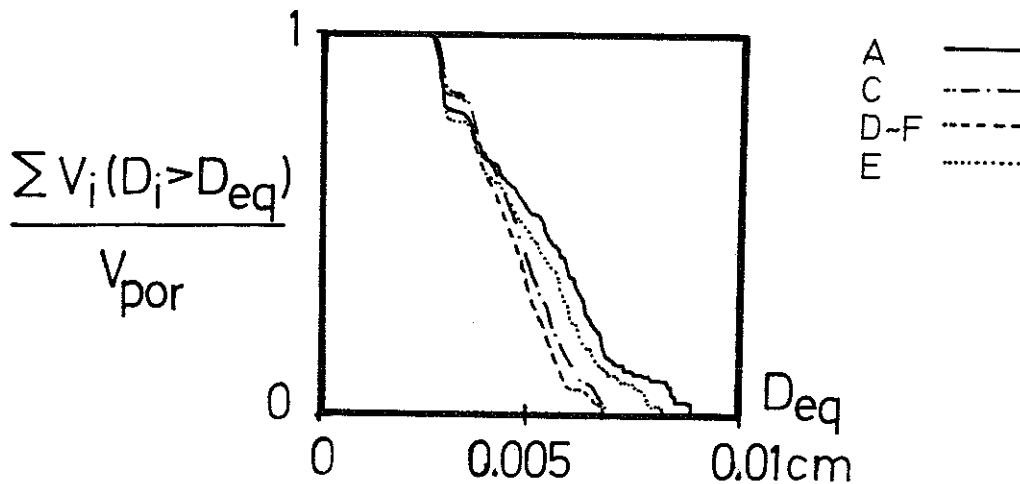


FIGURA 6.30 .- Porosimetrías del modelo en los distintos estados del ciclo cerrado carga-succión monotonico.

esferas, ver figura 6.26). Por este motivo en la inundación coexisten nuevamente dos mecanismos de deformación. Por un lado un cierto “hinchamiento” a nivel de las esferas. Si se supone que éstas están formadas por agregación de otras menores, tipo arcilla, podría asociarse este hinchamiento a la deformación del mismo agregado (plausiblemente saturado de agua incluso a $s = 0.9 \text{ Kp/cm}^2$) producida por la relajación de la deficiencia de presión de agua en su interior. Por otro lado se registra también un notable “colapso”, al reducirse la fuerza máxima tangencial resistible por los contactos. La combinación de ambos mecanismos da una evolución de deformaciones a lo largo del tiempo bastante peculiar (figura 6.31a, curva superior).

Como se ha comentado en el capítulo 5, el ajuste temporal del modelo numérico a la realidad en el caso de inundación (ICASO=2) no es satisfactorio por la instantaneidad de la inundación. Sin embargo, aunque con distinta disposición relativa temporal, los dos mecanismos que se acaban de señalar deben existir.

Para evaluar de manera indirecta y sólo aproximada cual es la magnitud de los dos mecanismos por separado se ejecutó el siguiente ensayo. A partir de la situación A se anuló prácticamente el coeficiente de rozamiento entre esferas ($\mu = 0.01$). Así,

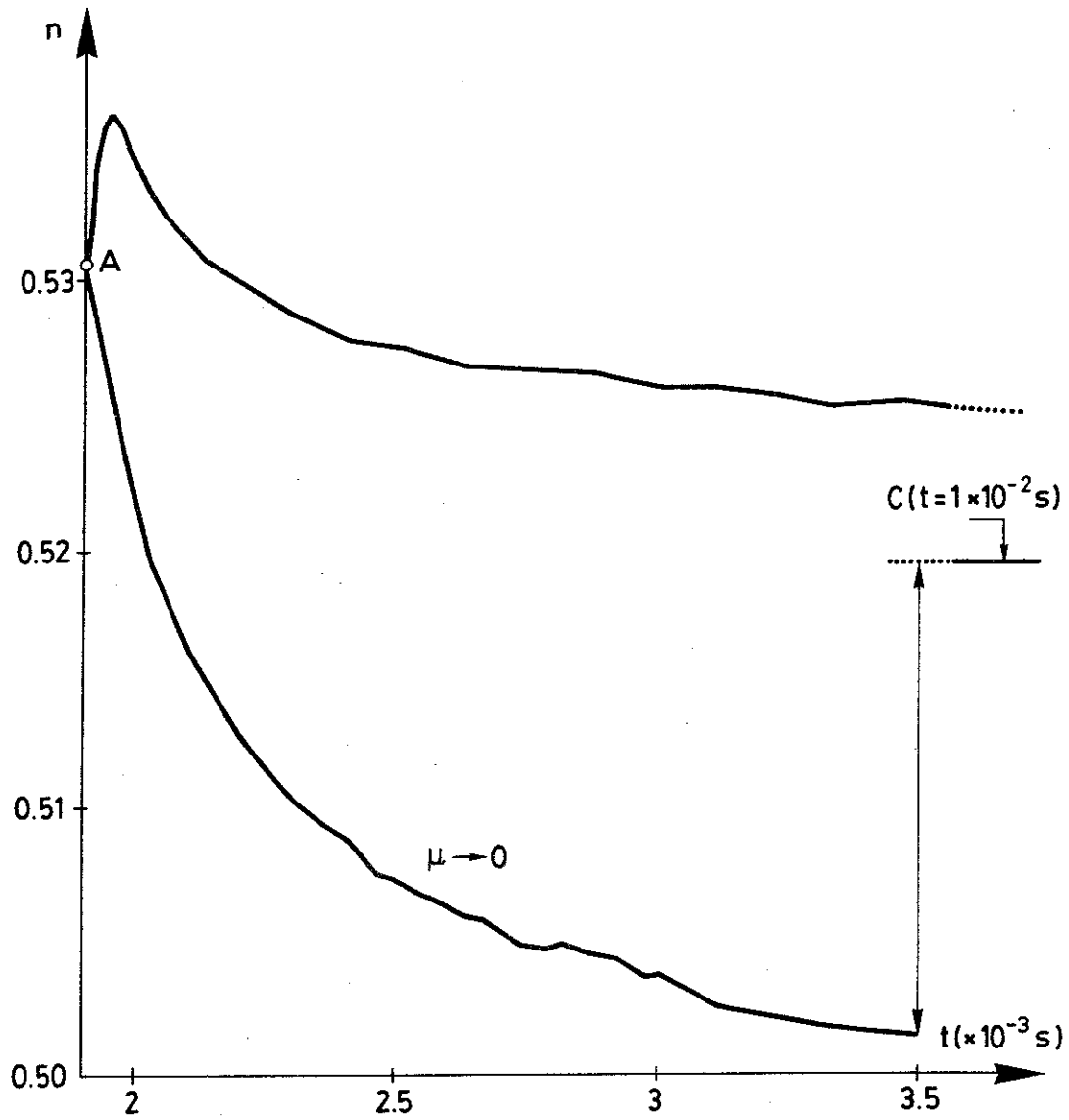


FIGURA 6.31 .- a) Ejemplo de evolución de la porosidad con el tiempo al inundar la muestra desde la situación A a la C. También se incluye un ejemplo de colapso por reducción del rozamiento, manteniendo la succión (curva inferior).

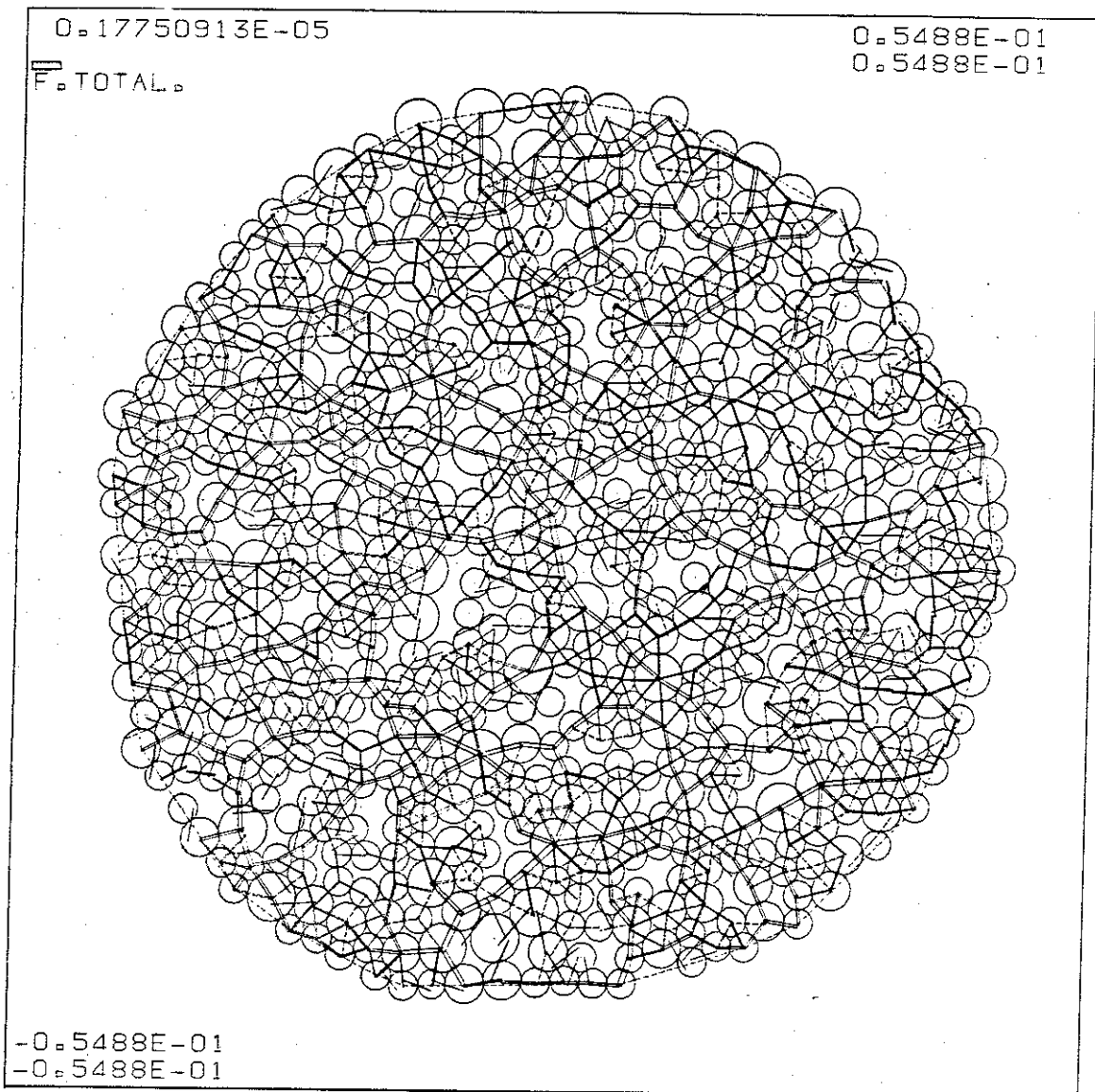


FIGURA 6.31 (Cont.) .- b) Estado obtenido a partir del A, por reducción del rozamiento, μ . $\sigma_{ISO} = 1.02 \text{ Kp/cm}^2$, $s = 0.9 \text{ Kp/cm}^2$, $t_i = 3.5 \cdot 10^{-3} \text{ s}$. Obsérvese que en este caso las fuerzas totales pasan obligadamente por los centros de las esferas.

en un claro ejemplo de ensayo numérico no abordable físicamente, se obtuvo una especie de colapso en paralelo al del paso al punto C, pero manteniendo en este caso la succión igual a 0.9 Kp/cm^2 . En la figura 6.31a aparece la evolución de la porosidad con el tiempo en este ensayo (y en la figura 6.31b la situación final). La diferencia de porosidades entre ambas ramas (que se señala en la figura) puede dar una idea de la importancia del mecanismo de hinchamiento en el colapso global de A a C.

Otras combinaciones de *compresibilidad a nivel de esfera y estructura abierta del esqueleto* distintas a las que disfrutaba la muestra ensayada, podrían conducir a diferentes importancias relativas de los efectos coexistentes (“hinchamiento de esferas” y “colapso estructural”). En determinadas combinaciones se podría simular un efecto neto de tipo “expansivo”.

Volviendo al ciclo cerrado, la deformabilidad conjunta de la muestra en las ramas de A a E ó de C a D (aumento de carga a succión constante, figura 6.27b), merece también algún comentario.

Es más deformable la muestra con succión que sin ella, comportamiento que puede sorprender a primera vista. Sin embargo la estructura del suelo en A o en C es completamente distinta, debiéndose considerar como dos suelos distintos. La muestra en A es más deformable porque el esqueleto es mucho más abierto (aún no ha colapsado).

Por otro lado el colapso es superior bajo carga somera ($\sigma - p_a = 0.02 \text{ Kp/cm}^2$) que bajo la carga doble (figura 6.27c). Este último resultado puede parecer sorprendente y contrario a lo que se lee en la literatura (Alonso et al., 1987, por ejemplo). Lo que ocurre en realidad es que no se suelen hacer ensayos con baja densidad inicial, sino que en general se trabaja con suelos compactados con densidades iniciales próximas a la del óptimo Proctor. Para dilucidar la cuestión se han llevado a cabo unos ensayos edométricos especiales sobre un granito descompuesto (“sauló”) de San Feliu de Guixols (plasticidad nula a moderada). Las muestras han sido preparadas con estructura abierta, por simple vertido dentro de los moldes, con una humedad inicial del 6% y bajo carga neta de 0.4 Kp/cm^2 y 1.6 Kp/cm^2 . Tras una estabilización de la deformación se han inundado las muestras, obteniéndose asientos

adicionales importantes (colapsos, figura 6.32). Como se aprecia claramente el colapso es mayor en las muestras cargadas en menor cuantía. Esto puede ser debido, tanto en el modelo como en los ensayos, a que cuando la carga es mayor parte de la reducción de huecos ha tenido lugar ya en el incremento de carga antes de inundar. Este resultado es coherente con lo observado en suelos reales.

Confirmando las tendencias apuntadas en 6.3.2.1, los estados con succión mantienen la estructura abierta del esqueleto. Por otro lado las cadenas de carga que se pueden observar en su interior, al ser ahora la compresibilidad mayor, no son tan concentradas, sino que parecen "tener un ancho" de más de una esfera, a lo que contribuyen puntualmente los nexos de unión creados por la fuerza capilar debida a los meniscos. Las "oblicuidades" en las fuerzas transmitidas también son asociables a la presencia de dichas fuerzas capilares.

La situación final de las dos trayectorias de tensión (ACD y AEF) no es coincidente (distintos n finales, figura 6.27). Sin embargo la diferencia es reducida y examinándola en el plano del modelo (figura 6.29 v) parece afectar a algunas zonas (especialmente cercanas al contorno) y muy poco a otras. Entrando en el detalle que brindan las porosimetrías (figura 6.30) las diferencias entre las curvas correspondientes al estado D y al F son prácticamente inapreciables. El "error de cierre" en el ciclo cerrado, a la vista de toda esta información, puede considerarse reducido.

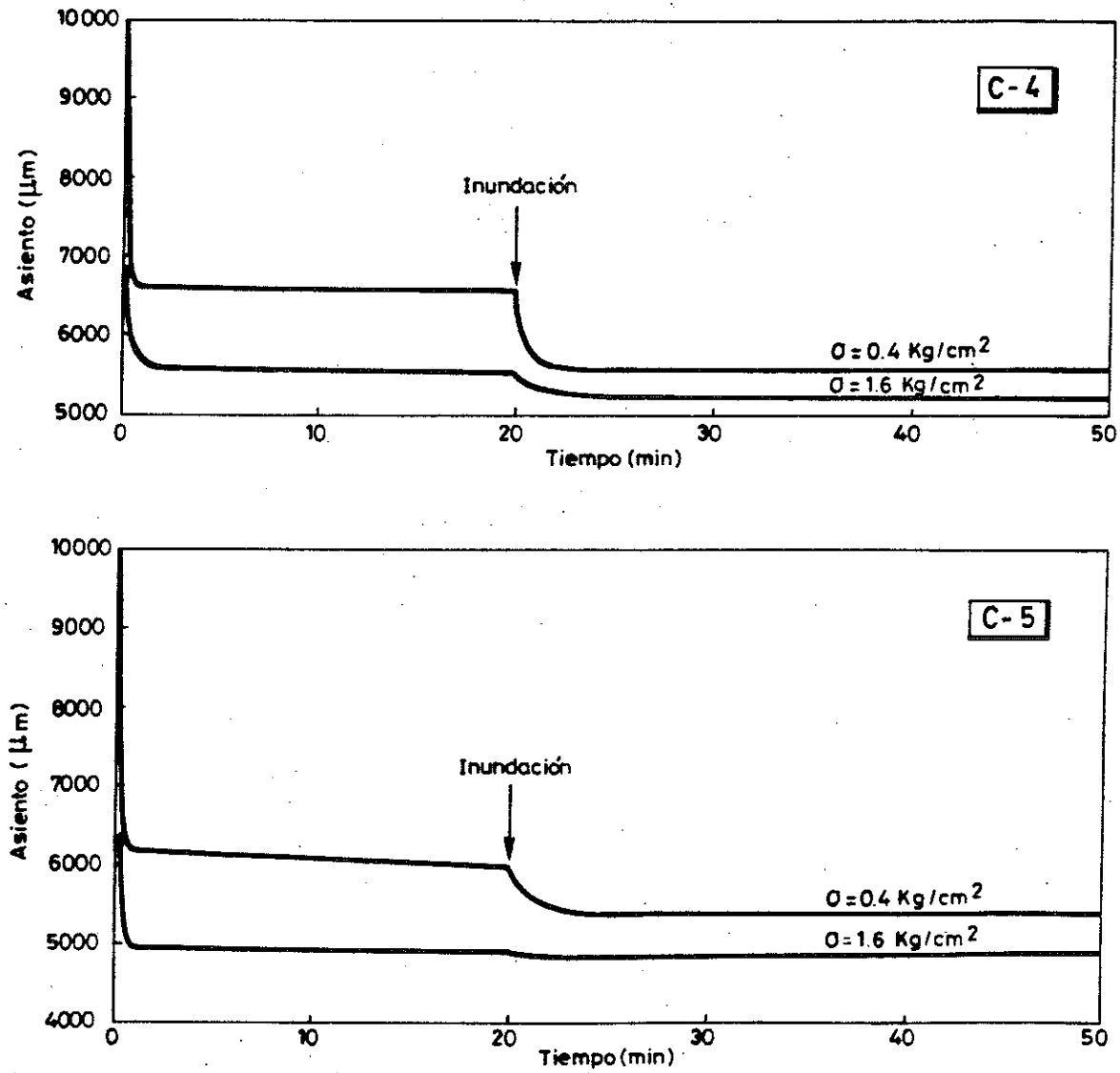


FIGURA 6.32 .- Resultados de los ensayos de carga edométrica y posterior inundación sobre las muestras C4 y C5 de sauló de San Felu de Guizols.

CICLO CERRADO CARGA-SUCCION NO MONOTONICO

En este ciclo (figura 6.33) el grado de saturación varía no monotónicamente. A partir del estado C, (a succión nula y carga = 0.02 Kp/cm^2) se llega por dos caminos distintos hasta la situación final ($\sigma - p_a = 0.04 \text{ Kp/cm}^2$ y succión 0.9 Kp/cm^2). Por el primer camino se carga primero la muestra (estado D) y luego se desatura (ICASO=3) y se deja deformar bajo succión de 0.9 Kp/cm^2 , hasta el estado G, mientras que por el segundo camino los cambios son al revés (estados H e I). En estas condiciones, los estudios basados en superficies de estado predicen una situación final distinta según la trayectoria tensional. El recinto del ciclo es pues muy parecido al anterior ciclo y la manera de llevar a cabo los incrementos de carga, los gráficos obtenidos etc. también son similares.

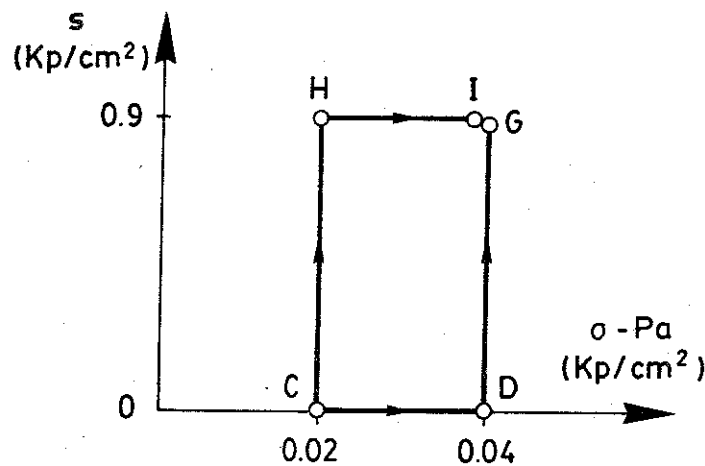


FIGURA 6.33 .- a) Ciclo cerrado carga-succión no monotónico. Plano $(\sigma - p_a) \times s$. El punto de partida es el C ($\sigma_{ISO} = 1.02 \text{ Kp/cm}^2$, $s = 0$) y el final el ($\sigma_{ISO} = 1.04 \text{ Kp/cm}^2$, $s = 0.9 \text{ Kp/cm}^2$). Las dos trayectorias seguidas son la CHI y la CDG.

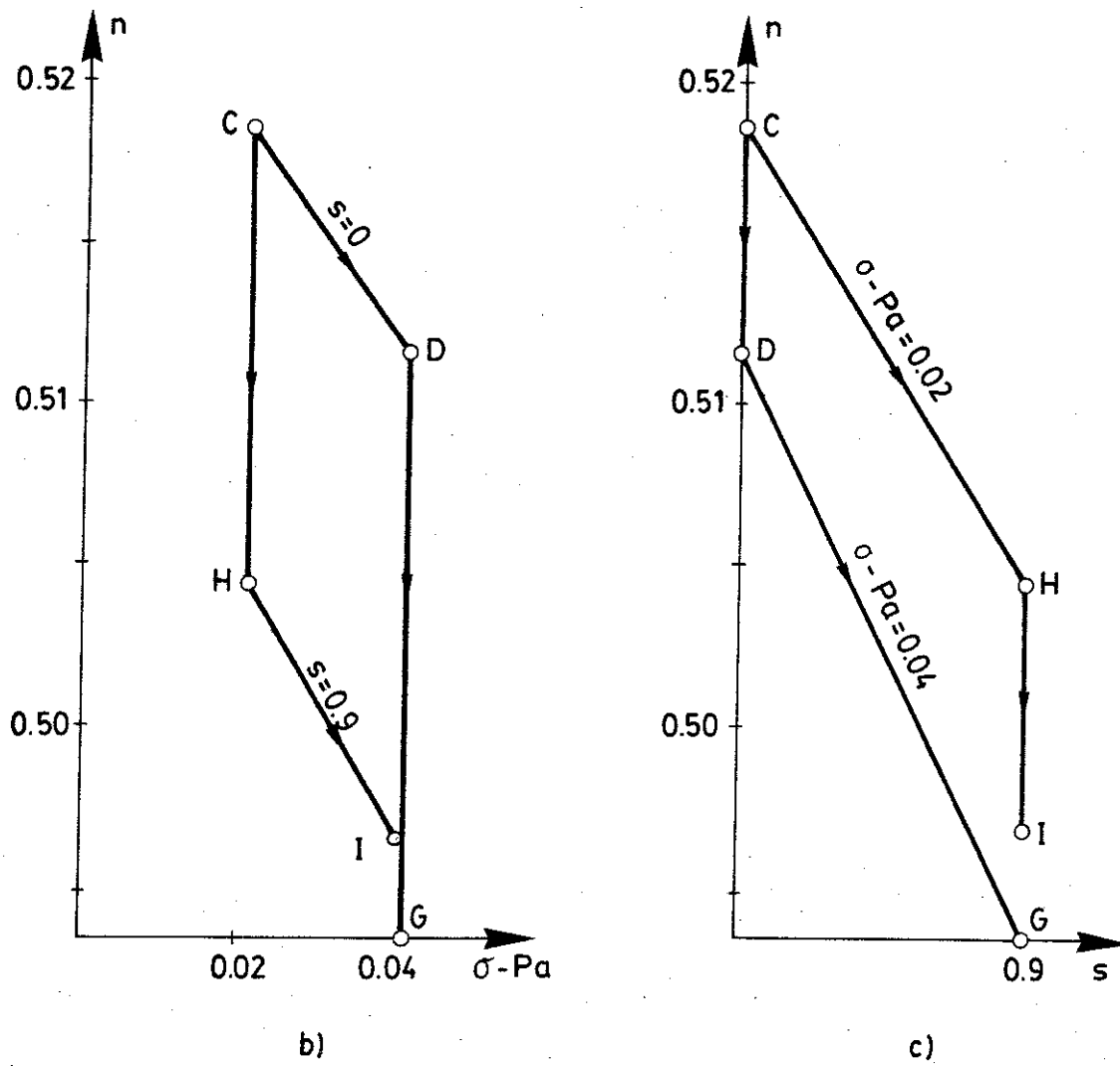


FIGURA 6.33 (Cont.) - (b y c) Valores de la porosidad obtenidos en las dos trayectorias (sólo corresponden a puntos de equilibrio los extremos C,D,G,H,I, de los segmentos).

El estado C es uno correspondiente a una situación tras colapso por inundación. En el proceso de inundación ya se ha visto que coexisten dos mecanismos principales: hinchamiento a nivel de las esferas y colapso estructural. En el proceso inverso de "desaturación" se registrará una "contracción" a nivel de las esferas ("sensu stricto" a nivel de los contactos entre ellas, al restituirse en esa posición un menisco y su F_w , ver figura 6.26); el colapso estructural es sin embargo irreversible (deformación irrecuperable) y no se registrará pues un efecto inverso. Así, el efecto global al "desaturar" es una "contracción" de la muestra como puede constatare en las ramas CH y DG del ciclo (figura 6.33c), en un cierto paralelismo a la retracción que sufren algunos suelos finos (algo plásticos) al superar el llamado "punto de retracción".

La deformabilidad de la muestra bajo carga con succión (H-I) y sin succión (C-D, figura 6.33b) es bastante similar porque en este caso ya se ha sufrido el colapso estructural en ambas ramas.

La situación final de las dos trayectorias de tensión (CDG y CHI) no es coincidente (figura 6.34; distintos n finales, figura 6.33). Nuevamente las diferencias se concentran en el contorno (figura 6.34), aunque las porosimetrías son algo distintas en este caso (figura 6.35).

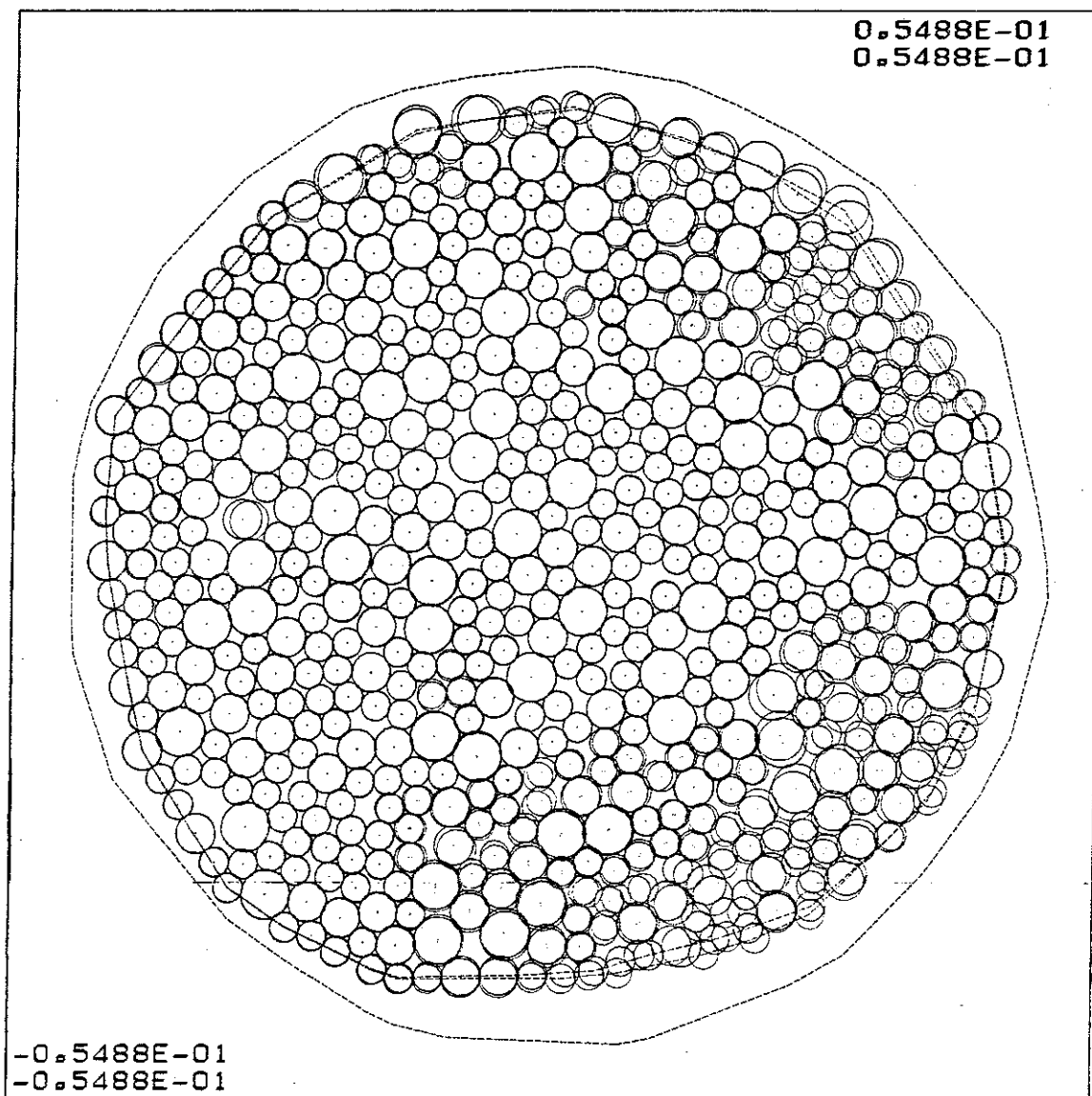


FIGURA 6.34 .- *Ciclo cerrado carga-succión no monotónico. Dibujo diferencial entre el estado G y el I (final de trayectoria por dos caminos distintos).*

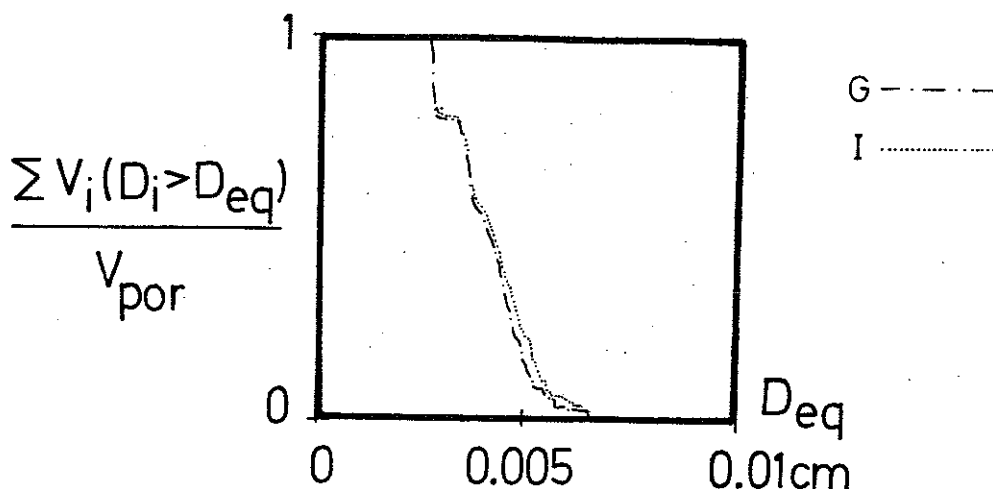


FIGURA 6.35 .- Porosimetrías del modelo en los estados G e I (final de trayectoria por dos caminos distintos).

CICLOS DE HUMEDECIMIENTO Y SECADO

En la figura 6.36 se ilustra que esta línea de ensayo consiste en una serie de ciclos inundación-desaturación bajo tensión de contorno constante igual a 1.02 Kp/cm^2 . Los estados, sucesivamente a succión de 0.9 Kp/cm^2 y nula, son los A,C,H,J,K,L,M y N.

En la misma figura (b) se acota la evolución de la porosidad como valor resumen de los sucesivos ciclos. Queda claramente reflejado lo comentado sobre la presencia de los mecanismos de deformación de “hinchamiento” a nivel de las esferas y de “colapso estructural”. Este último tiene lugar predominantemente en el primer humedecimiento, al inicio del cual (estado A) la estructura del esqueleto era “abierta” (por generación misma del conjunto de las 592 partículas). En sucesivos ciclos predomina pues el efecto de “hinchamiento” (al inundar) y “contracción” (al desaturar), aunque se experimenta al final de los mismos un cierto “colapso

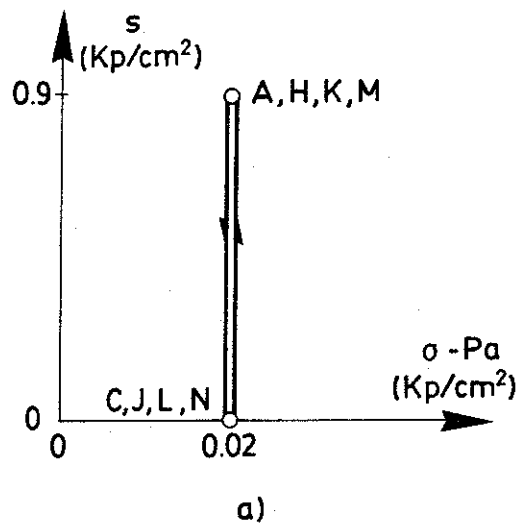


FIGURA 6.36 .- a) Ciclos de humedecimiento y secado. Plano $(\sigma - p_a) \times s$. Sentido: A, C, H, J, K, L, M, N.

adicional”, de magnitud decreciente, que se compara en la figura 6.36 c.

Es evidente, por lo visto en anteriores ciclos, que el comportamiento mecánico del modelo en el estado A será muy distinto del comportamiento en el estado H, por ejemplo, a pesar de estar en un mismo punto del espacio tensional $(\sigma - p_a) \times s$. Se ilustra así una vez más la importancia de la estructura y la de los primeros ciclos de humedecimiento. La histéresis de humedad puede ser aún mayor si se considera la deformabilidad de la matriz sólida.

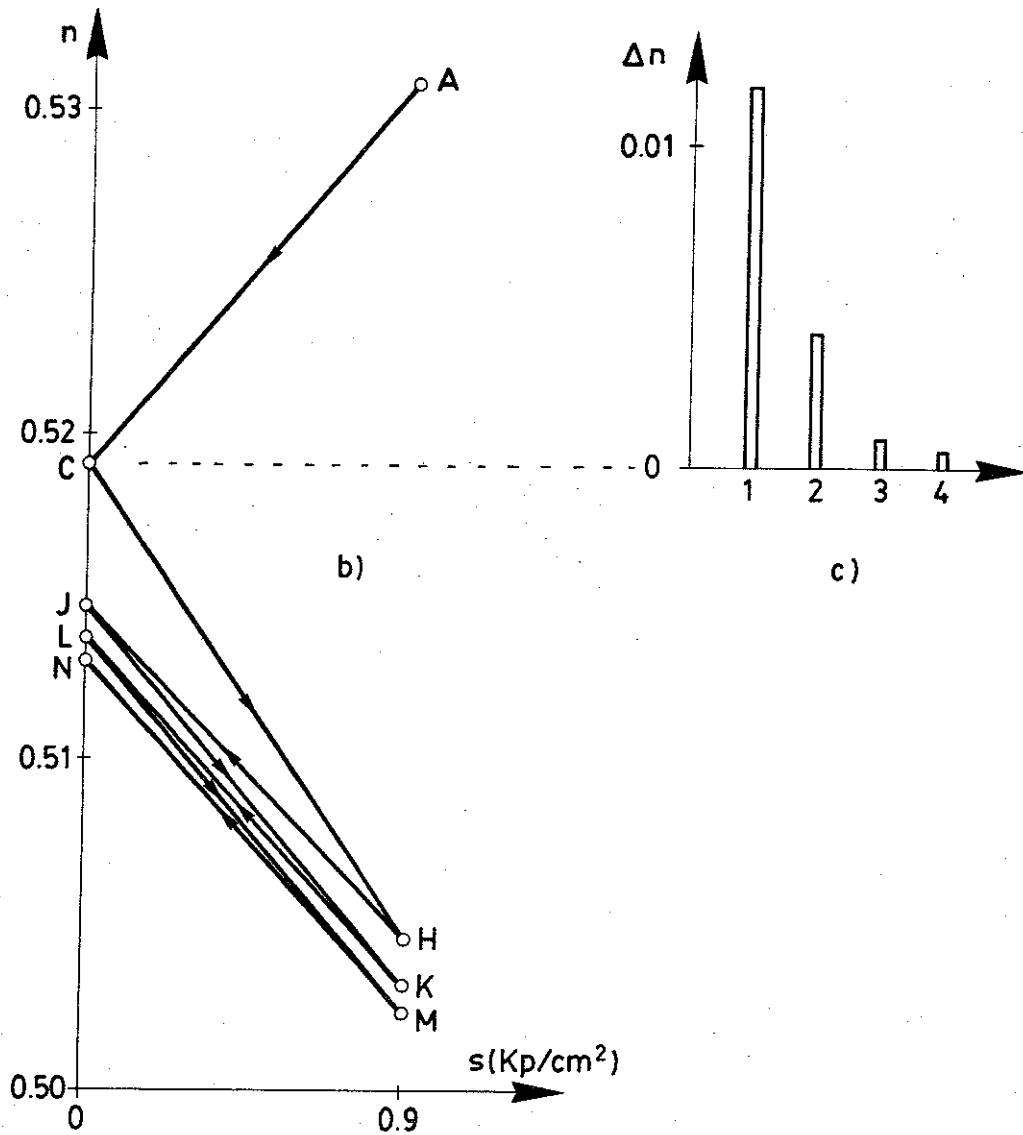


FIGURA 6.36 (Cont.) - (b y c):

b) Valores de la porosidad. Sólo corresponden a puntos de equilibrio los extremos de los segmentos.

c) Sucesivos colapsos adicionales al término del humedecimiento "iésimo".

COLAPSOS CON DESVIADOR

En este grupo de ensayos primeramente se fue aplicando un desviador creciente a la muestra (expresado en términos de ϕ movilizado: 10° , 20° y 30°), a partir de la situación A de la figura 6.27 ($\sigma_{ISO} = 1.02 \text{ Kp/cm}^2$, succión = 0.9 Kp/cm^2) manteniendo la tensión media neta en $\bar{\sigma} - p_a = 0.02 \text{ Kp/cm}^2$, ver figura 6.37). En lo que sigue, se debería denominar a los ensayos numéricos líneas más que estados puesto que, como se verá, algunos de ellos no acaban en ninguna situación de equilibrio.

Durante la carga desviadora manteniendo la succión (LA, LB, LC), la porosidad ha disminuído un poco (ver figura 6.38); durante la inundación y colapso subsecuente (LAC, LBC, LCC), todas las porosidades han tendido a un valor muy similar al del colapso sin desviador (rama A-C en la figura 6.27).

Es lógico que así sea, porque al colapsar se "cierra" la estructura abierta preexistente, tendiendo a una porosidad "colapsada", en primera instancia independiente del desviador. El comportamiento subsiguiente es muy distinto en unos casos y en otros (en LAC, LBC y LCC). En unos casos se alcanza un cierto equilibrio y en otros no. La porosidad no ayuda pues a describir el comportamiento de la muestra porque al mantenerse la tensión media, n puede no variar mucho pero sin embargo la muestra puede estar reduciendo o aumentando sus dimensiones. Como es tradicional, es mucho más conveniente seguir la evolución de las dimensiones máximas en el plano del modelo (horizontal l_{11} , y vertical l_{22}), y así se ha hecho en la figura 6.39 para las líneas de este grupo de ensayos.

Los tres escalones de carga desviadora bajo succión (10° , 20° , 30°), desembocan en un estado equilibrado tras un cierto tiempo y una cierta deformación de corte. En el estado LC, l_{11} ha aumentado el 1.1% y l_{22} ha disminuído el 1.9%, valores muy razonables. La resistencia a corte de la muestra con succión de 0.9 Kp/cm^2 parece pues superior a 30° , debido sin duda alguna al efecto favorable del agua de los meniscos. En la figura 6.40 se puede ver que la presencia de rectángulos de línea

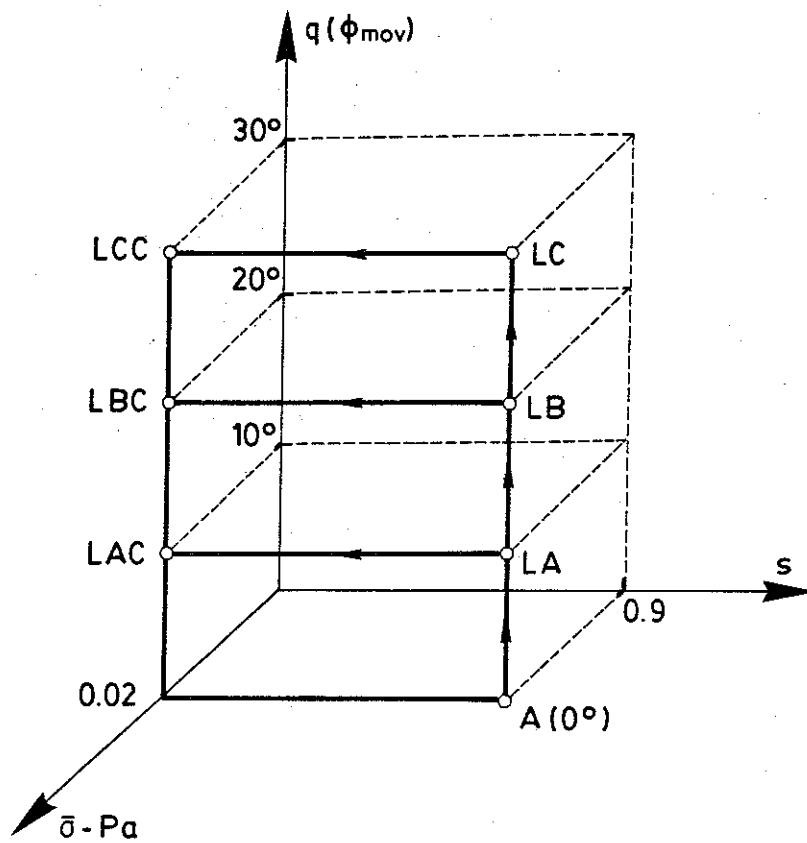


FIGURA 6.37 .- Grupo de ensayos de colapso bajo desviador, que en la figura se expresa como ángulo movilizado ($\phi_{mov} = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$; ecuación 6.2). La tensión esférica se ha mantenido constante (1.02 Kp/cm^2).
 LA, LB, LC: Carga desviadora bajo succión (0.9 Kp/cm^2).
 LAC, LBC, LCC: Inundación a partir de los anteriores.

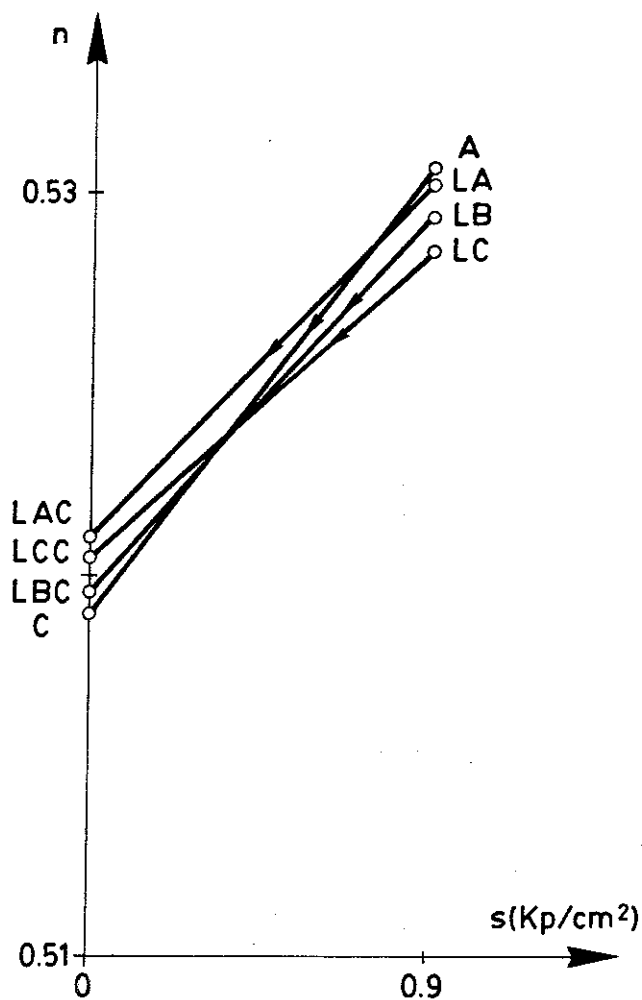


FIGURA 6.38 .- Cambios de porosidad ($\bar{\sigma} - p_a = 0.02 Kp/cm^2$).

- A: $\phi_{mov} = 0^\circ$, $t_i = 1.9 \cdot 10^{-3} s$, equilibrado
- LA: $\phi_{mov} = 10^\circ$, $t_i = 2.5 \cdot 10^{-3} s$, equilibrado
- LB: $\phi_{mov} = 20^\circ$, $t_i = 3.5 \cdot 10^{-3} s$, equilibrado
- LC: $\phi_{mov} = 30^\circ$, $t_i = 4.1 \cdot 10^{-3} s$, equilibrado
- C: $\phi_{mov} = 0^\circ$, $t_i = 1 \cdot 10^{-2} s$, equilibrado
- LAC: $\phi_{mov} = 10^\circ$, $t_i = 5 \cdot 10^{-3} s$, no equilibrado
- LBC: $\phi_{mov} = 20^\circ$, $t_i = 6 \cdot 10^{-3} s$, no equilibrado
- LCC: $\phi_{mov} = 30^\circ$, $t_i = 6.3 \cdot 10^{-3} s$, no equilibrado

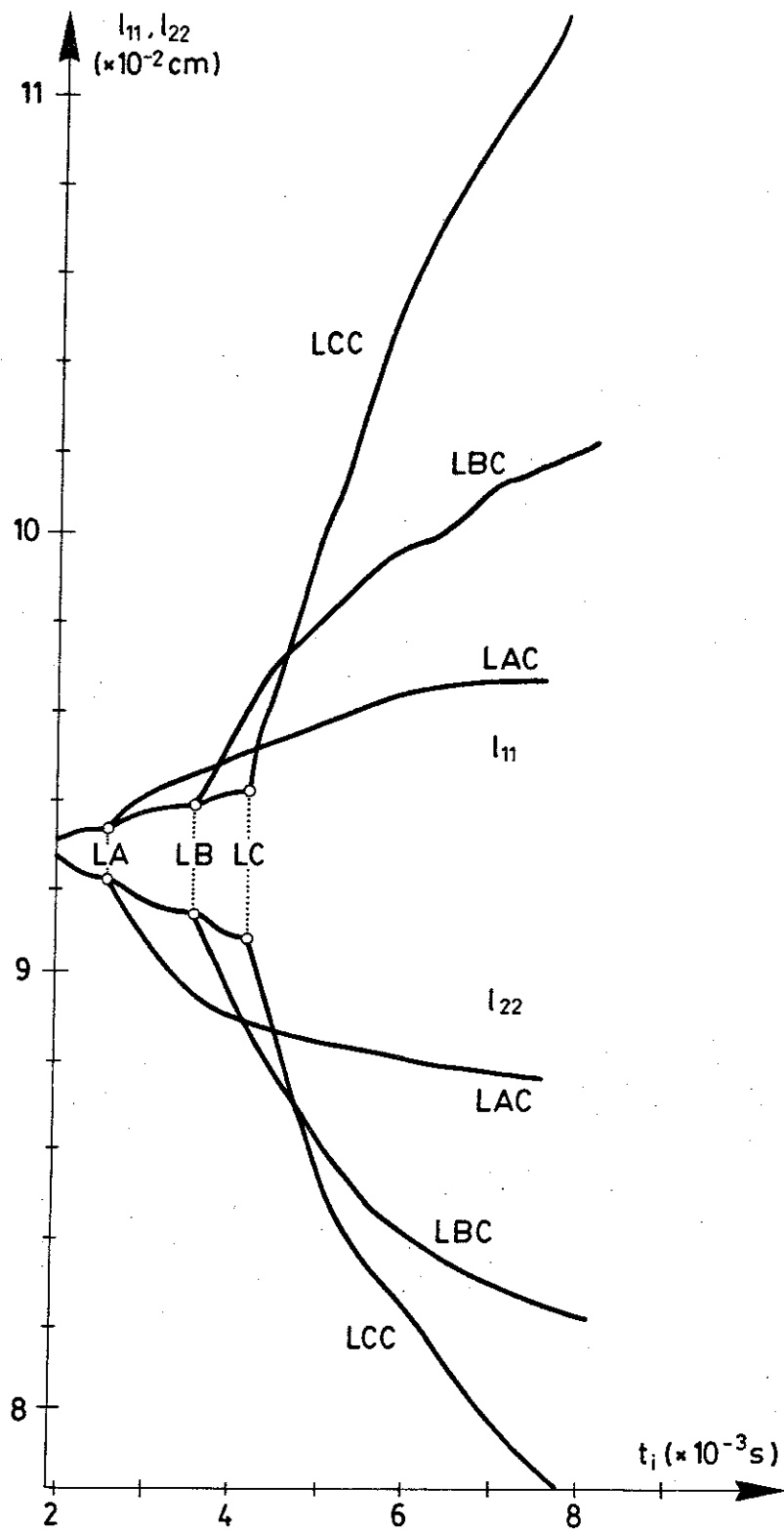


FIGURA 6.39 .- Seguimiento de los ensayos de colapso bajo desviador a lo largo del tiempo.

discontinua (asociables, aunque no directamente, a la acción del agua) es notable. Para mayor claridad en la mitad izquierda sólo están estas fuerzas. A simple vista parece adivinarse una cierta preferencia en la orientación de estas fuerzas hacia la horizontal. En la subfigura b se ha cuantificado aproximadamente este hecho, que parece confirmado. Aunque faltarían más comprobaciones, podría pensarse que el agua en algunos meniscos (preferentemente según la dirección principal menor, que es la que dilata) aguanta a las partículas que tienden a separarse. Los meniscos se opondrían así a la rotura de manera directa, además de aumentando la fuerza tangencial máxima resistible en los contactos con solape. En este sentido se constata que en los estados LA, LB y LC el número de contactos ha ido aumentando ligeramente: Se han creado de nuevos para resistir la tensión principal mayor, mientras que otros son mantenidos gracias a la acción "atractiva" de los meniscos. Otros detalles de este tipo se verán en 6.3.2.3.

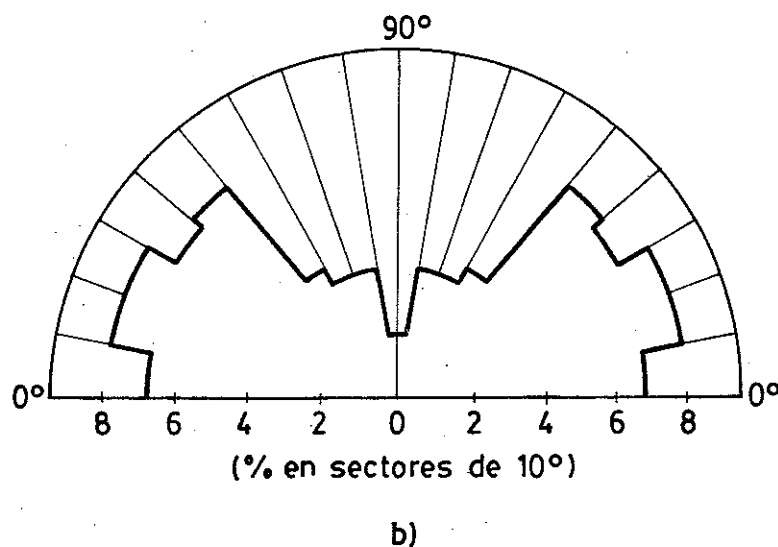


FIGURA 6.40 (Cont.) - b) Inclinación de los anteriores segmentos respecto a la horizontal.

Al inundar desde los tres estados anteriores, se produce un gran aumento de la deformación hacia rotura. Aunque en la figura 6.39 no se ha incluido (por claridad), en los instantes iniciales hay un cierto "hinchamiento". La línea LAC (10°) tras una

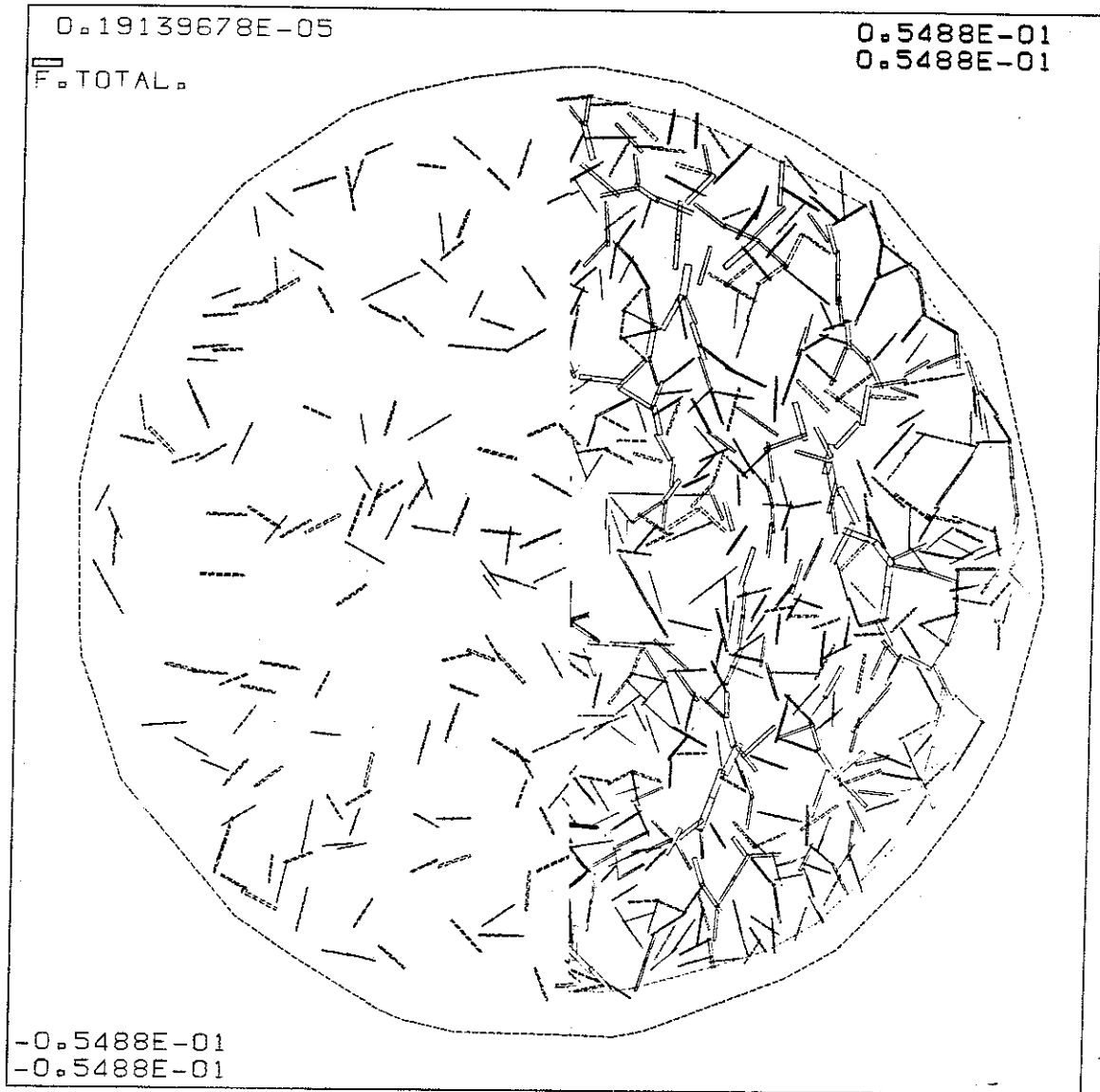


FIGURA 6.40 .- a) Fuerzas totales en los contactos. Fuerza máxima en Kp. Estado LC. $\phi_{mov} = 30^\circ$, $t_i = 4.1 \cdot 10^{-3} s$, $s = 0.9 \text{ Kp/cm}^2$. En la parte izquierda sólo están representadas aquellas cuya fuerza normal total es negativa.

gran deformación (4% y 5.3%) parece estabilizarse; no así en cambio la LBC (20°) o la LCC (30°). Se comprueba así que el módulo de deformación frente a sollicitaciones de corte es menor con succión que sin ella (Richards, 1978; Brull, 1980).

Estas líneas llegan a grandes deformaciones (del orden del 20%) sin estabilizarse. En términos de laboratorio y a efectos prácticos la muestra ha roto. A título de ejemplo de los estados de alta deformación a los que se puede llegar, en la figura 6.41 se incluye un estado de fuerzas y velocidades instantáneas dentro de la línea LCC.

A lo largo de estas líneas "sin meniscos" se registra una disminución del número total de contactos, coincidiendo con lo señalado por Cundall et al. (1982) y Cundall y Strack (1983).

El ángulo de resistencia para la muestra saturada estará pues entre 10° y 20°. Este valor, relativamente bajo, está relacionado con las condiciones de tensión controlada en el contorno que usa el modelo, como señalan y discuten los autores anteriormente citados. Sin embargo es creencia del autor de esta tesis que en los suelos granulares reales la forma no esférica de las partículas puede influir de manera más decisiva en este aspecto resistente. Para contrastarlo, en el modelo se ha arbitrado el uso de formas compuestas, que es el objeto que se trata en el epígrafe que sigue.

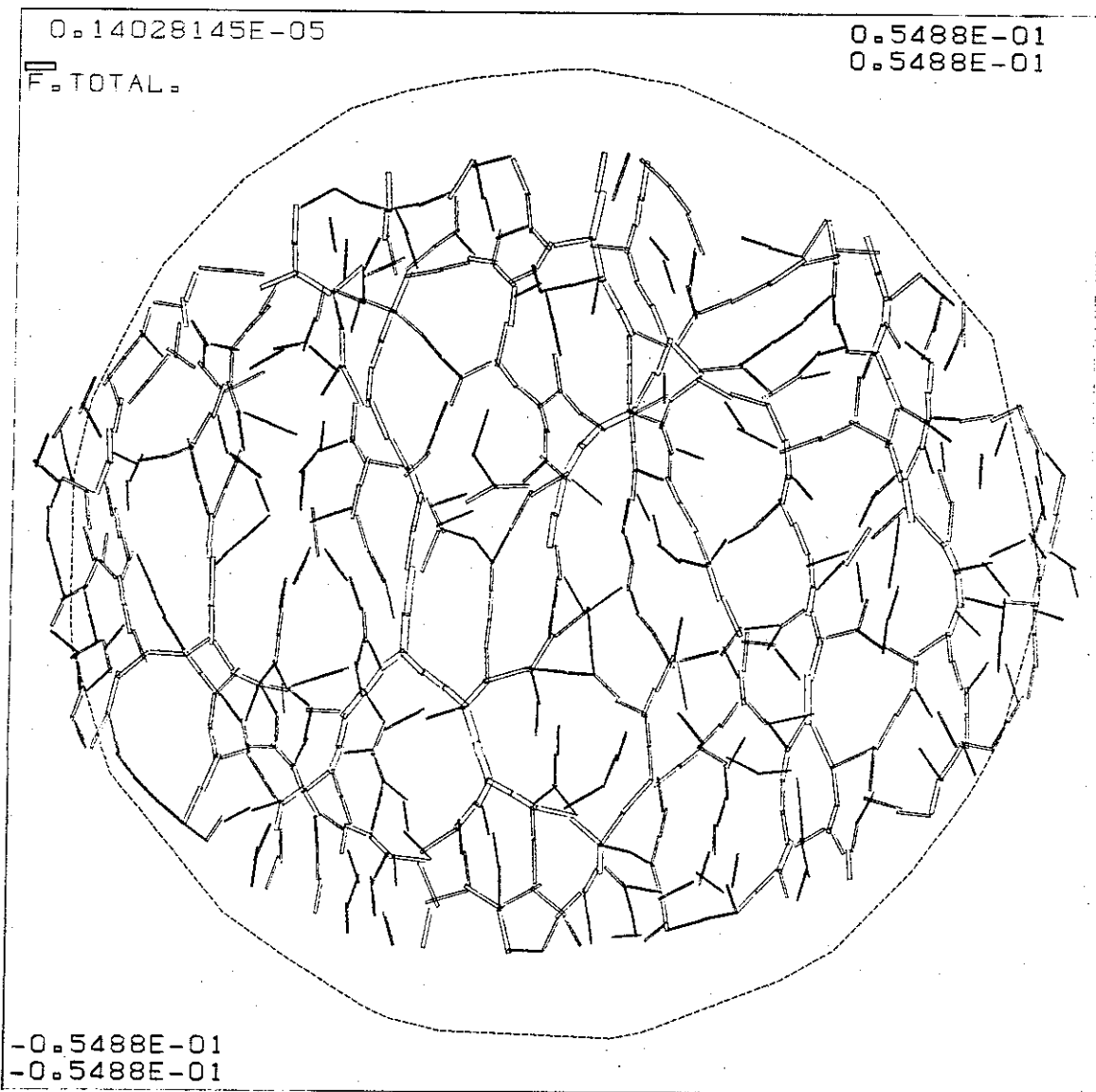


FIGURA 6.41 .- a) Fuerzas totales. Línea LCC, $t_i = 6.36 \cdot 10^{-3} s$. Se han representado las superiores al 15% de la máxima (en la parte superior izquierda, en Kp).

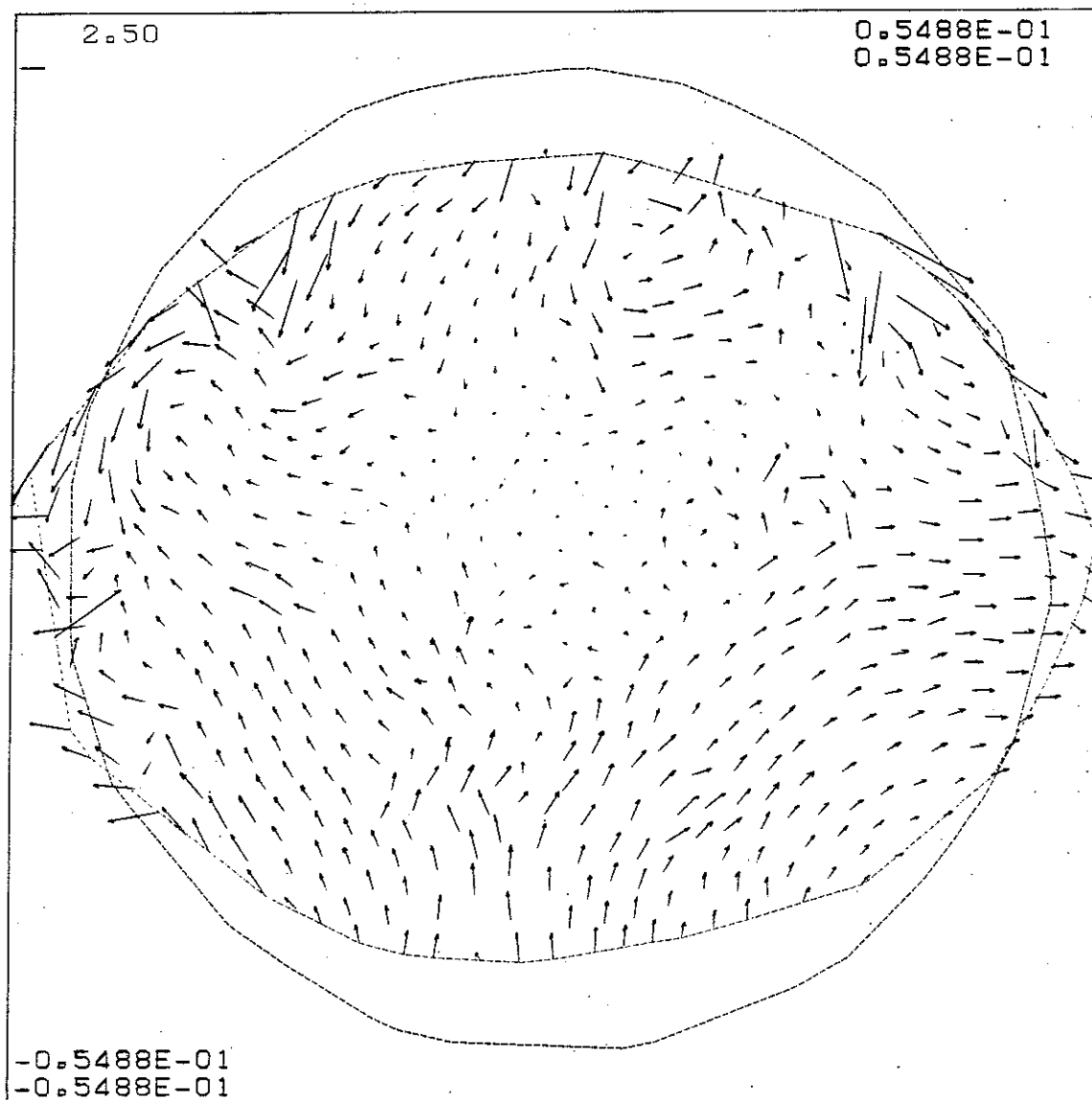


FIGURA 6.41 (Cont.) - b) Velocidades instantáneas de las esferas, correspondiente al mismo estado (cm/s).

PARTICULAS COMPUESTAS POLIESFERICAS

Como interesante posibilidad de estudio de la influencia de formas de partículas no esféricas se ha puesto a punto una modificación operativa del modelo numérico hasta aquí utilizado.

Es reconocida la influencia de la forma de las partículas en las propiedades del conjunto. Como ya se ha discutido, la anisotropía natural y la inducida por la propia carga acentuarán su papel. En modelos analógicos se han usado formas no esféricas, especialmente cilindros foto-elásticos de sección oval (por ejemplo Konishi et al., 1983). En modelos numéricos en el capítulo 2 se ha visto el modelo de partículas poliedrales de Walton (1982). Su extensión a contactos en tres dimensiones incorporando meniscos es prácticamente imposible.

El interés sin embargo subsiste dado que incluso pequeñas desviaciones en relación a la forma esférica del grano (ondulaciones, concavidades locales, etc.) pueden favorecer el equilibrio de un contacto frente a deslizamiento tangencial del mismo, y por ende el equilibrio global.

En efecto, supóngase que un determinado contacto está en deslizamiento inminente (figura 6.42). Considérese: que la partícula inferior está inmóvil; que la resultante de fuerzas sobre la superior (suma de interacciones a través del contacto en cuestión, F , y de otros no representados) es constante en primera instancia; que es esférica; y que tiene el giro coaccionado.

La condición límite de deslizamiento equivale a suponer que el vector F a través de dicho contacto está en el "cono de fricción" (cono cuyo eje coincide con la normal al contacto, y cuyo semiángulo es igual al de rozamiento, ϕ_μ). Si la zona de contacto de la partícula inferior es localmente convexa (subfigura a), al iniciarse el deslizamiento el cono de fricción rotará al cambiar el punto de contacto. La fuerza F quedaría paulatinamente fuera del cono de fricción; con lo que el deslizamiento progresará sin

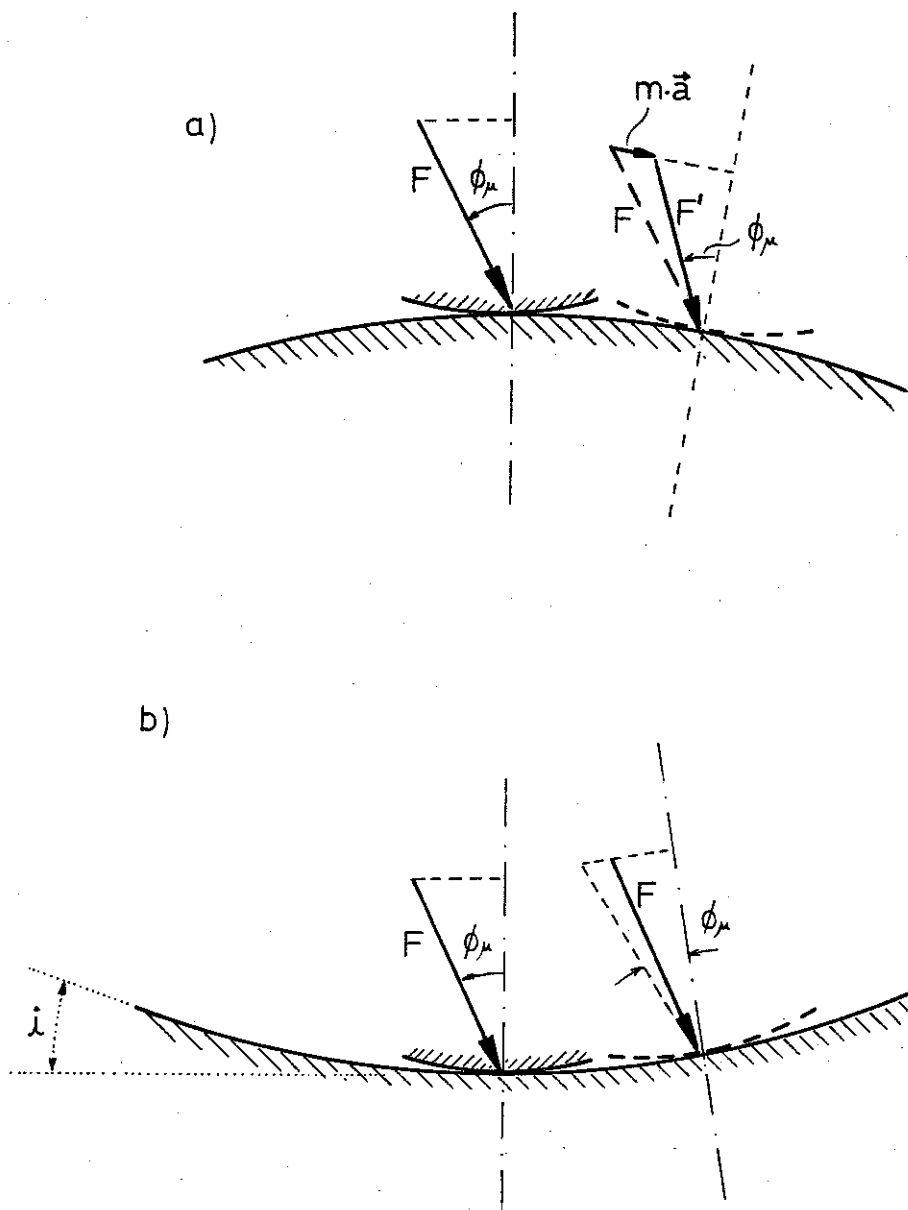


FIGURA 6.42.- Contacto de una partícula con otra localmente conveza (a), o cóncava (b).

equilibrio posible, en primera instancia. Si la zona de contacto es localmente plana, el cono de fricción se “trasladará” paralelo a sí mismo, y el deslizamiento seguirá siendo inminente. En cambio si la zona de contacto es localmente cóncava (subfigura b), al más mínimo deslizamiento la fuerza F caerá dentro del cono de fricción, y el deslizamiento cesará, a igualdad del resto de condiciones. El encajonamiento que producirán estas formas no convexas será sin duda favorable al equilibrio. Las concavidades que puedan tener los granos no esféricos (de valor “medio” i en la figura) pueden tener un efecto similar al importante papel que juega la ondulación en las juntas de roca solicitadas a corte: el ángulo aparente de rozamiento puede verse incrementado en un valor igual a i .

Una manera sencilla de considerar formas diversas sin perder las ventajas de un tratamiento esférico (contacto hertziano entre esferas, menisco aislado entre esferas, etc.), es la siguiente: aprovechando el principio de trabajo del modelo se “congelan” determinados meniscos-contacto, de manera que las partículas que lo soportan no puedan separarse.

Agregando partículas por este procedimiento pueden conseguirse una infinidad de formas compuestas, que se han denominado “poliesféricas”.

En las figuras 6.43a y 6.44a se incluyen dos ejemplos de subconjuntos de “poliesferas” dentro de las 592 partículas. Se han generado sencillamente escogiendo como meniscos de unión los múltiplos de 5 ó de 20 (P5 ó P20 respectivamente).

Su inclusión en un conjunto “normal” de esferas tendrá efectos en su colapso, en sus características deformacionales y en las características resistentes.

A título de ejemplo se ha llevado a cabo esta operación en la línea de ensayo LCC recientemente comentada (colapso con desviador).

Es interesante seguir el cambio de posición y orientación de las partículas en función de su situación dentro del modelo y de la etapa de deformación. Esto se puede ver en la figura 6.43 para el conjunto P20 y en la figura 6.44 para el conjunto P5.

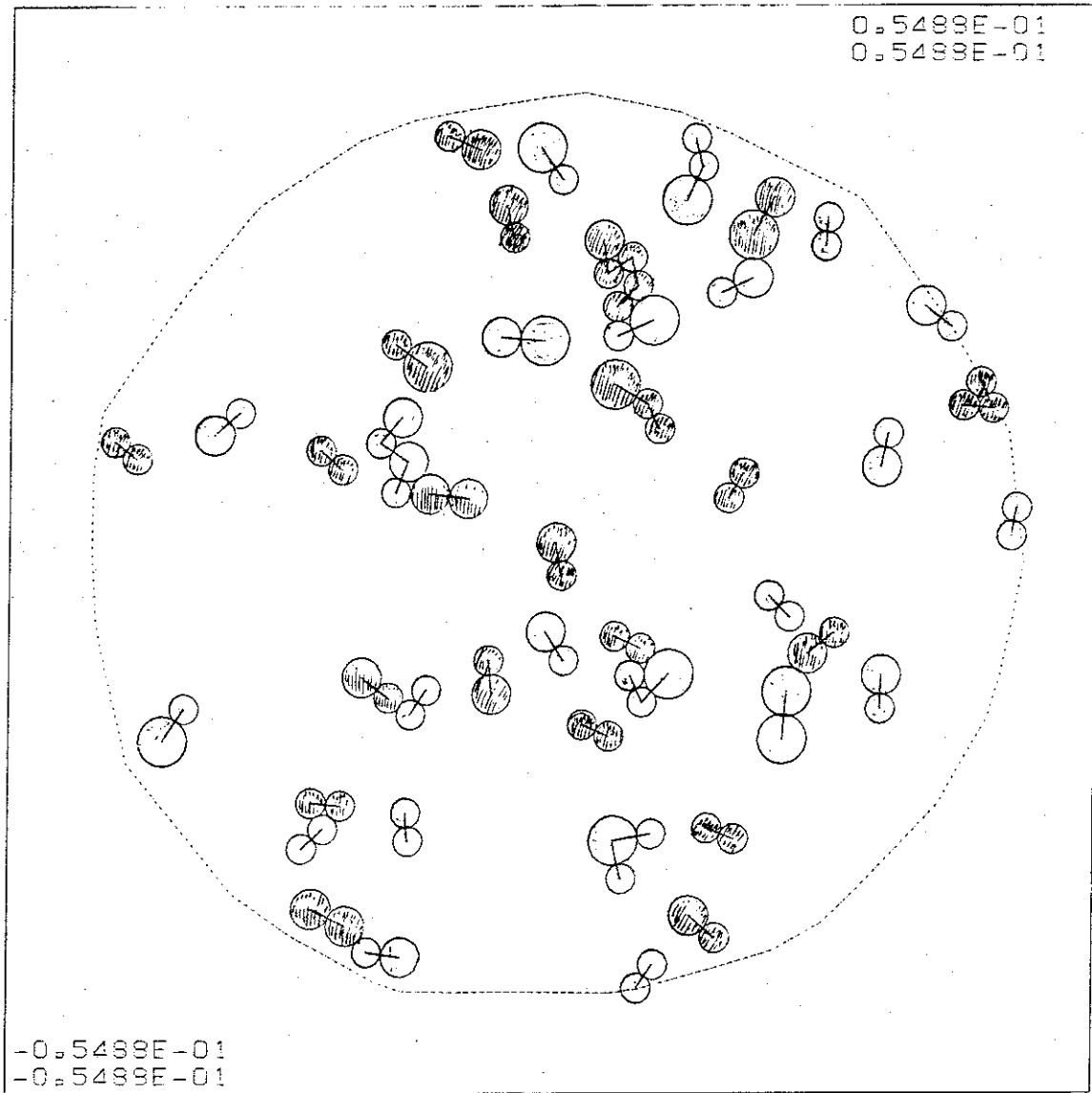


FIGURA 6.43 .- a) Ejemplo de partículas compuestas poliesféricas:
P20.

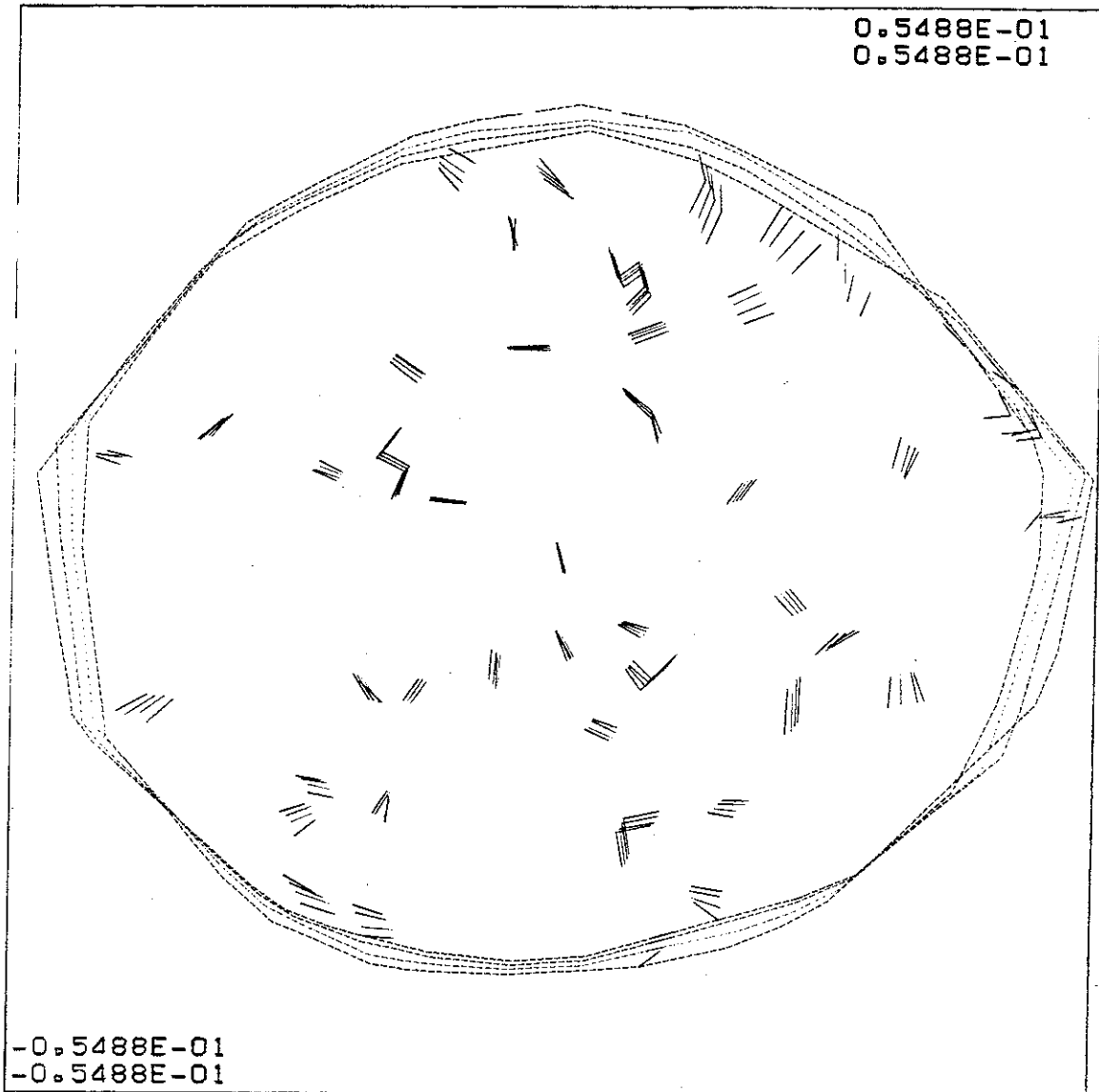


FIGURA 6.43 (Cont.) .- *b) Evolución de la situación y orientación de las poliesferas P20, dentro de una línea de ensayo de inundación bajo corte.*

$t_i = 4.54 \cdot 10^{-3}s$, $t_i = 5.02 \cdot 10^{-3}s$, $t_i = 5.54 \cdot 10^{-3}s$, y $t_i = 6.04 \cdot 10^{-3}s$.

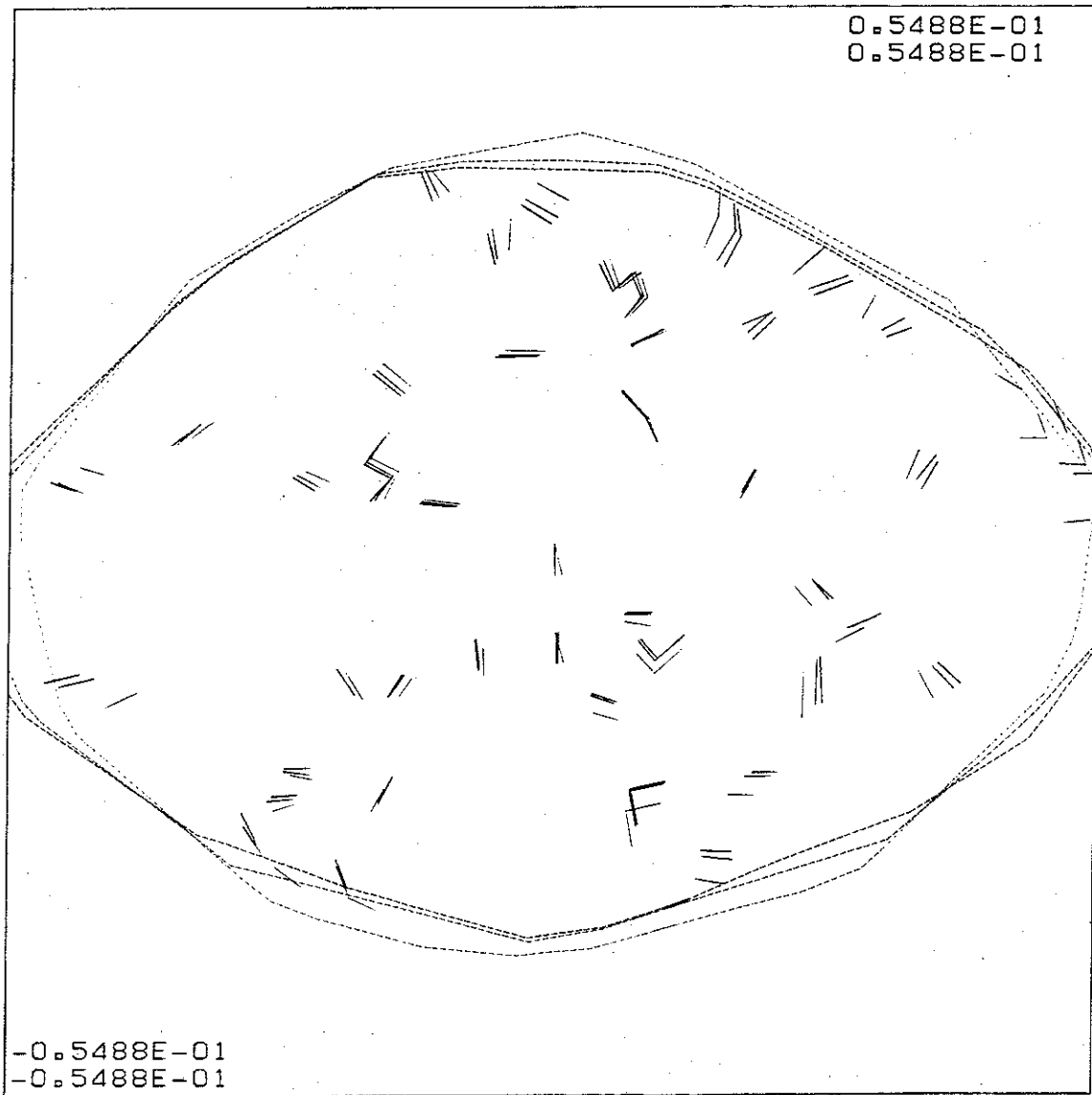


FIGURA 6.43 (Cont.) - c)
 $t_i = 6.56 \cdot 10^{-3}s$, $t_i = 8.1 \cdot 10^{-3}s$, y $t_i = 8.66 \cdot 10^{-3}s$.

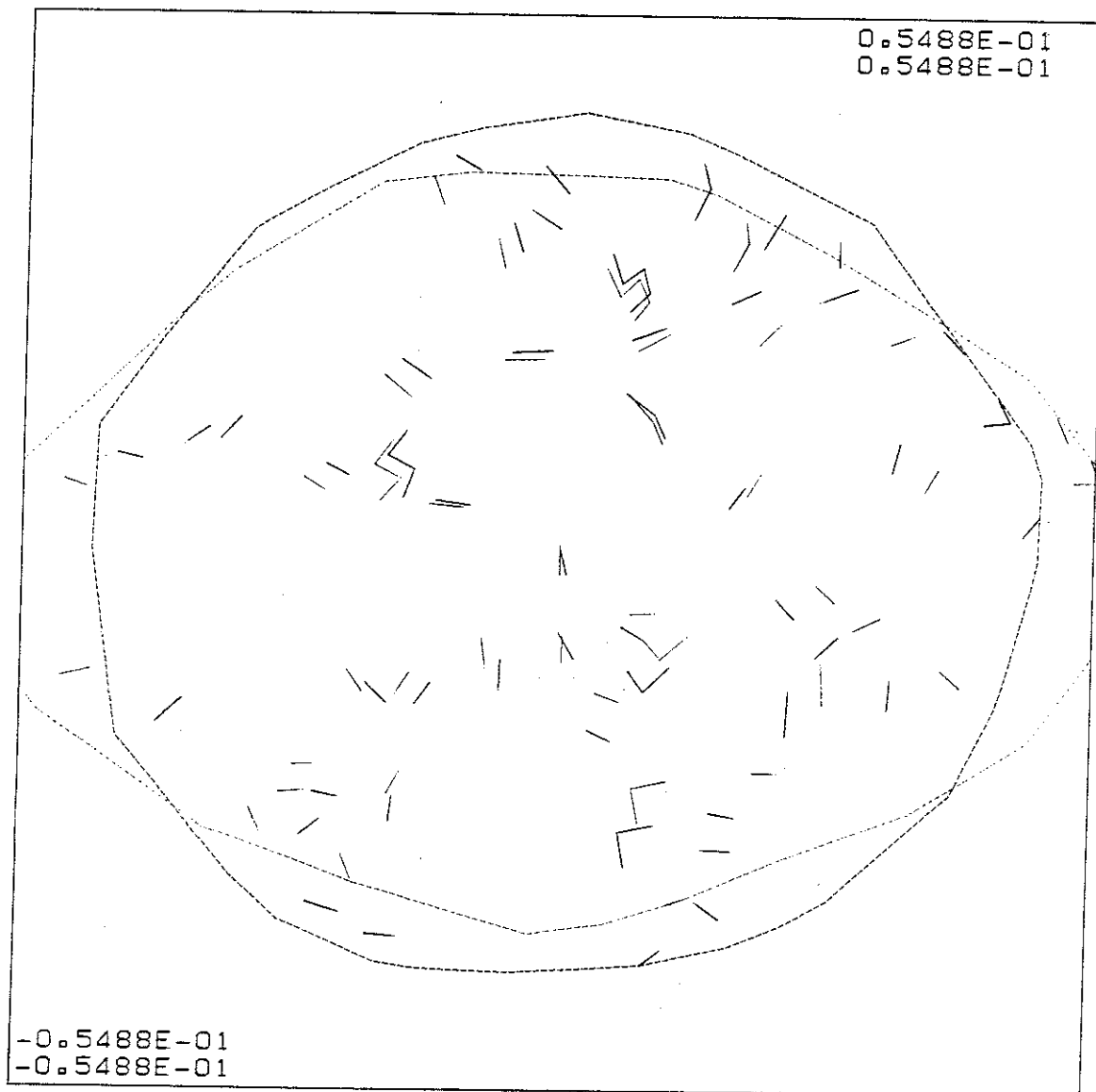


FIGURA 6.43 (Cont.) - d)
Comparación entre $t_i = 4.54 \cdot 10^{-3}s$, y $t_i = 8.66 \cdot 10^{-3}s$.

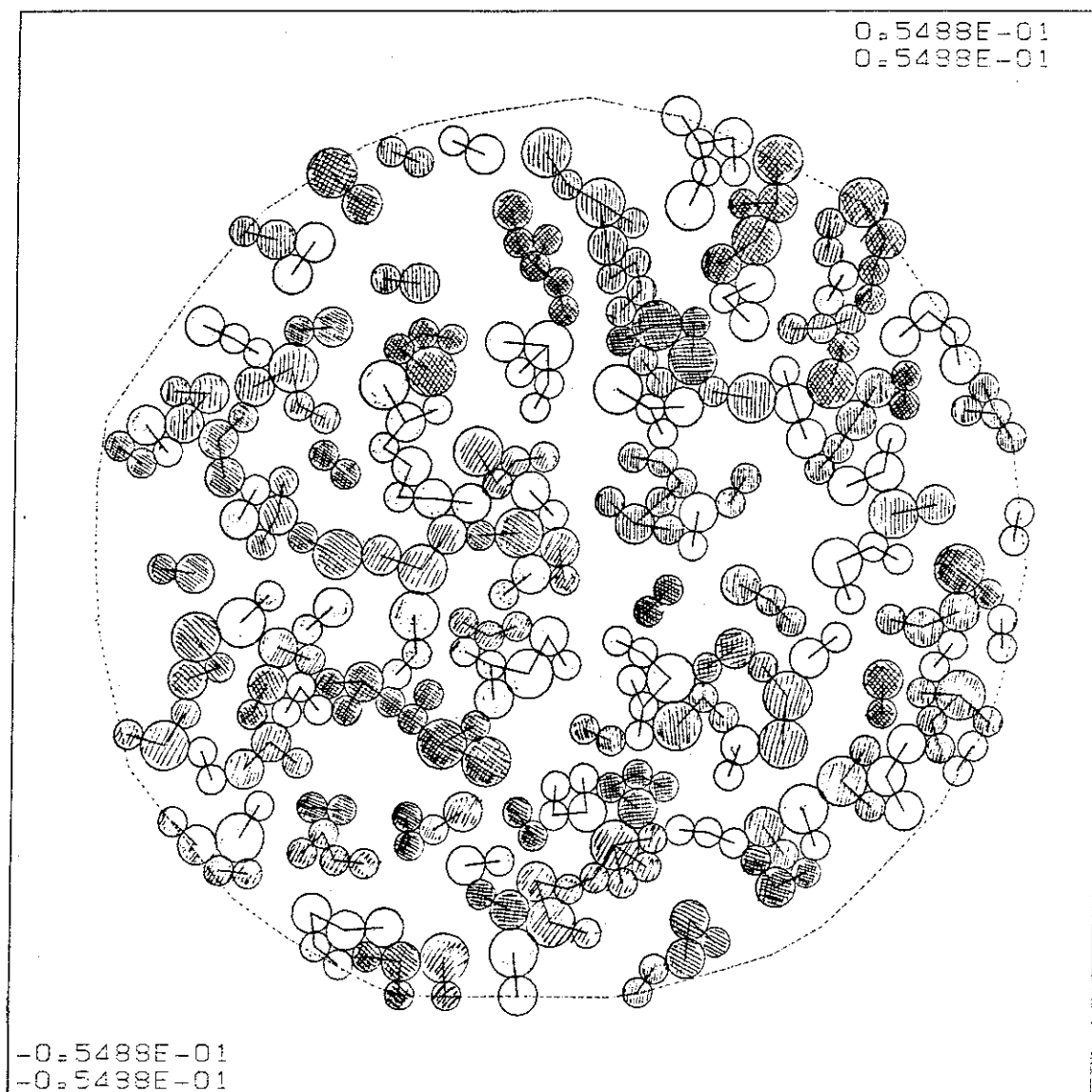


FIGURA 6.44 .- a) Ejemplo de partículas compuestas poliesféricas: P5.

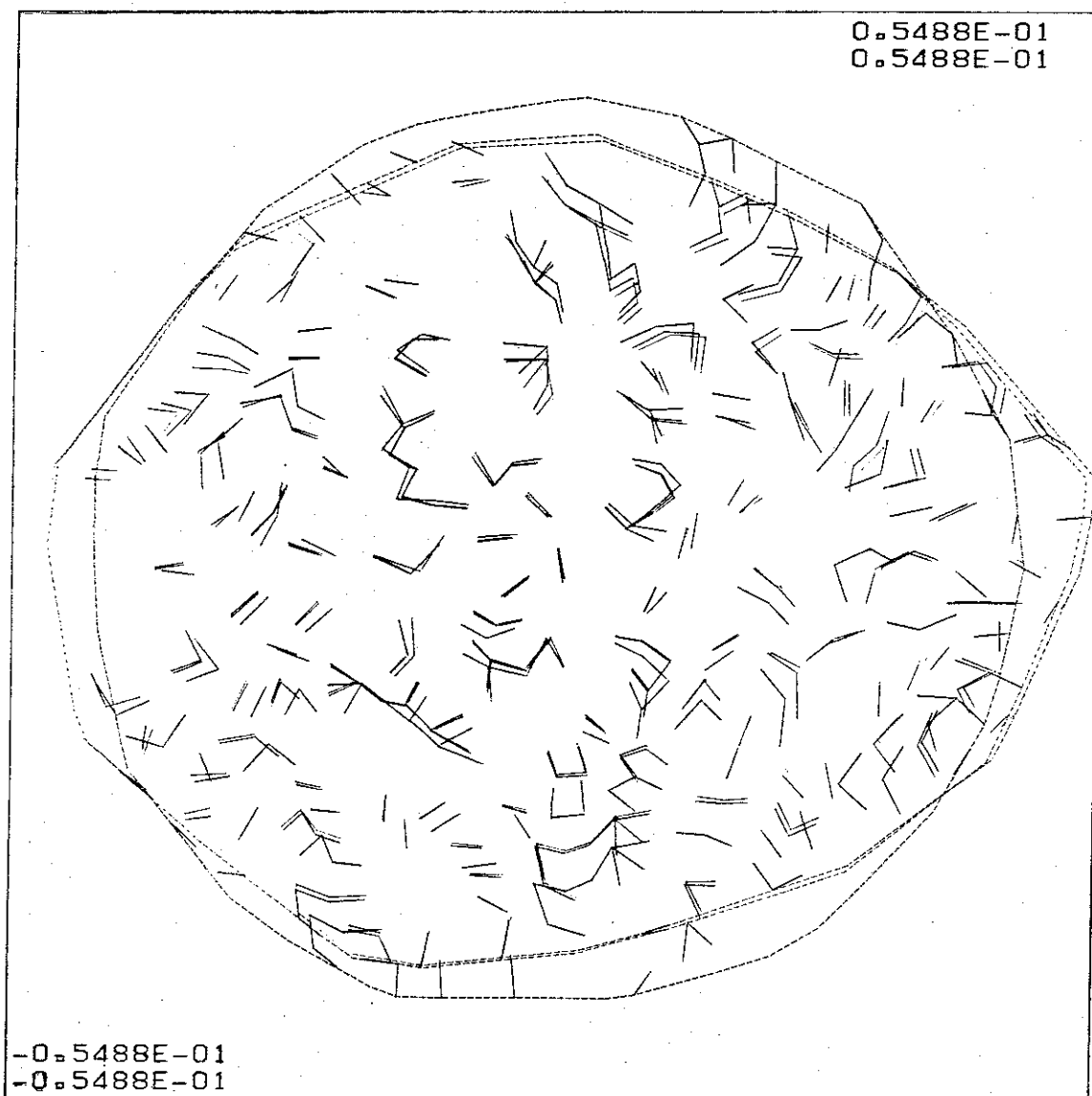


FIGURA 6.44 (Cont.) .- *b) Evolución de la situación y orientación de las poliesferas P5, dentro de una línea de ensayo de inundación bajo corte.*

$t_i = 4.1 \cdot 10^{-3}s$, $t_i = 6.44 \cdot 10^{-3}s$, y $t_i = 6.96 \cdot 10^{-3}s$.

La deformabilidad y la resistencia de la muestra también quedan afectadas según se puede apreciar en la figura 6.45.

Lo anterior sólo constituye un ejemplo de viabilidad en el cual no se ha ahondado más, pero que se considera de interés en el futuro.

6.3.2.3 DETALLES MICROESTRUCTURALES

A continuación se van a subrayar una serie de detalles constitutivos del modelo que se cree interesante resaltar y que han surgido de manera significativa a lo largo de los ensayos.

Como ya se ha indicado anteriormente, las fuerzas totales transmitidas por los contactos en el plano del modelo pueden asociarse a la acción de los meniscos, aunque no directamente. Muchos de los comentarios que se vierten a continuación están relacionados con este tipo de fuerzas. En los diagramas de fuerzas presentados hasta aquí se ha trabajado siempre con las totales en lugar de hacerlo con sus componentes (según la ecuación 5.7) por separado porque en realidad son las fuerzas totales y no dichas componentes las que, a través de la aceleración resultante, determinan el efecto mecánico final. Las fuerzas capilares debidas a la presencia de los meniscos en realidad son de valor no muy variable a lo largo del ensayo (salvo circunstancias extremas y en puntos concretos del modelo) y actúan estrictamente según la normal al contacto. Su efecto mecánico concreto está en función de su combinación con las otras componentes para dar la fuerza total.

En la figura 6.46 se ilustran varios casos. Si no existe menisco (a) la "oblicuidad" de la fuerza transmitida por el contacto (ángulo en relación a la recta que une los centros, β) no puede superar el valor de ϕ_μ . En la subfigura b la aparición de F_w permite mayores ángulos β . En la subfigura c la fuerza normal total es de valor muy cercano a cero (sería el caso si ese fuera el único contacto de la partícula inferior y la situación fuera de equilibrio, por ejemplo). Sin embargo la fuerza por contacto físico,

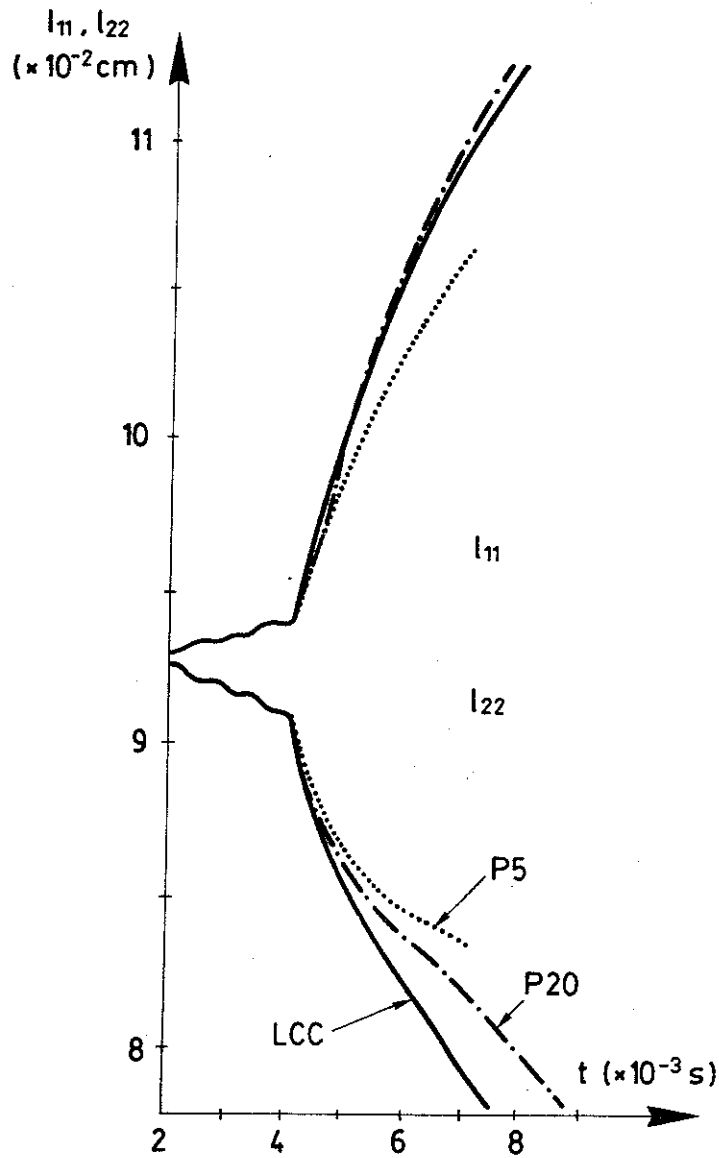


FIGURA 6.45 .- Influencia de las partículas compuestas en la deformación a lo largo del tiempo.

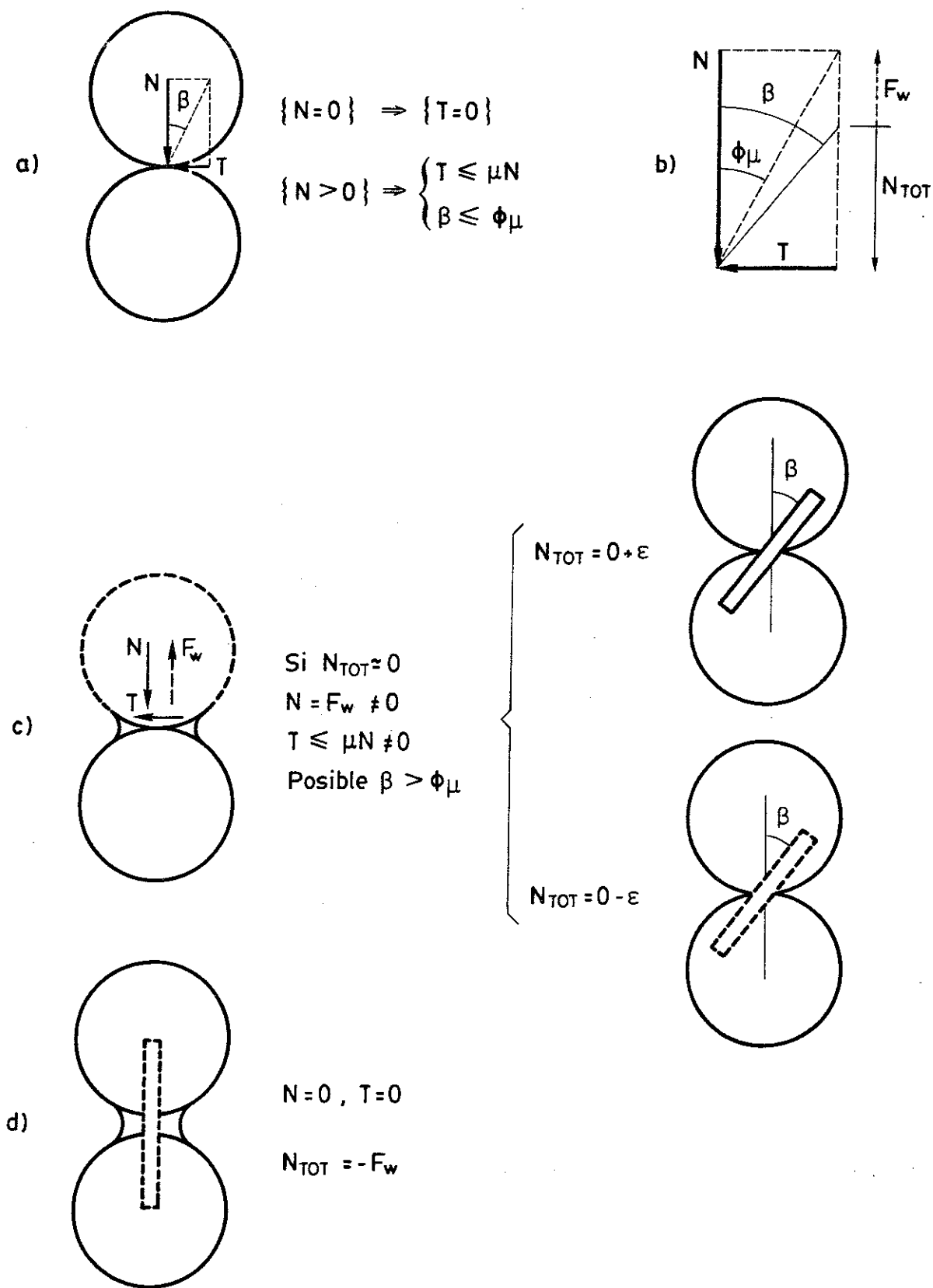


FIGURA 6.46 .- Meniscos y fuerza total transmitida.

N , es no nula al existir F_w y por este motivo la fuerza máxima resistible a corte es también no nula. En función de que N_{TOT} sea ligeramente superior o inferior a cero, la representación será por trazo continuo o discontinuo. La oblicuidad podrá ser muy superior a ϕ_μ . Si las partículas están separadas (d) la fuerza es F_w y es "normal" (oblicuidad cero). En las anteriores explicaciones y en la figura se han omitido las fuerzas de amortiguación, por considerarse situación de equilibrio.

En todo caso, la presencia de los meniscos es pues la causa última de las oblicuidades superiores al valor de $\phi_\mu = 26.5^\circ$ utilizado. Pueden darse β altos, especialmente cuando el módulo de la fuerza transmitida es bajo. En la figura 6.47, β se puede evaluar en 30° sobre la partícula 1 ó 2; ó en 47° en el menisco m ; ó en 62° en la partícula 3. Las esferas 2 ó 3 sólo tienen dos contactos y bastante oblicuos: si no fuera por la presencia de los meniscos (que no se han representado) no podrían mantenerse "pinzadas" en esa situación.

La oblicuidad es la responsable de que las cadenas de carga queden algo "enturbiadas", como se ha comentado al respecto de la figura 6.19. Esto ocurre especialmente a cargas exteriores bajas, donde las fuerzas normales transmitidas son menores. Al inundar la muestra y relajarse las F_w , todos los contactos con β alto deberán reajustarse por deslizamiento, preámbulo del colapso.

En algunos casos el papel de los meniscos es mantener en un determinado emplazamiento a partícula o partículas escasamente cargadas. En la figura 6.48 se ve un conjunto de ellas en esta situación, en el interior de una serie de cadenas (o anillos) de carga.

En otras ocasiones el papel de los meniscos es más activo, actuando a modo de tensores en el espacio entre cadenas (ver figura 6.49). En cierto modo actúan como rigidizadores de las cadenas de carga, dándoles mayor estabilidad.

Los meniscos m de la figura 6.49b ayudan a equilibrar a la partícula 1, que sin las fuerzas totales en trazo discontinuo (iguales en este caso a F_w) se vería acelerada hacia la parte superior izquierda por las fuerzas de trazo continuo. En el caso de la figura 6.49c unos ciertos meniscos m , a tracción, logran que se transmita a través de los contactos c un empuje a las partículas 1 y 2 capaz de estabilizar "lateralmente"

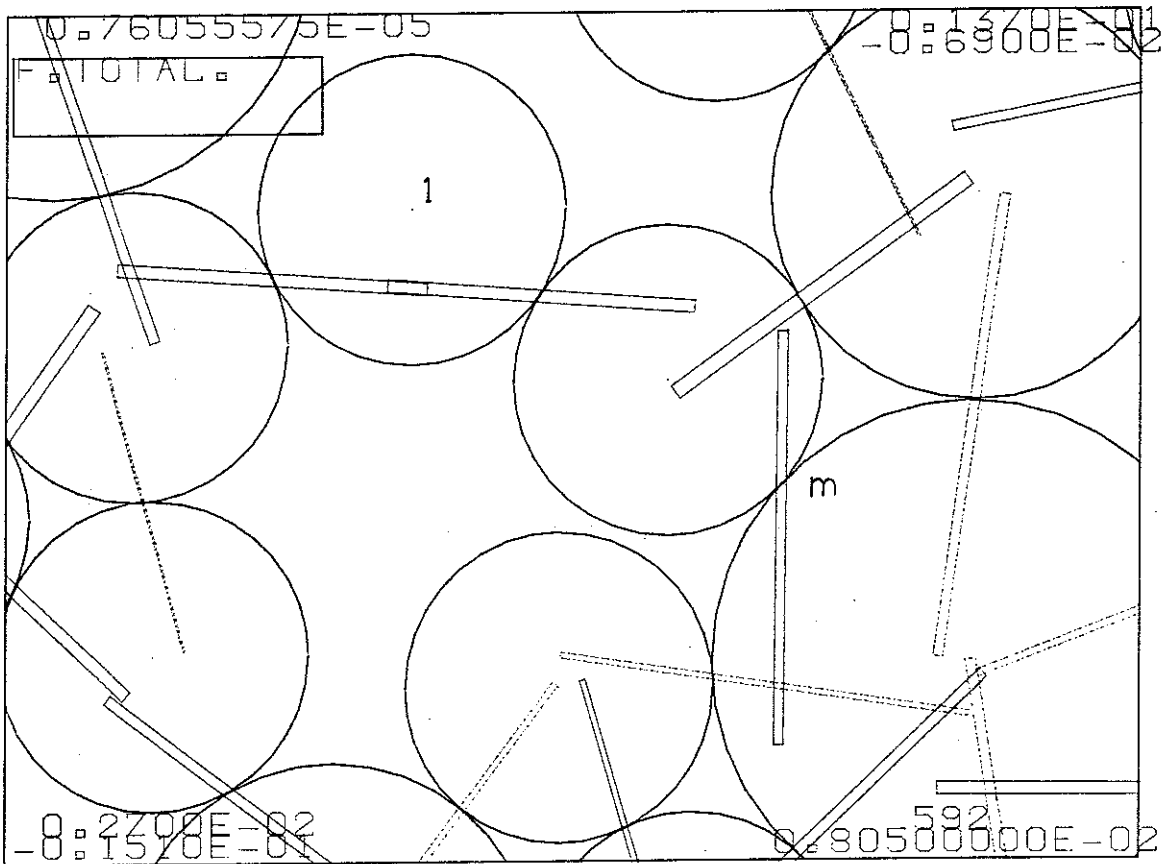


FIGURA 6.47.- a) Fuerzas transmitidas a través de los contactos, con oblicuidades altas.

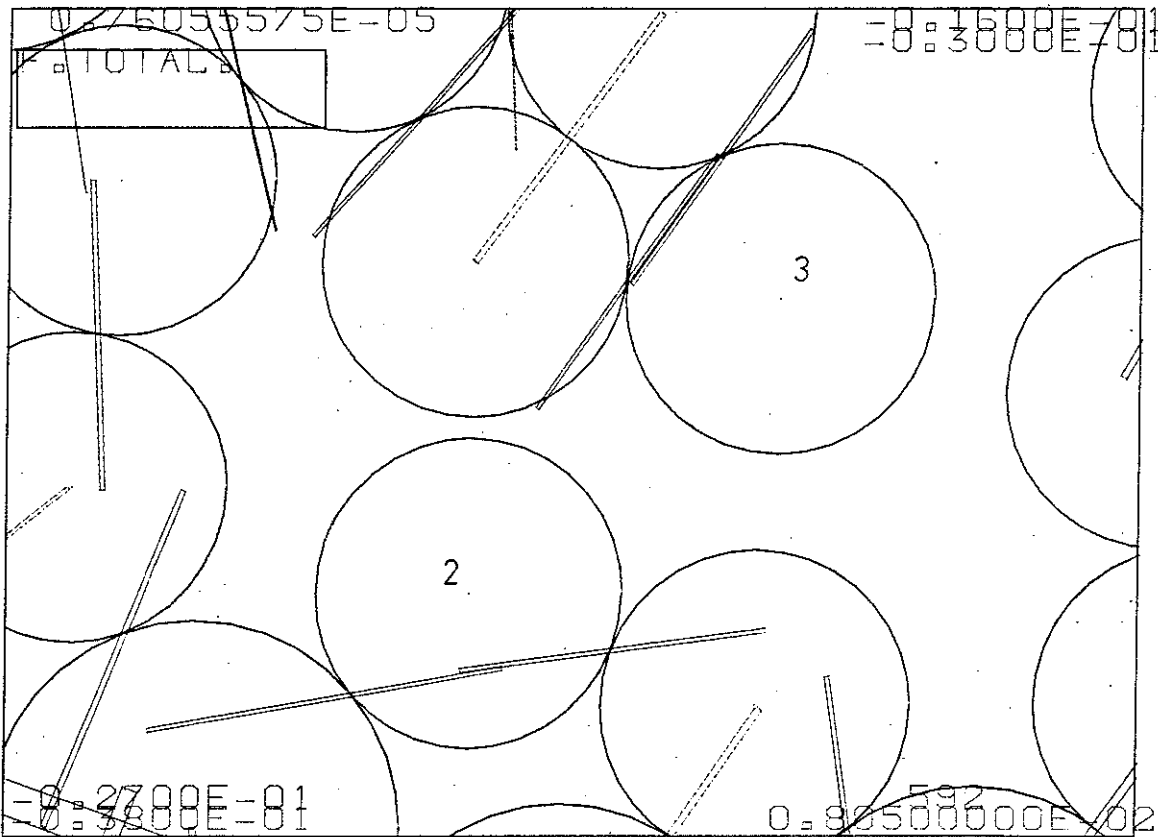


FIGURA 6.47 (Cont.) .- b)

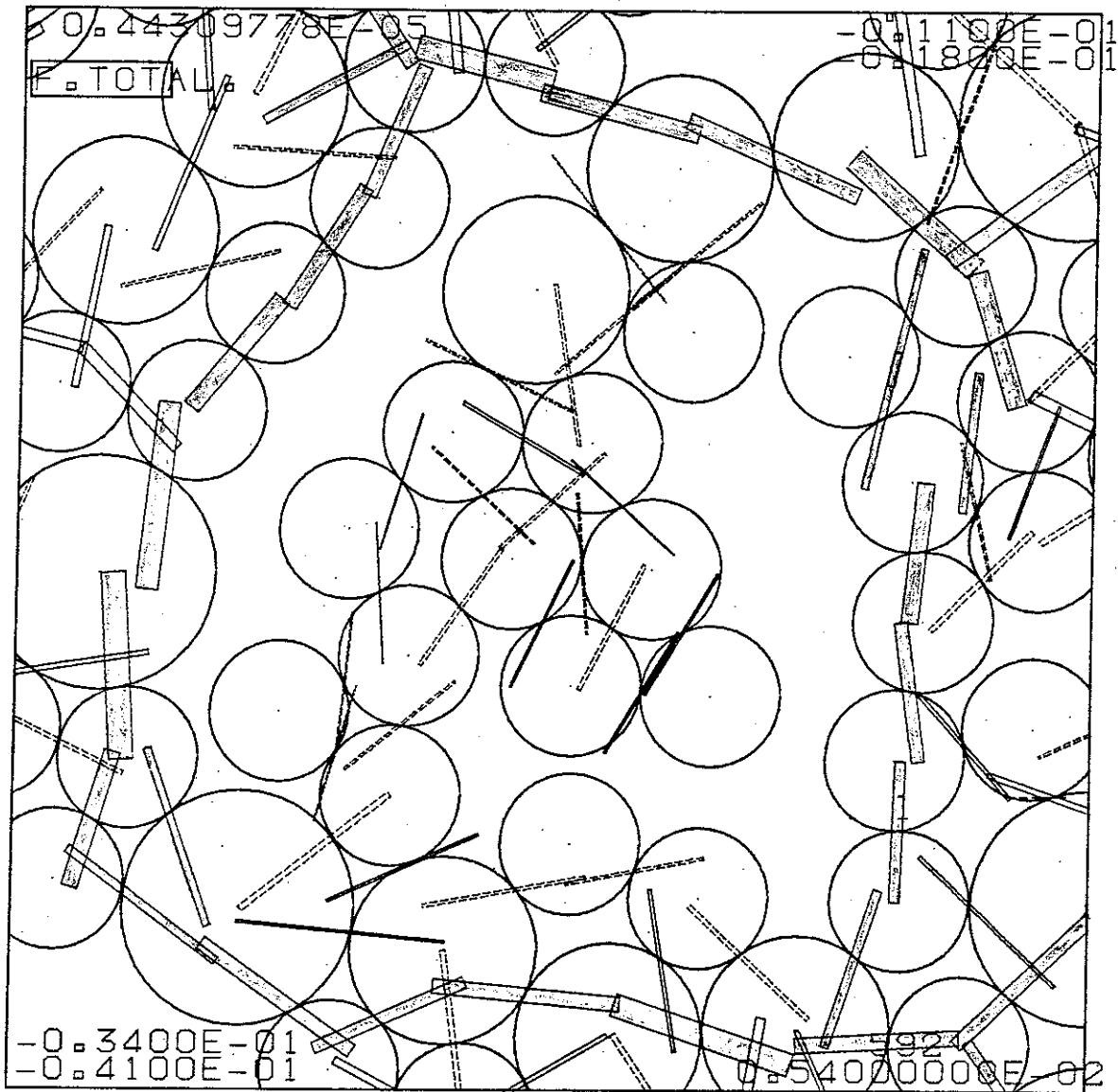


FIGURA 6.48 .- Conjunto de partículas escasamente cargadas, que se mantienen en cierta posición dentro de un anillo cargado.

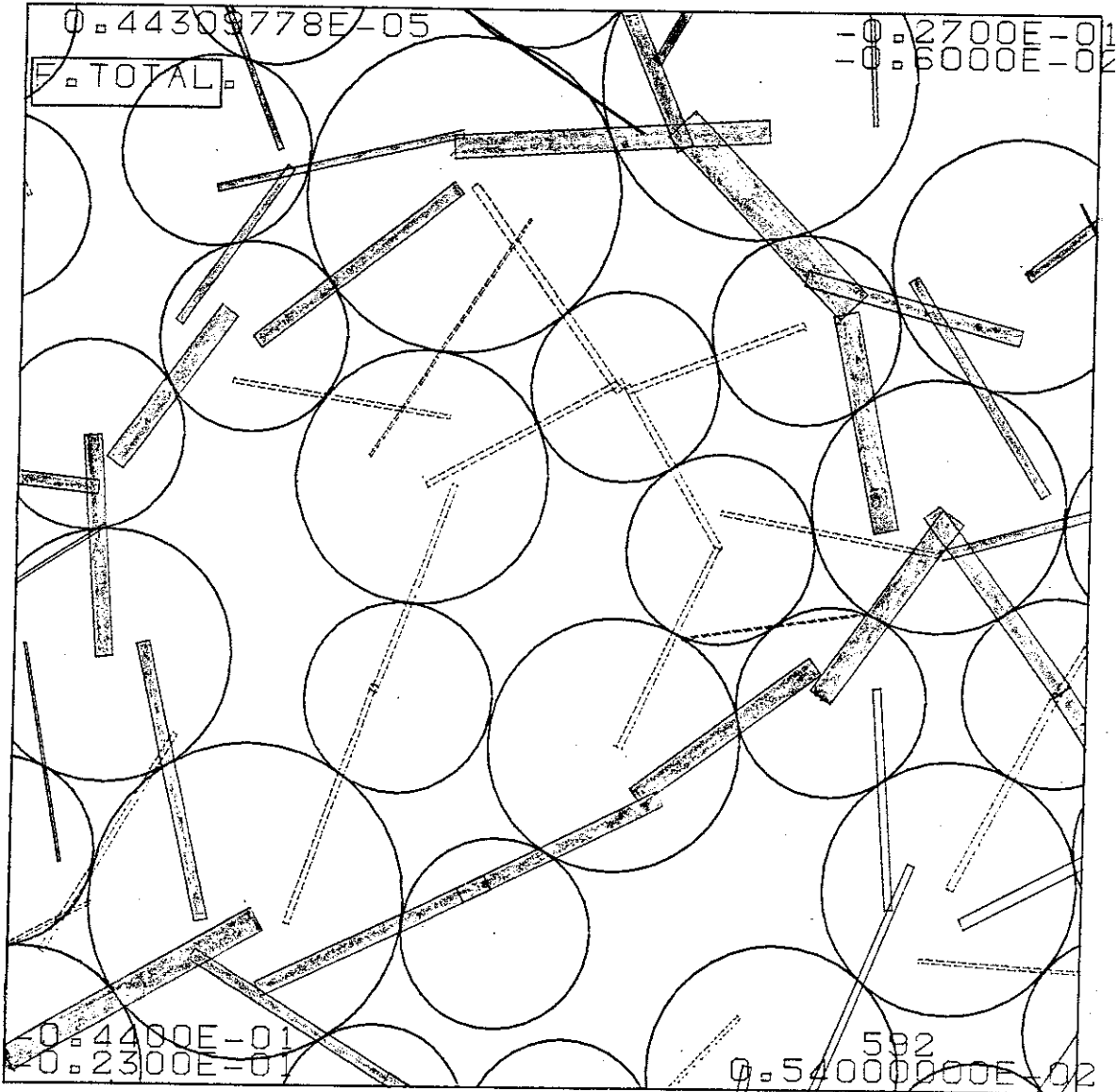


FIGURA 6.49 .- a) Partículas "equitraccionadas" en el interior de un anillo de carga, al que dan estabilidad.

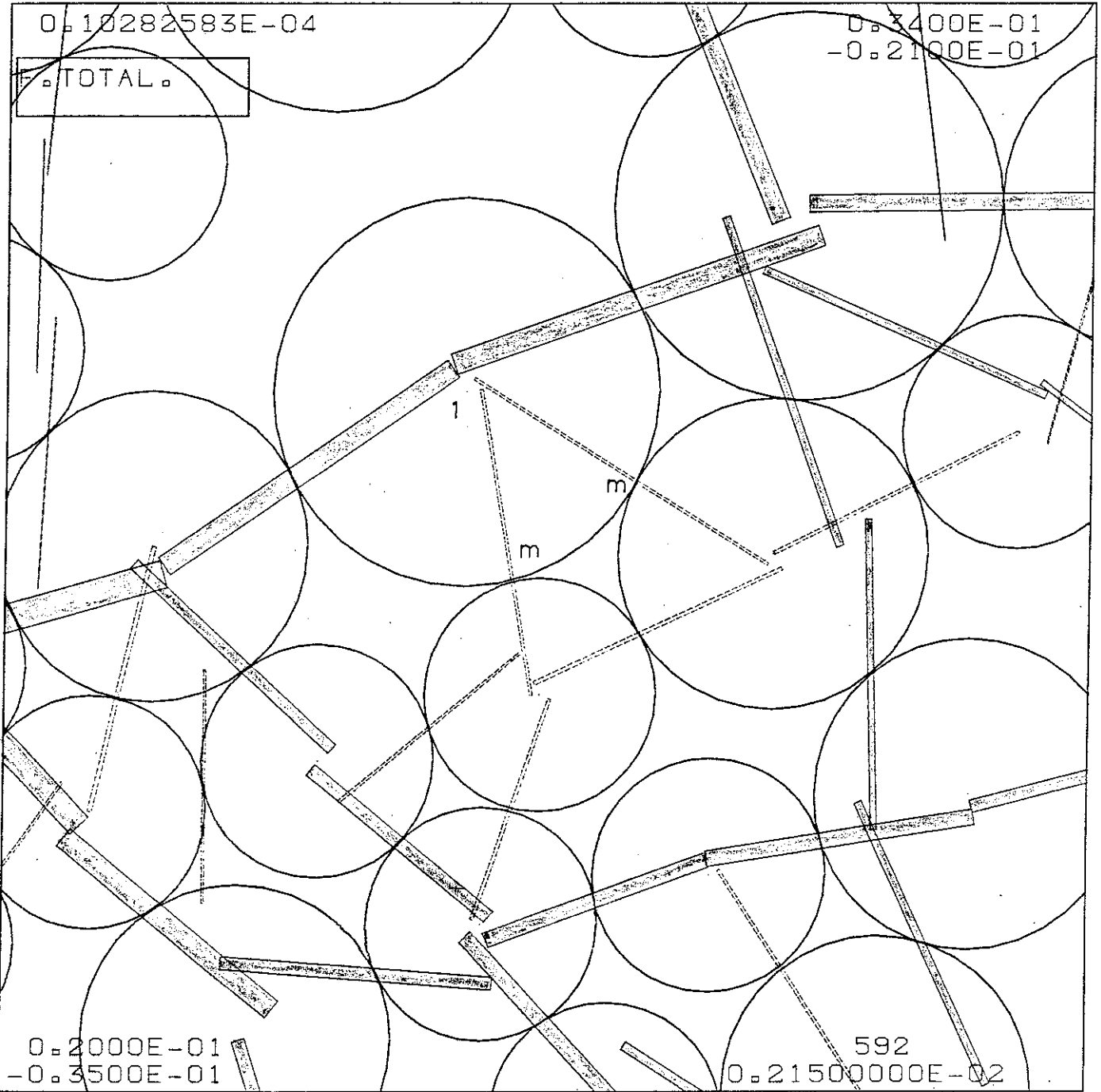


FIGURA 6.49 (Cont.) .- b)

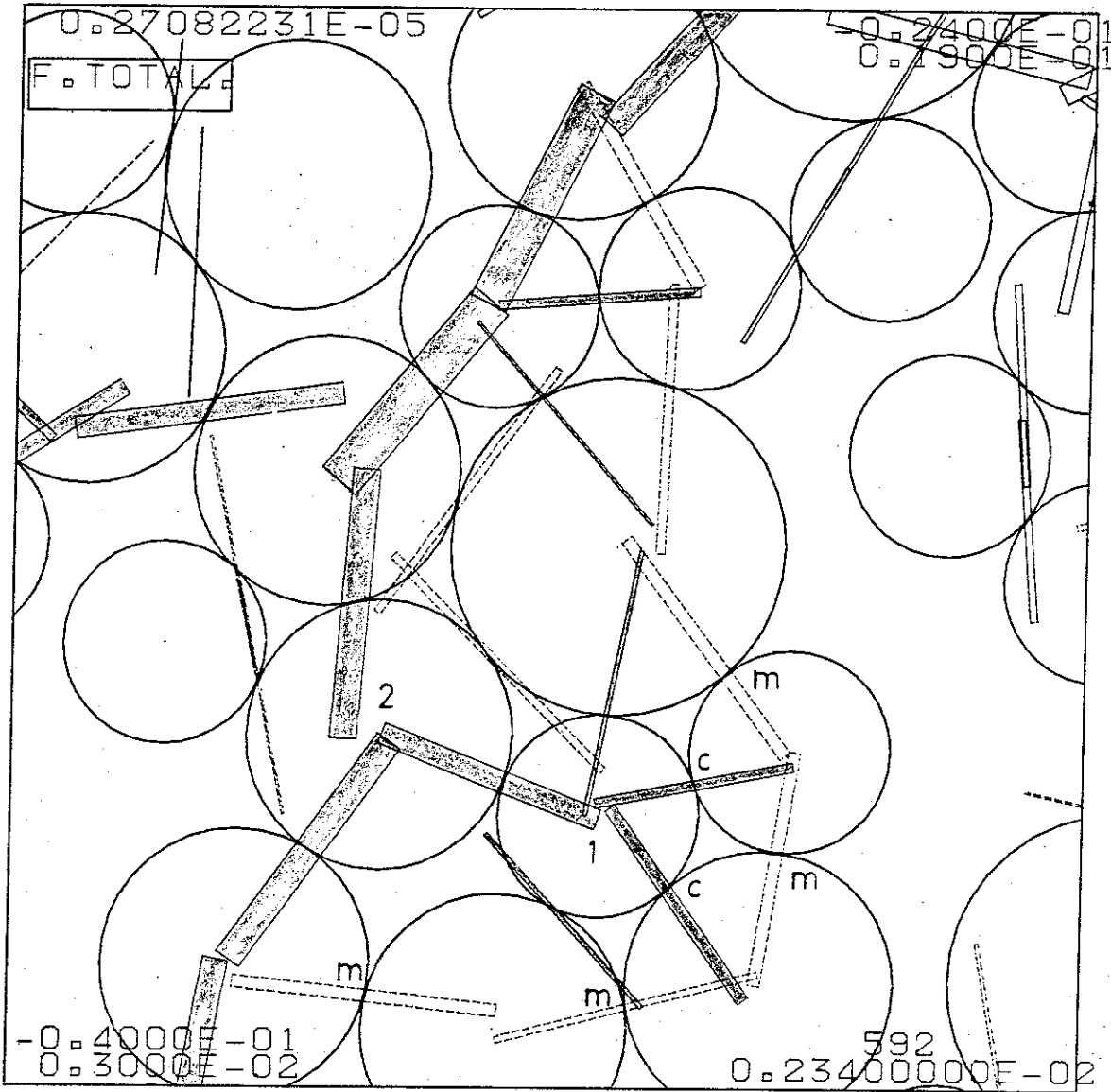


FIGURA 6.49 (Cont.) - c)

una importante cadena de carga.

Finalmente el papel de determinados meniscos puede ser clave para la formación y mantenimiento de determinadas cadenas de carga de “doble ancho” (cadenas que como se ha comentado al respecto de la figura 6.29 parecen abarcar a dos partículas).

La figura 6.50 consiste en dos visiones de cerca de dichas cadenas. Parece evidente que de no existir las fuerzas “de armado” asociadas a los meniscos la cadena se abriría, desorganizándose (esto es justamente parte de lo que ocurre en el colapso debido a la eliminación de las F_w).

Las figuras de este epígrafe corresponden primordialmente a estados incluidos en 6.3.2.1 aunque algunas de ellas no son situaciones equilibradas sino intermedias. Adicionalmente en otros puntos de este capítulo se han comentado detalles de interés (por ejemplo, al respecto de la figura 6.40 y en relación a las “poliesferas”).

Queda así probada la importancia, a nivel microestructural, de la acción del agua a succión en los meniscos, tanto estabilizando el contacto contra el deslizamiento tangencial como rigidizando “a tracción pura” las cadenas y los anillos de carga.

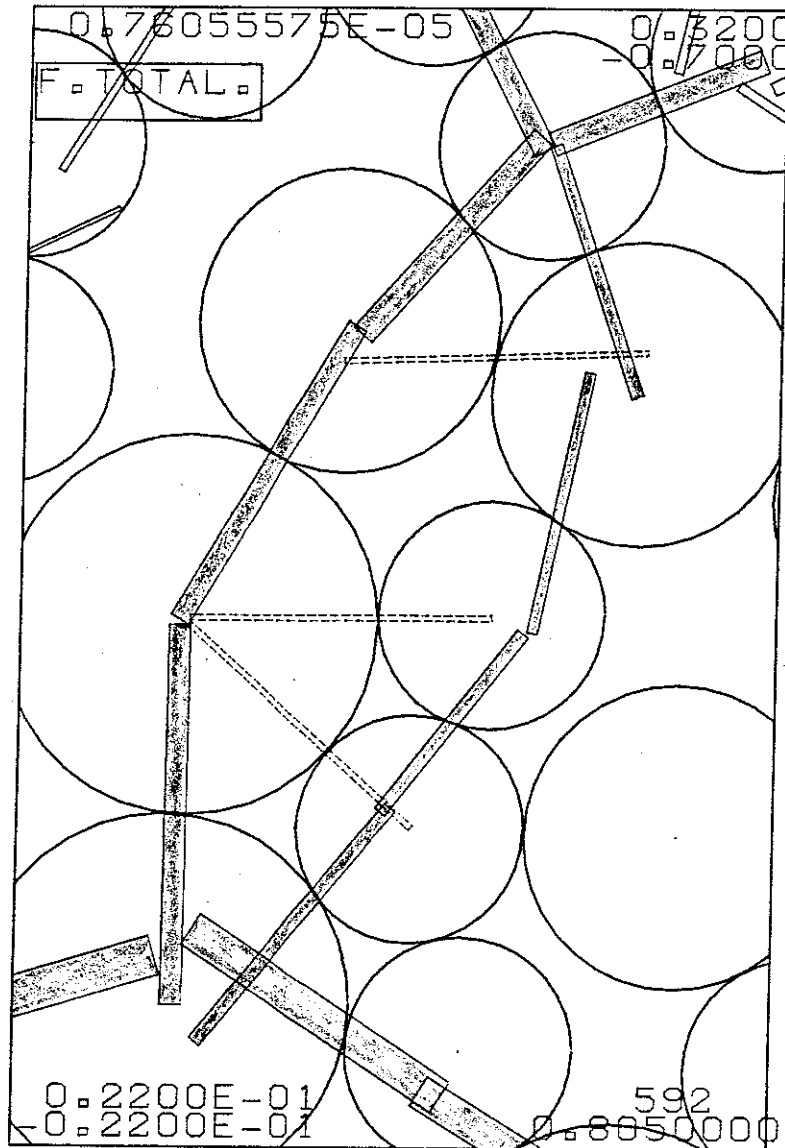


FIGURA 6.50 .- a) Acción estabilizadora de los meniscos sobre cadenas de carga.

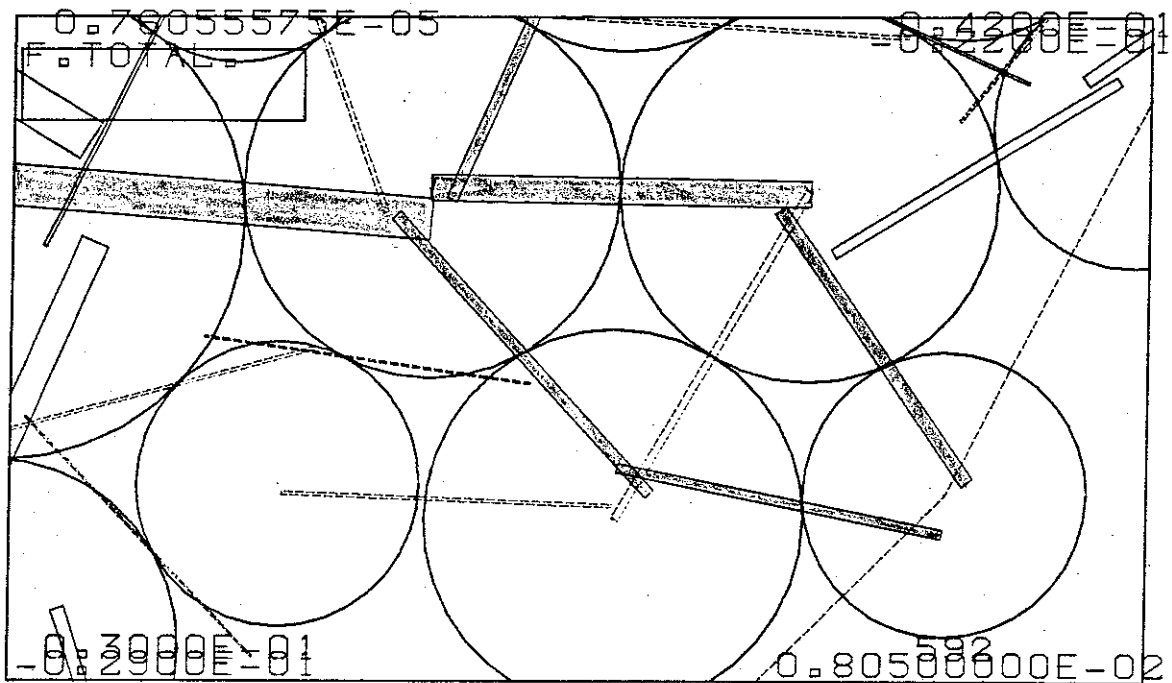


FIGURA 6.50 (Cont.) .- b)

**RESUMEN, CONCLUSIONES Y LINEAS
DE INVESTIGACION ABIERTAS**

7.1 RESUMEN Y CONCLUSIONES

A continuación se resumen los aspectos más importantes del trabajo realizado y las conclusiones que de él se derivan, distinguiendo tres grandes apartados: *aspectos básicos, modelo numérico, y ensayos realizados.*

7.1.1 ASPECTOS BASICOS

- Se ha llevado a cabo un estudio profundo del contacto individual entre partículas granulares finas en un suelo a bajos contenidos de humedad. En estas circunstancias se ha supuesto rodeado de un anillo de agua. La existencia de este “menisco aislado” ha dado paso al:

- ★ *Estudio de su geometría y del ángulo de contacto de la interfase líquido-aire sobre la superficie sólida. Concretamente se ha aproximado por una sección toroidal tangente a la superficie de las partículas.*

- ★ *Generalización del menisco* a casos distintos del “contacto estricto” (“sobre-contacto” y “cuasi-contacto”). En este último caso, la progresiva reducción del volumen del menisco puede conducir a una situación inestable, al adoptar el agua una presión mayor que la del aire circundante y que la del agua en otros meniscos cercanos.
- ★ Discusión del alcance de posibles *desviaciones* sobre la geometría adoptada, como son: meniscos-contacto de tipo cara-cara entre partículas; y papel de las fuerzas de adhesión sólido-líquido para dimensiones reducidas. Se ha visto en el capítulo 4 que pueden ser importantes.
- Se ha tenido especial interés en dotar de un cierto sentido físico a los parámetros mecánicos de los contactos:
 - ★ Se ha tenido en cuenta la posible *rugosidad superficial* de las partículas, resultando para el caso de que sean de tipo cuarcítico o pétreo una rigidez media del orden de 10 Kp/cm . Se han contrastado estos valores con rigideces menores, $\sim 0.016 \text{ Kp/cm}$, que pueden simular en primera aproximación otros materiales más compresibles.
 - ★ Tanteando el efecto del *amortiguamiento* en las deformaciones en el contacto, se ha considerado que el *crítico* puede ser adecuado para tener en cuenta la presencia del menisco de agua alrededor del contacto.
- Para describir los flujos y cambios de fase, se ha desarrollado un conjunto de relaciones físicas básicas, asentadas sobre una serie de hipótesis microestructurales relativamente sencillas y plausibles. Se ha discutido la validez y limitaciones de estas expresiones, especialmente en relación a la existencia y características de la *película* de agua adherida.
- Del estudio llevado a cabo en el capítulo segundo, se ha podido constatar, entre otros extremos, que determinadas ecuaciones relacionadas con la succión (como la de Laplace, o el mismo menisco aislado), pueden conducir por sí solas a conclusiones engañosas o entorpecedoras. En efecto, el menisco aislado, “sensu

stricto”, sólo servirá para humedades bajas ($S_r < 20\%$); muchas veces se ha utilizado para derivar relaciones macroscópicas a humedades mayores, cuando la relación entre la succión y las fuerzas intergranulares estará muy influenciada por la estructura particular que tenga el suelo. La ecuación de Laplace puede introducir nuevas incógnitas (los radios medios de curvatura). Sólo integrando ambas expresiones básicas en un contexto que contemple correctamente la microestructura interior del suelo se podrán obtener resultados útiles.

7.1.2 MODELO NUMERICO

- Para concretar los aspectos básicos del suelo granular estudiados, se ha concebido e implementado un modelo numérico en torno a tres elementos fundamentales: *partículas sólidas*, *meniscos de agua* alrededor de sus contactos, y *poros*. Se piensa que es el *primer modelo* de este tipo (discontinuo, a escala microscópica) descrito en la literatura para el suelo *no saturado*. Su propiedad más relevante puede ser la de dar a la estructura la importancia que tiene.
- Como primer paso se ha preparado un método de *generación aleatoria* de configuraciones iniciales de partículas esféricas, con granulometría y porosidad variables, generalmente en estado “abierto”.
- En el modelo se han integrado tres campos o líneas fundamentales (ver figura 7.1): *el mecánico*, que se centra en los esfuerzos transmitidos entre partículas y los movimientos inducidos; *el seguimiento geométrico* de los volúmenes de los meniscos y de los poros; *los flujos* de las especies presentes entre los meniscos y los poros. Estos dos últimos “campos” son contribución específica del presente trabajo.
- Mención especial merece el *aspecto geométrico*: además de las partículas, se ha concentrado el estudio en los poros por ellas enmarcados. Se han tenido que desarrollar importantes *algoritmos* de seguimiento de los poros (y de las

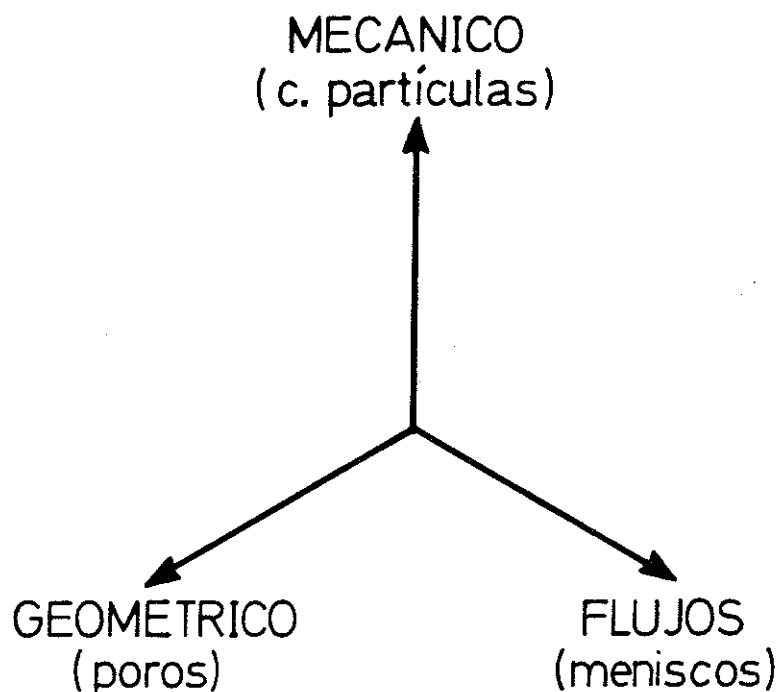


FIGURA 7.1 .- Líneas incluídas en el modelo numérico.

masas en ellos incluídas) al moverse las esferas y “romperse” o “crearse” nuevos meniscos. La mayor parte de la casuística generada está relacionada con el contorno de la muestra.

- El modelo considera el paso del tiempo, que es una dimensión poco incluída en los modelos de comportamiento, excepto en casos particulares (consolidación). Se ha discutido el uso de métodos *explícitos* o *implícitos* para el avance en el eje temporal. La elección se ha decantado hacia los primeros, que se han considerado especialmente indicados para las situaciones no estacionarias y de gran no-linealidad (especialmente de tipo geométrico) que se tratan.

★ Para el *aspecto mecánico* de ha adaptado el “Distinct Element Method”, de P.A. Cundall, con modificaciones (Capítulo 5) como: la “actualización inmediata” de la posición de las partículas tras el cálculo de la resultante; el “inicio aleatorio” de los bucles; distinto esquema de detección de

contactos; y empleo de parámetros con un cierto sentido físico.

★ Para modelar los flujos se ha desarrollado un nuevo método explícito inspirado en el anterior, con una serie de mejoras que garantizan la estabilidad numérica para cualquier Δt : “flujo exponencial”, “actualización inmediata” e “inicio aleatorio”. La continuidad de masas queda garantizada de forma trivial por el planteamiento.

★ Se ha efectuado un estudio de los incrementos de tiempo necesarios para satisfacer criterios de convergencia-estabilidad y de ajuste temporal a la solución correcta.

– Para los flujos, y en el rango de dimensiones que se ha tratado, se ha conseguido estabilidad para todo incremento de tiempo, y un buen ajuste temporal por debajo de $\Delta t_f = 1 \cdot 10^{-6} s$; normalmente se ha usado $5 \cdot 10^{-7} s$.

– En el esquema mecánico se ha comprobado que el incremento de tiempo necesario para que sea estable está muy ligado a la masa y la rigidez del sistema (según expresiones del capítulo 5), pero también se ha puesto en evidencia que depende del amortiguamiento que ostente el contacto entre partículas: con el esquema usado, a mayor amortiguamiento se debe usar menor Δt_m . Finalmente, para que el comportamiento de un conjunto de partículas en contacto se “ajuste en el tiempo”, se deberá usar aún un menor incremento de tiempo. En resumen para partículas del orden de $0.04 mm$ y con rigidez en los contactos de $10 Kp/cm$ se ha tenido que usar $\Delta t_m = 5 \cdot 10^{-9} s$, aunque si la rigidez era de $0.016 Kp/cm$ se podía usar $\Delta t_m = 1.25 \cdot 10^{-7} s$.

● El modelo desarrollado permite:

★ Análisis *desacoplado* bien de flujos o bien mecánico.

– El primero permite reproducir fenómenos de convección y difusión de solutos, por ejemplo.

– En el segundo caso sólo se tratarían las fuerzas y movimientos de las partículas, sin considerar poros ni meniscos, ni las fuerzas asociadas a

estos últimos. Por este motivo se ha considerado que este caso corresponde al comportamiento de las partículas en estado saturado o seco.

- ★ **Análisis acoplado** que permite estudiar conjuntamente el comportamiento flujo-deformacional bajo solicitaciones diversas: Carga o descarga isotrópica o desviadora; variaciones de las condiciones especificadas de presión de aire o de agua, etc. Puede por tanto ser utilizado para investigar fenómenos como el *colapso* al reducir la succión, variación de la resistencia con la succión, dependencia de la respuesta del suelo de la trayectoria de carga y succión aplicadas, etc., tanto a pequeñas como a grandes deformaciones.
- El modelo tiene una serie de limitaciones, que no conviene ignorar:
 - ★ **2D-3D.** Aunque se han concebido las partículas en tres dimensiones (esferas), y también los meniscos son “espaciales” (resultando relaciones succión- F_w más realistas), los movimientos tienen lugar en el plano del modelo (2D). Al imponer que los centros de las partículas estén en el mismo plano del modelo se está sobrevalorando la indeformabilidad de la muestra. La tercera dimensión aumentaría en un orden de magnitud las posibilidades de reordenamiento del esqueleto. Como acertadamente indica Rodríguez Ortiz (1974), en relación a los modelos analógicos, “Muy poco se ha profundizado sobre las condiciones de esta proyección” (de tres a dos dimensiones). Las reordenaciones en la tercera dimensión serán significativas incluso en ensayos macroscópicamente “planos” (de deformación plana, edométricos...), porque microscópicamente se darán movimientos en la tercera dimensión. Debido a esta proyección 3D-2D, aunque los valores de la porosidad n son más o menos plausibles, sus variaciones en carga o en colapso son relativamente reducidas. Por tanto, también la mayoría de los resultados deben evaluarse desde un punto de vista *cualitativo*, confiriendo al modelo numérico un carácter de herramienta de *investigación básica*: contraste de hipótesis, variación (sensibilidad) de parámetros microestructurales, etc.

- ★ S_r bajos. La figura del menisco aislado implica grados de saturación bajos. Aunque es posible que existan meniscos aislados hasta mayores humedades, existen meniscos aislados *exclusivamente* sólo para grados de saturación bajos (menores del 20% aproximadamente). El modelo permite también el caso saturado, $S_r = 1$, aunque el paso es atemporal.
- ★ *Rotura*. El modelo por su esquema relajativo con fuerzas de tipo viscoso (con una cierta base física) da resultados correctos en los estados de equilibrio (velocidades prácticamente nulas). En estados intermedios, los valores del amortiguamiento adoptados podrían ser claves en la respuesta obtenida, si la velocidad de carga es excesiva en relación a los coeficientes de amortiguación (las fuerzas viscosas podrían dar en ese caso una resistencia aparente mayor). En la mayor parte de los ensayos llevados a cabo, tras un cierto incremento de carga se llega a equilibrio. Sin embargo en los estados próximos a rotura es difícil y dilatado (y a veces incierto) conseguir dicho equilibrio. Por otro lado las velocidades de las partículas suelen ser mayores. En estas situaciones se deberá tantear un cierto equilibrio entre la velocidad de carga y la entidad de las fuerzas amortiguadoras.
- ★ *C.P.U.* Los ensayos numéricos consumen mucho tiempo de C.P.U.: en los que han servido para ilustrar esta tesis se han invertido del orden de las 1000 (sic) horas de C.P.U.-VAX 8600. En el capítulo 5 se dan ejemplos de otros autores que emplean tiempos de la misma magnitud. A título de consuelo Hut et al.(1987) en relación a una simulación de mecánica de galaxias aseguran que “pudo llevarse a cabo con los ordenadores disponibles; consumió menos de un año de C.P.U.”. Además hay que tener en cuenta que el tiempo “natural” será superior, al usarse los ordenadores “a tiempo compartido”, en general. En todos los casos citados estos altos requerimientos de tiempo son un lastre. Pero por otro lado también un estímulo, como se verá en el epígrafe de “líneas abiertas” (7.2). No hay que olvidar que el problema que se soluciona es realmente de envergadura: cientos de sólidos (y masas de fluidos) en movimiento, con ligaduras y coacciones variables en el espacio y en el tiempo.

Estas particularidades del modelo numérico no son más que una limitación relativa del mismo, por cuanto éste no ha pretendido sustituir a la realidad, sino complementarla. Un idea real de cómo se comporta el suelo sólo se podrá conseguir ensayando suelo real en condiciones reales. Sin embargo para obtener una explicación del *porqué* de la respuesta, sí que será útil recurrir a modelos numéricos como el presente, dado que son más “transparentes” (condiciones de contorno y fuerzas perfectamente conocidas y controladas).

7.1.3 SOBRE LOS ENSAYOS NUMERICOS

El limitado número de ensayos numéricos llevados a cabo impide extraer conclusiones muy generales. A continuación se resumen las conclusiones más importantes de los “ensayos” efectuados, en especial de los acoplados con flujo y deformación, comentando algunas peculiaridades detectadas durante su realización.

- Con el modelo se ha simulado la carga y descarga isotrópica y el colapso de un medio granular fino compuesto por partículas relativamente rígidas (conjunto de parámetros de la relación 5.14):

- ★ La deformación asociada a los contactos es pequeña en comparación con la deformación por reordenamiento del esqueleto. Correspondientemente en descarga se registra una reducida recuperación del volumen perdido durante la carga.

- ★ Al reducir o anular la succión se reproduce un claro fenómeno de *colapso*, confirmando que los cambios en las *fuerzas interpartículas* asociadas a los *meniscos* pueden provocar colapsos apreciables.

Aunque la tensión exterior sea isotrópica, se inducen en los contactos sollicitaciones de corte. Aunque ésto es sabido, es difícil de caracterizar si no es con un modelo microestructural como el presente. La fuerza tangencial máxima queda ampliamente aumentada por la F_w de los

meniscos. La disipación de éstos por inundación induce así colapsos.

- ★ El modelo permite el conocimiento punto a punto y en todo instante del estado de la “masa granular”. De esta manera se han podido “observar” algunos *mecanismos microestructurales* relevantes en los procesos anteriores, como son:
 - La succión favorece el mantenimiento de cadenas de transmisión preferencial de carga, limitando su tendencia a la degradación local cuando aumenta la carga. También se observan ciertas cadenas “paralelas” favorecidas por la acción de los meniscos.
 - La succión aumenta la “oblicuidad” de las cargas totales transmitidas por contactos, sin que deslicen.
 - En el plano del modelo las cadenas de transmisión de carga dejan espacios relativamente no tensionados, pero con partículas aglomeradas por efecto de la succión.
 - En el estado “inundado” las cadenas aumentan en número como consecuencia del reordenamiento y de la menor “oblicuidad” de los esfuerzos transmitidos. Las nuevas cadenas transmiten menor carga.
- El modelo ha sido aplicado también a un medio granular fino compuesto por partículas relativamente compresibles (conjunto de parámetros de la relación 5.15). En este caso el interés ha sido doble: Simular en primera aproximación esferas realmente más deformables, como pueden ser agregaciones o “packets” de partículas más finas, de tipo arcilloso; por otro lado el interés numérico se centra en poder usar incrementos de tiempo mayores, que junto a los menores amortiguamientos asociados resulta en una gran economía de tiempo. Se han realizado:
 - a) Ensayos de aplicación de incrementos alternativos de carga y succión en el plano $(\sigma - p_a) \times s$, bajo trayectorias diferentes.
 - b) Ciclos de secado-humedecimiento.Algunas conclusiones son:

- ★ Se ha detectado que en ciertas trayectorias de colapso, coexiste un cierto *hinchamiento* de las muestras (debido a la relajación de la succión) y

un reordenamiento del esqueleto (típicamente el colapso estructural). En función de la importancia de ambos términos, el resultado final neto podría ser de aumento o disminución de volumen (hinchamiento o colapso). Este hecho puede coincidir a grandes rasgos con ciertos fenómenos apuntados en la literatura (Escario y Saez, 1973; Cox, 1978).

- ★ Se registran “colapsos adicionales” en la muestra a partir del primer colapso, en sucesivos ciclos de secado y humedecimiento.
- ★ Examinando la influencia del desviador en la respuesta de la muestra se ha encontrado que:
 - El colapso volumétrico (medido en términos de porosidad n) no parece estar afectado por el desviador, si bien las deformaciones vertical y horizontal son muy distintas al inundar muestras con varios ϕ_{mov} .
 - La succión contribuye inequívocamente a aumentar la resistencia (el ángulo de rozamiento). En el caso estudiado con una succión de 0.9 Kp/cm^2 la muestra resiste un ϕ_{mov} ligeramente superior a 30° . Con este desviador el *suelo* rompe si se inunda. El suelo saturado puede tener una resistencia algo superior a los 10° , en todo caso inferior a los 20° .
- Utilizando la misma concepción y organización del modelo, sin cambios apreciables en el mismo, se han realizado unos ensayos de carácter preliminar con *partículas compuestas* (“poliesféricas”). Es un modo sencillo de integrar en el modelo formas varias, distintas de la esférica. Se observa que contribuyen a aumentar la resistencia de la muestra. Era de esperar, puesto que la posibilidad de contactos con superficies cóncavas (según la figura 6.42), más la “inclusión” que representan estas partículas compuestas, han de tener un efecto de “encajonamiento” globalmente estabilizador.

7.2 LINEAS DE INVESTIGACION ABIERTAS

A continuación se detallan algunas de las líneas futuras que han quedado o han sido abiertas por el presente trabajo.

- Se debe completar la *calibración* del modelo numérico en relación a los parámetros que incluye, para acabar de confirmar o mejorar, si fuera el caso, el *modelo conceptual* subyacente. En particular se consideran importantes los siguientes puntos:
 - ★ Espesor del “film” adherido.
 - ★ Coeficiente de rozamiento.
 - ★ Rigidez en los contactos. Como se ha visto introduce diferencias notables de comportamiento (partículas “rígidas” o partículas “compresibles”), y no sólo ventajas numéricas, como pretenden algunos autores.
- Para reducir los requerimientos de tiempo real se puede progresar en dos campos:
 - ★ Mejora y simplificación “ad hoc” de los algoritmos de los programas del modelo. Por ejemplo:
 - La subrutina VOLMEN, encargada de encontrar de manera iterativa la geometría del menisco (θ) que corresponde a un volumen de agua determinado (V), se utiliza con gran frecuencia. Bajo ciertas aproximaciones se podría invertir la relación $V = f(\theta, otras)$, haciéndola explícita en V , es decir $\theta = g(V, otras)$. Esta simplificación redundaría en un apreciable ahorro de tiempo.
 - Caben otras simplificaciones más drásticas: En determinados ensayos “completos” en los cuales los flujos son sólo internos (succión constante) puede interesar exclusivamente el aspecto mecánico. En estos casos podría

anularse el seguimiento detallado de los flujos, sustituyendo el efecto de los meniscos por una fuerza capilar F_w media, típica para esa succión.

- ★ Futura utilización de otros ordenadores, de tipo *vectorial*, con mayor capacidad de cálculo, especialmente para procesos susceptibles de ser tratados en paralelo, como el del modelo presente, en la línea de lo comentado en el epígrafe 2.4.3.
- Implementación de variables que den una idea media, en “continuo equivalente” de lo que ocurre en una determinada zona del modelo. En este sentido se pueden calcular *tensores medios* de tensiones o deformaciones, en la línea de Cundall et al. (1982) y Strack y Cundall (1978), pero incorporando en las integrales volumétricas las fases líquida y gaseosa.
- Exploración con el modelo de más trayectorias en el espacio (p, q, s) (tensión media, tensión de corte, succión), para completar las ya realizadas. Por ejemplo se deberán llevar a cabo “ensayos” de colapso a menores y mayores cargas.
- Extensiones y mejoras del modelo:
 - ★ Introducción de *condiciones de contorno* distintas de las de tensión controlada: Contorno de deformación controlada y contorno con “servo-control” (deformación controlada para restituir un determinado nivel de tensión; Cundall et al., 1983). En la misma línea se pueden adoptar otras configuraciones de muestra: “recipientes” edométricos, de corte simple, etc. Parece clara la influencia que la configuración global de la muestra puede tener en su comportamiento, especialmente en el mecánico.
 - ★ Introducción de *otras fuerzas* en el contacto entre partículas. Se piensa en fuerzas de tipo adhesivo, o bien en puentes arcillosos entre los granos, o incluso en algún tipo de cementación.
 - ★ Consideración de partículas “hinchables” en todo su volumen (no sólo a través de los contactos, como en 6.3.2.2), para simular suelos expansivos.

* Adaptación a condiciones *no isotermas*, que pueden ser de especial relevancia en el transporte de solutos cerca de almacenes de residuos energéticos o en contaminación de acuíferos.

* *Grados de saturación mayores*, más allá del estado “menisco aislado”, para permitir una transición continua seco–no saturado–saturado. Se deberá pasar por un estado intermedio con poros “localmente inundados”. Las suposiciones que se tendrán que barajar no serán, sin embargo, tan “sencillas” como las del presente modelo. Se prevén dos etapas de desarrollo:

a) partículas fijas.

b) con movimiento de partículas.

En el estado completamente saturado, aprovechando el control geométrico integral de que disfruta el modelo (concretamente el volumen de los poros es conocido), se podría llegar a relacionar las variaciones del volumen de los poros con el incremento de presión intersticial, a través de la compresibilidad del agua (C_w). Así se podría estudiar cargas no drenadas y el flujo saturado. Si llega el caso, se anticipa la necesidad de usar incrementos de tiempo extraordinariamente bajos.

* *3D*. Aunque puede estar en el ánimo del lector la extensión del modelo a *tres dimensiones*, este paso se juzga prácticamente inabordable en un futuro próximo, por las dificultades que entrañaría el manejo y aun la misma definición de los poros. Tampoco resulta claramente aconsejable, por cuanto no con ello se conseguiría dejar de obtener resultados cualitativos. En efecto, el elevado número de hipótesis de todo tipo que soporta el modelo (forma de las partículas, contactos entre ellas, carga exterior, etc), comprometen el carácter cuantitativo de los resultados. Se consideran más prometedor encaminar los esfuerzos en otras de las líneas apuntadas.

Por encima de todos los resultados positivos que hasta aquí se han expresado a lo largo de esta tesis, el modelo (y el proceso de su concepción, diseño e implementación) ha constituido una herramienta de primer orden para el pensamiento y la reflexión (tanto a nivel personal como del Departamento). El desarrollo del modelo ha rondado muchas veces los límites de nuestra imaginación microscópica.

Todo ello constituye un beneficio adicional intangible, de difícil plasmación, pero en sumo grado valioso.

NOTACION

- A_{eq} Area del conducto entre dos poros.
- A_L Area "lateral" del menisco.
- A_{LAT} Superficie de la interfase líquido-gas.
- A_R Area recta del menisco.
- a Radio del círculo de contacto entre dos sólidos en contacto hertziano.
- C_{ad} Concentración de aire disuelto en un menisco (masa por unidad de volumen).
- C_H Constante de Henry.
- C_{vap} Concentración de vapor de agua en un poro.
- c' Cohesión.
- D Distancia entre la periferia de dos partículas.
- D_{ad} Coeficiente de difusión del aire disuelto en agua.
- D_N Acercamiento entre dos sólidos en contacto hertziano.
- D_T Desplazamiento tangencial entre dos sólidos en contacto hertziano.
- D_{TIP} Dimensión típica de un conducto del suelo para evaluar la presión de entrada de aire.
- D_{vap} Coeficiente de difusión del vapor de agua en el aire.
- E Módulo elástico.
- e índice de poros.
- F_w Fuerza capilar provocada por la existencia de los meniscos de agua.

- g Aceleración de la gravedad.
- h Altura de agua equivalente a cierta presión.
- h_A Dimensión de las asperezas en la superficie de una partícula.
- I Gradiente hidráulico.
- K_e Permeabilidad efectiva.
- K_N Coeficiente de deformación normal secante en el contacto hertziano.
- K'_N Coeficiente de deformación normal tangente en el contacto hertziano.
- K_T Coeficiente de deformación tangencial en el contacto hertziano.
- K_{vap} Constante cinética de condensación o evaporación de agua.
- l_{eq} Longitud equivalente del conducto entre 2 poros.
- l_c Camino recorrido por el flujo entre dos meniscos.
- l_T Ancho de la película sujeta a flujo.
- N Carga normal transmitida por el contacto.
- n Porosidad
- $p_{a,par}$ Presión parcial del aire "seco".
- pF Potencial F.
- $p_{v,eq}$ Presión de vapor en equilibrio.
- $p_w - p_a$ Diferencia de presión agua-aire.
- Q Caudal de agua.
- q Velocidad del agua en el suelo (tipo Darcy).
- R_1, R_2 Radios de las partículas esféricas.
- r_1, r_2 Radios de curvatura principales.
- R_{eq} Radio equivalente del conducto entre 2 poros.
- R_g Constante de un gas.

- R_u Constante universal de los gases.
- S_r Grado de saturación.
- s Succión total.
- s_m Succión matricial.
- s_o Succión osmótica.
- T Carga tangencial.
- T_a Temperatura absoluta.
- t Tiempo real desde la generación del modelo.
- t_i Tiempo real desde el inicio de la línea de ensayo.
- V Volumen del menisco.
- W Energía libre.
- α, γ Factores adimensionales para definir el menisco generalizado.
- β_H Constante cinética de disolución del aire en el agua.
- γ_s Peso específico de las partículas de suelo.
- γ_w Peso específico del agua.
- δ Espesor de la película de agua adherida a las partículas.
- ΔH_{vap} Calor de vaporización del agua a temperatura constante.
- $\Delta M_{vap,1}$ Masa de vapor de agua difundida entre dos poros.
- $\Delta M_{vap,2}$ Masa de agua (vapor) que se condensa o viceversa.
- $\Delta M_{ad,1}$ Masa de aire disuelto que circula por convección entre dos meniscos.
- $\Delta M_{ad,2}$ Masa de aire disuelto que circula por difusión molecular.
- ΔP_g Incremento de presión total de gas entre dos poros.
- $\Delta V_{eq,1atm}$ Volumen de aire fluido entre dos poros a una atmósfera.
- ΔV_w Agua fluida entre meniscos.

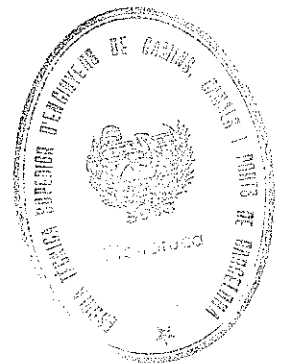
- η_a Viscosidad del aire.
- η_w Viscosidad del agua.
- θ Angulo de mojado del menisco sobre la partícula sólida.
- θ_c Angulo de contacto interfase aire-agua sobre la partícula sólida.
- μ Coeficiente de rozamiento en el contacto.
- ν Coeficiente de Poisson.
- ρ_w Densidad del agua.
- σ_w Pseudo tensión global equivalente provocada por la existencia de los meniscos de agua.
- $\sigma_{11,22,12}$ Tensión total exterior absoluta.
- σ' Tensión efectiva.
- σ_{ISO} Tensión global isotrópica.
- $\sigma_{m,ult}$ Tensión media de plastificación en un contacto entre partículas.
- σ_s Tensión superficial aire-agua.
- τ Esfuerzo ó tensión de corte.
- ϕ' Angulo de la envolvente de rotura (tensión exterior).
- ϕ_b Angulo de la envolvente de rotura (succión).
- ϕ_{mov} Angulo de rozamiento movilizado.
- ϕ_μ Angulo de rozamiento en el contacto.
- χ Coeficiente de la ecuación de tensiones efectivas de Bishop.
- χ_a Fracción molar del aire disuelto.
- ψ Succión expresada como altura de columna de agua equivalente, positiva.
- ψ_g Potencial gravitacional del agua en el suelo.
- ψ_m Potencial matricial del agua en el suelo.

ψ_o Potencial osmótico del agua en el suelo.

ψ_p Potencial debido a la presión de gas circundante.

ψ_t Potencial total del agua en el suelo.

ω Humedad (en peso).



REFERENCIAS

- Abdullah, A.R. bin, y Evans, D.J. (1986) "A weighted group explicit method for the diffusion equation". Comp. Meth. in Applied Mech. and Eng. Vol. 55. N.3. pp. 221-238.
- Airey, D.W., Budhu, M. y Wood D.M. (1985) "Some aspects of the behaviour of soils in simple shear". Capítulo 6 en "Developments in Soil Mechanics and Foundation Engineering. Vol. 2 (Stress-strain Modelling of Soils). Ed. P.K. Banerjee y R. Butterfield. 218 pag. Elsevier.
- Aitchison, G.D. (1956) "Some preliminary studies of unsaturated soils. a) The circumstances of unsaturation in soils with particular reference to the Australian environment". Proceed. 2nd Aus.- New Zeal. S.M. Conf., Christchurch. pp. 173-191.
- Aitchison, G.D. (1960) "Relationships of moisture stress and effective stress functions in unsaturated soils". Conf. Int. Soc. Soil Mech. Found. Eng. Butterworths, London. pp. 47-52
- Aitchison, G.D. (1965) "Moisture equilibria and moisture changes in soil beneath covered areas". Statement of the Review Panel, Engineering concepts of moisture Equilibria and moisture changes in soil. Butterworths, London, pp. 7-22.
- Aitchison, G.D. (1967) "The separate roles of site investigation, quantification of soil properties and selection of operational environment in the determination of foundation design on expansive soils". Proceed. 3rd Asian Reg.Conf. on S.M.F.E. Haifa. Vol.2. pp.72-77.
- Aitchison, G.D. y Donald, I.B. (1956) "Some preliminary studies of

- unsaturated soils. b) Effective stresses in unsaturated soils". Proceed. Second Australia- New Zealand. Soils mechanics conference. Christchurch. pp. 192-199.
- Aitchison, G.D., Russam, K. y Richards, B.G. (1966) "Engineering concepts of moisture equilibria and moisture changes in soils". RRL Reports N.38. Road Research Laboratory. 36 pag.
 - Allersma, H.G.B. (1982) "Photo-elastic stress analysis and strains in simple shear". IUTAM Conf. Deformation and Failure of Granular Materials. Delft. pp. 345-353.
 - Alonso, E. y Lloret, A. (1985) "Comportamiento de suelos parcialmente saturados". Revista de O.P., Mayo-Junio 1985. pp. 435-461.
 - Alonso, E.E., Gens, A. y Hight, D.W. (1987) "Special Problem Soils. General Report (Session 5)". IX E.C.S.M.F.E. Dublín. 60 pag.
 - Andrawes, K.Z. y Butterfield, R. (1973) "The measurement of planar displacements of sand grains". Géotechnique, vol.23, n.4, pp. 571-576.
 - Andrawes, K.Z., y McGown, A. (1982) "Stereo-photogrammetric measurements of the kinematics within plane strain model of reinforced embankments". Capítulo 7 en "Developments in Soil Mechanics and Found. Eng. Vol.1: Model Studies". Ed. P.K. Banerjee y R. Butterfield, Elsevier, 266 pag.
 - Arquié, G. (1973) "Théorie générale de l'influence de la teneur en eau sur les résultats du compactage". Bull. Liaison Lab. P. et Ch., N.64, pp.145-158.
 - Arthur, R.F. (1972) "New techniques to measure new parameters". Proceed. Roscoe Memorial Symposium "Stress-strain behaviour of soils"., Cambridge. pp. 340-346.
 - Arthur, R.F. y Dunstan, T. (1982) "Rupture layers in granular media". IUTAM Conf. Deformation and Failure of Granular Materials. Delft. pp. 453-459.
 - Bacon, D.J. y Liang, M.H. (1986) "Computer simulation of dislocation cores in h.c.p. metals". Philosophical Magazine A. Vol. 53. N. 2. pp. 163-179.

- Baig, M. (1987) "Las teorías gauge en un retículo". La Vanguardia Barcelona. 22 Noviembre 1987.
- Balcells, M., Giró, A. y Padró, J.A. (1986) "Correlations in the Ar-Kr liquid mixture". Physica 135A. pp. 414-425.
- Barbat, A.H. (1982) "Análisis sísmico de las estructuras". Public. N. ES009 de la E.T.S. Ingenieros de Caminos. U.P. Catalunya. 318 pag.
- Barbee, G.C. y Brown, K.W. (1986) "Comparison between suction and free-drainage soil solution samplers". Soil Science. Vol. 141. N.2. p.149.
- Barden, L. (1965) "Consolidation of compacted and unsaturated clays". Géotechnique. Vol.15. N.3. pp.267-286.
- Barden, L. (1972a) "Examples of clay structure and its influence on engineering behaviour" Proceed. Roscoe Memorial Symposium "Stress-strain behaviour of soils". Cambridge 1971. pp.195-205.
- Barden, L. (1972b) "The relation of soil structure to the engineering geology of clay soil". Journal of Eng. Geol. Vol.5. pp.85-102.
- Barden, L., Madedor, A.O. y Sides, G.R. (1969) "Volume change characteristics of unsaturated clays". Jour.of Soil Mech. and Found. Div. A.S.C.E. Vol. 95. SM1. pp. 33-51.
- Barden, L. y Sides, G.R. (1970) "Engineering behaviour and structure of compacted clay". Jnl. SMFD. Proceed. ASCE, 96 (SM4) pp.1171-1200.
- Barden, L., McGown, A. y Collins, K. (1973) "The collapse mechanism in partly saturates soil". Engineering Geology. pp. 49-60.
- Barkan, O.D. (1968) "Methodes de vibration dans la construction". Dunod. Paris. Citado en Arquié (1973).
- Barends, F.B.J. (1979) "The compressibility of an air-water mixture in a porous media". L.G.M. mededelingen. Part 20. N.2. pp. 49-66.
- Barends, F.B.J. (1987) "Modèles de simulation pour les problèmes d'eau souterraine". Delft Geotech. POB 69. pp. 8.1-8.20.
- Barrow, G. M. (1966) "Physical chemistry". McGraw Hill, New York. 2da.

ed. 843 pag.

- **Barton, N. (1974)** "Rock slope performance as revealed by a physical joint model". Proceed. 3rd ISRM Congress. Denver. Tomo II-B. pp. 765-773.
- **Barton, N.R. (1986)** "Deformation phenomena in jointed rock". Géotechnique, v.36, n.2, pp.147-167.
- **Bear, J. (1972)** "Dynamics of fluids in porous media". American Elsevier, New York. 764 pag.
- **Billam J. (1972)** "Some aspects of the behaviour of granular materials at high pressures". Proceed. Roscoe Memorial Symposium "Stress-strain behaviour of soils". Cambridge 1971. pp.69-80.
- **Bishop, A.W. (1959)** "The principle of effective stress". Tecknisk Ukeblad.N.39. pp.1-5. Citado
- **Bishop, A.W. y Blight, G.E. (1963)** "Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils". Géotechnique. Vol. 13. N.3. pp. 177-198.
- **Bishop, A.W., Kumapley, N.K., y El-Ruwayih, A. (1975)** "The influence of pore-water tension on the strength of clay. Proc. Roy. Soc. 278A. pp. 511-554
- **Black, D.K. y Lee, K.L. (1973)** "Saturating Laboratory Samples by Back Pressure". Jnl.Soil Mech.and Found. Div. pp. 75-93.
- **Blight, G.E. (1965)** "A study of effective stresses for volume change." Moisture equilibria and moisture changes in soils beneath covered areas. Butterworth. Australia. pp. 259-269.
- **Blight, G.E. (1967)** "Effective Stress evaluation for unsaturated soils". Jnl. S.M.F.D., A.S.C.E., Vol.93, No. SM2, pp.125-148.
- **Blight, G.E. (1971)** "Flow of air trough soils". Jnl. S.M.F.D., A.S.C.E., Vol.97, No. SM4, pp.607-624.
- **Blight, G.E. (1983)** "Aspects of the capillary model for unsaturated soils". Proceed. 7th Asian Conf. S.M.F.E. Haifa. 1: pp. 3-7.

-
- Blümel, W. y Tamminga, P.G. (1987) "Water permeability of dredged mud". IX E.C.S.M.F.E. Dublín. Vol.2. pp.545-548.
 - Bowden, F.P. y Tabor, D. (1964, 1986) "The friction and Lubrication of solids". Oxford University Press, London. Reedición de 6.1986. 374 pag.
 - Brull, A. (1980) "Caracteristiques mécaniques des sols de fondation de chaussées en fonction de leur état d'humidité et de compacité". Int. Conf. on Compaction. Paris. Vol.1, pp.113-118.
 - Brzakala, W. (1987) "A stochastic model of stress propagation in a discrete medium". Proceed. ICASP5. 5th. Int. Conf. Applic. of Statistics and Probab. in Soil and Struct. Engng. Vancouver. Canadá. pp. 1097-1104.
 - Burland, J.B. (1961) "The concept of effective stress in partly saturated soils". M. Sc. Dissertation. Univ. Witwatersrand. South Africa. Citado.
 - Burland, J.B. (1965) "Some aspects of the mechanical behaviour of partly saturated soils". Symp. on moisture Equilibria and moisture changes beneath covered areas. Ed. Aitchison. Butterworths. pp. 270-278.
 - Butterfield, R., Harkness, R.M., y Andrawes, K.Z. (1970) "A stereophotogrammetric method for measuring displacement fields". Géotechnique, vol.20, n.3, pp. 308-314.
 - Butterfield, R. y Andrawes, K.Z. (1971) "The visualization of planar displacement fields". Proceed. Roscoe Memorial Symposium "Stress-strain behaviour of soils". Cambridge. pp. 467-475.
 - Calladine, C.R. (1972) "Discussion". Proceed. Roscoe Memorial Symposium "Stress-strain behaviour of soils". Cambridge. pp. 107-108.
 - Campbell, C.S. y Brennen, C.E. (1982) "Computer simulation of chute flows of granular materials". IUTAM Conf. on Deformation and Failure of Granular Materials. Delft. pp.515-521.
 - Campbell, C.S. y Brennen, C.E. (1983) "Computer simulation of shear flows of granular material". En "Mechanics of Granular Materials" Ed. Jenkins y Satake. Elsevier (Proceed. Seminar Ithaca, New York, 1982). pp. 313-326.
 - Cañizal, J. y Sagaseta, C. (1988) "Numerical analysis of discontinuous

- block systems" Proc. 6th. Int. Conf. Num. Meth. Geomech. Innsbruck. Vol. 2, pp. 895-900.
- Carmo, M.P. Do (1976) "Differential geometry of curves and surfaces". Prentice Hall. 503 pag.
 - Carol, I., Alonso, E. y Muchart, A. (1982) "Modelos isoparamétricos de juntas en macizos rocosos. Aplicaciones". Proc. 1er Simp. Aplic. del M.E.F. en Ingeniería. Barcelona. Ed. Oñate, Alonso, Casteleiro.
 - Chambon, R. y Desrues, J. (1985) "Comparison of frictional material models with respect to shear band initiation". Géotechnique. Vol. 35. N.2. pp. 127-143.
 - Clemence, S.P. y Finbarr, A.O. (1981) "Design considerations for collapsible soils". Jnl. Geotechnical Eng. Division. pp. 305.317.
 - Clifford, J. (1975) "Properties of water in capillaries and thin films". Capítulo 2. pp. 75-132 en "Water, a comprehensive treatise. Volume 5: Water in disperse systems". Ed. F. Franks, 1975, Plenum Press. New York, 366 pag.
 - Collins, R.E. (1961) "Flow of fluids through porous materials". Reinhold, New York. Citado en Bear (1972).
 - Collins, K. (1984) "Characterisation of expansive soil microfabric". Proc. 5th Int. Conf. Expansive Soils. Adelaida. pp.37-41.
 - Comité (1985) "Liquefaction of soils during earthquakes". Committee on earthquake Engineering National Academy press. Washington. 240 pag.
 - Cox, D.W. (1978) "Volume change of compacted clay fill. Clay Fills. ICE, Londres, pp. 79-86.
 - Cronney, D., Coleman, J.D. y Black, W.P.M. (1958) "Studies of the movement and distribution of water in soil in relation to highway design and performance". Highway Research Board. Special Report 40. Washington D.C. pp. 226-252.
 - Crestana, S., Mascarenhas, S. y Pozzi-Mucelli, R.S. (1985) "Static and dynamic three-dimensional studies of water in soil using computed tomographic scanning". Soil Science, vol.140, n.5, pp. 326-332.

-
- Cundall, P.A. (1971) "A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems". Proceed. Symp. Int. Soc. Rock Mech. Nancy II. art.8. 11 pag.
 - Cundall, P.A. (1976) "Computer interactive graphics and the Distinct Element Method". En "Rock Engineering for foundations and slopes". Confer. Boulder Colorado. Publ. A.S.C.E. Tomo II, pp. 193-199
 - Cundall, P.A. (1978) "BALL - A program to model Granular media using the Distinct Element Method". Dames and Moore. Londres. Tech. Note-LN-13. 74 pag. Report to the N.S.F. Univ. Minnesota. 97 pag.
 - Cundall, P.A., Voegele, M. y Fairhurst, Ch. (1975) "Computerized design of rock slopes using interactive graphics for the input and output of geometrical data". Proc. 16th. U.S. Symp. on Rock Mech., Minnesota. pp. 5-14.
 - Cundall P.A. y Strack O.D.L. (1979 a) "A discrete numerical model for granular assemblies". Géotechnique 29, N.1. pp.47-65.
 - Cundall P.A. y Strack O.D.L. (1979 b) "The development of constitutive laws for soil using the Distinct Element Method". I.C.O.N.M.I.G. Aachen. 2-6 April. pp. 289-298.
 - Cundall, P.A. y Strack, O.D.L. (1979 c) "The distinct element method as a tool for research in granular media. Part II". Report to the N.S.F. Univ. Minnesota. 175 pag. 1 anejo
 - Cundall P.A., Drescher A. y Strack O.D.L. (1982) "Numerical experiments on granular assemblies; measurements and observations". IUTAM Conf.on Deform. and Failure of Granular Materials. Delft. pp.355-370.
 - Cundall P.A. y Strack O.D.L. (1983) "Modeling of microscopic mechanisms in granular material". En "Mechanics of Granular Materials" Ed. Jenkins y Satake. Elsevier (Proceed. Seminar Ithaca, New York, 1982). pp. 137-149.
 - Custodio, E., y Llamas M.R. (1983) "Hidrología Subterránea". Ed. Omega. Barcelona. 2 tomos. 2350 pag.

- Dantu, P. (1957) "Contribution à l'étude mécanique et géométrique del milieux pulvérulents" IV Cong. Int. Mec. Suelo. Londres. vol.1, pp 144-146.
- Davidson, J.L. Mortensen, R.A., y Barreiro, D. (1981) "Deformations in sand around a cone penetrometer tip". Proc. 10th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Estocolmo, pp. 467-470.
- De Josselin de Jong, G. (1977) "Mathematical elaboration of the double sliding free rotating model". Archives of Mechanics, vol.29, n.4, pp. 561-591. Citado.
- De Josselin de Jong, G. (1982) "Behaviour of an elasto-plastic double-sliding free rotating material if subjected to an idel simple shear test". IUTAM Conf.Deformation and Failure of Granular Materials. Delft. pp. 555-562.
- De Josselin de Jong, G. y Verruijt, A.(1969) "Etude photo-elastique d'un empilement de disques". Cahiers Grup Franc. de Rheol. N.1, vol.2, pp. 73-86
- Departamento de Métodos Matemáticos (1985) "Curvas y superficies". Publ. E.T.S.I.C.C. y P. Barcelona. 54 pag.
- Desai, C.S., Krempl, E., Kioussis, P.D., y Kundu, T. (edit.)(1987) "Constitutive Laws for Engineering Materials. Theory and Applications". Proc. 2nd. Int. Conf. Tucson. 2 Vol. 1490 pag.
- Dybbs, A., y Edwars, R.V. (1984) "A new look at porous media fluid mechanics: Darcy to turbulent". Contribución en "Fundamentals of transport Phenomena in porous media". Ed. J.Bear y M.Y. Corapcioglu. Martinus Nijhoff Publis. pp. 199-256.
- Dietrich, T.H. (1982) "Incremental parabolic hardening of psammic material; Application to laterally loaded piles in sand". IUTAM Conf. Deformation and Failure of Granular Materials. Delft. pp. 13-22.
- Donald, I.B. (1956) "Some preliminary studies of unsaturated soils. c) Shear strength measurements in unsaturated non-cohesive soils with negative pore pressures". Proceed. 2nd. Aus. New Zeal. Conf. on S.M.F.E. Christchurch. pp. 200-207.

- Dorsey, N.E. (1968) "Properties of ordinary water substance". Amer. Chem. Soc. Monograph Series, nro. 81. 2da. ed. 673 pag.
- Drucker, D.C. (1953) "Limit analysis of two and three dimensional soil mechanics problems". Jnl. Mech. Phys. Solids, vol.1., p. 217.
- Dudley, J.H. (1970) "Review of collapsing soils". Jnl. of Soil Mech. and Found. Div. A.S.C.E. Vol. 96. SM3. pp. 925-947.
- Edil, T.B. y Motan, E.S. (1984) "Laboratory evaluation of soil suction components". Geotech. Testing Jnl. 7 (4). pp. 173-181.
- Egger, P. y Gindroz, C. (1979) "Anchored tunnels at shallow depth". Proceed. 4th Cong. of ISRM. Montreux. Vol.2. pp. 121-136.
- El-Shoby, M.A. (1969) "Elastic behaviour of sand". Jnl. Soil Mech. A.S.C.E. vol.95, Nro.SM6, pp. 1393-1409.
- Escario, V. (1980) "Suction controlled penetration and shear tests". Proceed. 4th I.C.E.S. Denver. Vol. 2. pp. 781-797.
- Escario, V. y Sáez, J. (1973) "Measurement of the properties of swelling and collapsing soils under controlled suction". Proceed. 3rd I.C.E.S. Haifa. pp. 195-200.
- Escario, V. y Sáez, J. (1986) "The shear strength of partly saturated soils". Géotechnique,. Vol.36. N.3. pp.453-456.
- Escario, V. y Sáez, J. (1987a) "Shear strength of soils under high suction values". Proceed. 9th. E.C.S.M.F.E. Dublín. 3 pag.
- Escario, V. y Sáez, J. (1987b) "Shear strength of partly saturated soils versus suction". Proceed. 6th. Int. Conf. on Expansive Soils. Nueva Delhi. 3 pag.
- Estradé (1988) "Comunicación personal"
- Evans, D. D. (1983) "Unsaturated flow and transport through fractured rock. Final Report - Phase I". NUREG / CR - 3206. University of Arizona. 231 pag.
- Falcetta J.L. (1985) "Un nouveau modèle de calcul de trajectoires de blocs

- rocheux". Revue Francaise de Géotechnique. N.30. pp. 11-17.
- **Farouki, O.T. (1986)** "Thermal properties of soils". Series on Rock and Soil Mechanics. Vol.11. Trans. Tech. Publ. 136 pag.
 - **Fedenko, A.S. (1981)**. "Problemas de geometría diferencial". Ed. Mir. 279 pag.
 - **Fichman, M., Pnueli, D. (1985)** "Sufficient conditions for small particles to hold together because of adhesion forces". Journal of Applied Mechanics. Vol.52. pp. 105-108.
 - **Finney, J.L. (1983)** "Structure and properties of granular materials". Contribución en "Advances in the mechanics and the flow of granular materials". Ed. M. Shahinpoor. Trans Tech Publ. Vol. I, pp. 19-39.
 - **Fisher, R.A. (1926)** "On the capillary forces in an ideal soil". Jour. Agr. Sci., 16, 492-505. Citado en Aitchison y Donald (1956).
 - **Fox, G.C. y Messina, P.C. (1987)** "Advanced Computer Architectures" Scientific American, Octubre 1987, pp. 44-52.
 - **Fredlund, D.G. (1976)** "Density and compressibility characteristics of an air-water mixtures". Can. Geot. Jour. Vol.13. N.4. pp. 386-396.
 - **Fredlund, D.G. (1979)** "Appropriate concepts and technology for unsaturated soils". Can. Geotech. Jnl. 16. pp. 121-139.
 - **Fredlund, D.G. y Morgenstern, N.R. (1976)** "Constitutive relations for volume change in unsaturated soils". Can. Geot. Jnl. Vol. 13. N.3. pp. 261-276.
 - **Fredlund, D.G. y Morgenstern, N.R. (1977)** "Stress state variables for unsaturated soils". J. of Geot. Div. A.S.C.E. Vol. 103. GT5. pp. 447-466.
 - **Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R. y Widger, R.S. (1978)** "The shear strength of unsaturated soils". Can Geotech. Jnl.15 (3). pp. 313-321.
 - **Freitag, D.R., Green, A.J., y Melzer, K.J. (1970)** "Performance evaluation of Wheels for Lunar vehicles". U.S. Army Engineer Station, Vicksburg. Tech. Report M-70-2.

- Gan, J.K.M. (1986) "Direct Shear Strength Testing of Unsaturated Soils". M.Sc. Thesis. University of Saskatchewan, Canada. Citado en Fredlund et al. (1987).
- Gardner, W. y Chatelain, J. (1947) "Thermodynamic potential and soil moisture". Soil Sci. Soc. Am. Proc., vol.11 pp. 100-102. Citado en Kirham y Powers (1972).
- Gardner, W.R. (1960) "Soil suction and water movement". Conference "Pore pressure and suction in soils". I.S.S.M.F.E. Ed. Butterworths. London, 1961. pp.137-140.
- Garcia-Bengochea, I. y Lovell.C.W. (1981) "Correlative measurements of pore size distribution permeability in soils". Permeability and Groundwater Contaminant Transport, A.S.T.M., S.T.P. 746, pp. 137-150.
- Gelernter, D. (1987) "Programming for Advanced Computing" Scientific American, Octubre 1987, pp. 64-71.
- George, T.L., Kennedy, T.C. y Peddicord, K.L. (1985) "An elastic stress-strain relation for sphere arrays undergoing initial stage sintering". Journal of applied mechanics. Vol. 52.pp.98-99.
- Gens, A. y Potts, D.M. (1987) "The use of critical state models in numerical analysis of geotechnical problems: a review". Proceed. Int. Conf. Computational Plasticity. Models Software and Applications,. Barcelona.
- Gerrard, Ch. (1985) "Formulations for the mechanical properties of rock joints". Proceed. Int. Symposium on Fundamentals of Rock Joints. Björkliden. pp. 405-422.
- Gili, J.A. (1986) "Discusión de algunos aspectos relevantes en el planteamiento del flujo en suelo no saturado, a escala de poro, y a niveles bajos de humedad, mediante un modelo numérico, discontinuo y heterogeneo". Trabajo para curso de Hidrología subterránea. No publicado.
- Giró, A., González, J.M., Padró, J.A., Torra, V. (1980) "Métodos numéricos en mecánica estadística: dinámica molecular". Quaderns d'enginyeria vol.2. pp. 359-384.

- Giró, A., Padró, J.A. (1983) "Dinámica molecular". Ibérica, n.249, 7 pag.
- Giró, A., Valls, J., Padró, J.A. y Wagensberg, J. (1986) "Monte Carlo simulation program for ecosystems". CABIOS Vol.2 N.4. pp. 291-296.
- Goodman, R.E. (1975) "Methods of geological engineering in discontinuous rocks". West Publishing Company. St. Paul.
- Goodman, R.E., Taylor, R.L. y Brekke, T.L. (1968) "A model for the mechanics of jointed rock". Jnl. Soil Mech. Found. Div. ASCE. Vol. 94. N. SM3 pp. 637-650.
- Grismer, M.E., McWhorter, D.B. y Klute, A. (1986 a) "Determination of diffusivity and hydraulic conductivity in soils at low water contents from nondestructive transient flow observations". Soil Science, vol.141, n.2 p.10-19.
- Grismer, M.E., McWhorter, D.B., y Klute, A. (1986 b) "Monitoring water and salt movement in soils at low solution contents". Soil Science, vol.141, n.2, p.163-171.
- Gubbins, K.E. (1985) "Theory and computer simulation studies of liquid mixtures". Fluid Phase Equilibria, 20. pp. 1-25.
- Gulhati, S.K. y Satija, B.S. (1981) "Shear strength of partially saturated soils". Proceed. 10th. I.C.S.M.F.E. Estocolmo. Vol. 1. pp. 609-612.
- Haines, W.B. (1925) "A note on the cohesion developed by capillary forces in an ideal soil" Jour. Agr. Sci., 15, 529-535. Citado en Aitchison y Donald (1956).
- Hansen, J.P. y McDonald, I.R. (1986) "Theory of simple liquids". Academic Press. London. pp. 45-68.
- Hansen, B., Denver, H. y Petersen K. (1987) "The influence of groundwater on bearing capacity of footings". IX E.C.S.M. F.E. Dublin. Vol. 2. pp.685-690.
- Hashiguchi, K. (1983) "Constitutive equations of granular materials". En "Mechanics of Granular Materials" Ed. Jenkins y Satake. Elsevier (Proceed. Seminar Ithaca, New York, 1982). pp 127-136.
- Hashiguchi, K. (1985) "Macrometric approaches -static- intrinsically time-

- independent". En "Constitutive laws of soils", report of I.S.S.M.F.E. Subcom. on constitutive laws of soils. XI I.C.S.M.F.E. San Francisco. pp 25-65.
- **Hawkins, G.W. (1983)** "Simulation of granular flow". En "Mechanics of Granular Materials" Ed. Jenkins y Satake. Elsevier (Proceed. Seminar Ithaca, New York, 1982). pp. 305-312.
 - **Hilf, J.W. (1956)** "An investigation of pore-water pressure in compacted cohesive soils". Ph D. Thesis. Denver. Colorado.
 - **Hillis, D. (1987)** "La máquina de conexión". Investigación y Ciencia. pp. 72-80.
 - **Hocking, G., Mustoe, G. y Williams J.R. (1987)** "Dynamic analysis for generalized three dimensional contact and fracturing of multiple bodies". Proceed. Int. Conf. Num. Meth. in Engineering. Theory and Appli. NUMETA'87. Swansea. Ed. Pande y Middleton. 8 pag.
 - **Hoeg, K. (1980)** "Future needs and directions in geotechnical engineering research and practice". Lecture at the Int. Symp. "Past, present and future of Geotechnical Engineering". M.I.T. Sept., 1981. 5 pag.
 - **Holtz, W.G. y Hilf, J.W. (1961)** "Settlement of soil foundations due to saturation". Proc. 5th. ICSMFE. Paris. Vol.1. pp. 673-679.
 - **Horn, H.M. y Deere, D.U. (1962)** "Frictional characteristics of minerals". Géotechnique, Vol. XII, N.4, pp.319-334.
 - **Horne, M.R. (1969)** "The behaviour of an assembly of rotund rigid cohesionless particles (III)". Proc. Roy. Soc. A. (310), pp. 21-34
 - **Hryciw, R.D. y Dowding, C.H. (1987)** "Cone penetration of partially saturated sands". Geotechnical Testing Jnl. Vol.10. N.3. pp.135-141.
 - **Hut, P. y Sussman, G.J. (1987)** "Advanced Computing for Science" Scientific American, Octubre 1987, pp. 136-144.
 - **Ishida, T., Chigira, M. y Hibino S. (1987)** "Application of the Distinct Element for Analysis of Toppling Observed on a Fissured Rock Slope". Rock Mech. and Rock Eng. N.20. pp. 277-283.

- **Jennings, J.E. (1967)** "Discussion on aeolian soils". Session 1. Proceed. 3rd. Asian Reg. Conf. on SMFE. Vol. 2. pp. 102-104.
- **Jennings, J.E. y Burland, J.B. (1962)** "Limitations to the use of effective stresses in partly saturated soils". Géotechnique. Vol. 12. N.2. pp. 125-144.
- **Jiménez Salas, J.A. (1958)** "Compacted Clay: Engineering Behaviour Discussion". Jour. Soil Mech. Found. Div., A.S.C.E. Vol.84, nro.SM5, pp. 746-753.
- **Jiménez Salas, J.A. (1988)** "Conferencia: Pasado y futuro de la Geotecnia". E.T.S.I.C.C.P. Barcelona.
- **Jiménez Salas, J.A., Justo J.L. Romana, M. y Faraco, C. (1973)** "The collapse of gypseus silts and clays of low plasticity in arid and semiarid climates". Proceed. 8th I.C.S.M.F.E. Moscú. pp. 161-190.
- **Jiménez Salas, J.A. y de Justo Alpañés J.L. (1975)** "Geotecnia y Cimientos". Tomo I. Ed. Rueda. Madrid. 2da. Ed. 466 pag.
- **Jiménez Salas, J.A., y Uriel, A. (1983)** "Sobre la mejora de los terrenos con relación al riesgo de licuefacción". Bol. Soc. Esp. Mec. Suelo y Cim. nro. 62, pp. 3-16.
- **Josa, A. (1988)** "Un modelo elastoplástico para suelos no saturados". Tesis Doctoral. E.T.S.I.C.C.P.Barcelona.
- **Kamon, M. (1985)** "Microstructure of cohesive soil". Contrib. a "Constitutive Laws of Soils". Report of ISSMFE Subcom. on constitutive laws of soils. XI I.C.S.M.F.E. San Francisco. pp. 1-4
- **Kany, M. y Herrmann, R. (1987)** "Water motion in soils based on a diffusion theory of mixtures (Part 2)" IX E.C.S.M.F.E. Dublín. Vol. 2. pp.853-855.
- **Karube, D. (1983 a)** "Effect of suction on soil behaviour". Proc. 7th Assian reg. conf. S.M.F.E. Haifa. Vol. 1 pp. 30-35
- **Karube, D. (1983 b)** "Swelling of unsaturates soils". Proc. 7th Assian Reg. Conf. S.M.F.E. Haifa. Contrib. Vol 1 pp. 125-127

-
- **Kirkham, D. y Powers, W.L. (1972)** "Advanced soil physics". J. Wiley, New York. 534 pag.
 - **Kitamura, R. (1981a)** "A mechanical model of particulate material based on stochastic process". Soils and Foundations. Vol.21. N.2 pp. 63-72.
 - **Kitamura, R. (1981b)** "Analysis of deformation mechanism of particulate material at particle scale". Soils and Foundations. Vol.21. N.2. pp. 85-98.
 - **Kitamura, R. (1983)** "Application of Markov process to mechanics of soil and granular material". Contribución en "Advances in the mechanics and the flow of granular materials". Ed. M. Shahinpoor. Trans Tech Publ. Vol. I, pp. 285-296.
 - **Kitamura, R. (1985)** "Stochastic process models and discrete numerical models for granular materials". Contrib. a "Constitutive Laws of Soils". Report of ISSMFE Subcom. on constitutive laws of soils. XI I.C.S.M.F.E. San Francisco. pp. 19-21.
 - **Knight, K. (1963)** "The origin and occurrence of collapsing soils.". Proceed. 3rd. Reg. Conf. for Africa on SMFE. Vol.1 pp. 127-130.
 - **Ko, H.Y., y Scott, R.F. (1967)** "Deformation of sand in hydrostatic compression. Proc. A.S.C.E., vol.93, n.SM3, pp. 137-156.
 - **Konishi, J., Oda, M. y Nemat-Nasser, S. (1982)** "Inherent anisotropy and shear strength of assembly of oval cross-sectional rods". IUTAM Conf. on Deformation and Failure of Granular Materials. Delft. pp. 403-412.
 - **Konishi, J., Oda, M. y Nemat-Nasser, S. (1983)** "Induced anisotropy in assemblies of oval cross-sectional rods in biaxial compression". En "Mechanics of Granular Materials" Ed. Jenkins y Satake. Elsevier (Proceed. Seminar Ithaca, New York, 1982). pp 31-39
 - **Kovacs, G. (1981)** "Seepage hydraulics". Elsevier, Amsterdam, Develop. in water science, 10. 730 pag.
 - **Krahn, J y Fredlund, D.G. (1972)** "On total, matric and osmotic suction.". Soil Science, 114 (5) pp. 339-348.
 - **Krawietz, A. (1982)** "Some features of the gross behaviour of granular

- media derived from micromechanics". IUTAM Conf. Deformation and Failure of Granular Materials. Delft. pp. 29-36.
- Kurtovich, M. (1985) "Danger: Natural system modeled by computer" Civil Engineering. ASCE. Agosto 1985, pp. 44-45.
 - Lambe, T.W. (1958a) "Compacted Clay: Structure". Journal Soil Mechanics and Found. Division. Transactions. Vol. 125. Part I. pp. 682-717.
 - Lambe, T.W. (1958b) "Compacted Clay: Engineering behavior". Journal Soil Mechanics and Found. Division. Transactions. Vol. 125. Part I. pp. 718-756.
 - Lambe, T.W. (1960a) "A mechanistic picture of shear strength in clay". Research Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils. Boulder. Colorado. pp. 555-580.
 - Lambe, T.W. y Whitman, R.V. (1979) "Soil Mechanics. S.I. Version. Wiley. New York. 553 pag.
 - Lee, K.L. y Black, D.K. (1972) "Time to dissolve air bubble in drain line". Jnl. Soil Mech. and Found. Div. Vol.98. N. SM2. pp. 181-194.
 - Lemos, J.V. y Brady B.H.G. (1983) "Stress distribution in a jointed and fractured medium". 24th U.S. Symposium on Rock Mechanics. Texas. pp. 53-59.
 - Lemos, J.V., Hart, R.D. y Cundall P.A. (1985) "A generalized distinct element program for modelling jointed rock mass. A keynote lecture". Proc. Int. Symposium on Fundamentals of Rock Joints. Björkliden. pp. 335-343.
 - Litwiniszyn, J. (1963) "The model of arandom walk of particles adapted to researches on problems of mechanics of loose media". Bull. Acad. Pol. Sci. Tech., vol.XI, n.10, pp. 593-602. Citado en Kitamura (1985).
 - Luong, M.P. (1982) "Mechanical aspects and thermal effects of cohesionless soils under cyclic and transient loading". IUTAM Conf. on Deformation and Failure of Granular Materials. Delft. pp. 239-246.
 - Lloret, A. (1982) "Comportamiento deformacional del suelo no saturado

- bajo condiciones drenadas y no drenadas". Tesis Doctoral. E.T.S.I.C.C.C.P. Barcelona.
- Lloret , A., Gens, A., Batlle, F. y Alonso E.E. (1987) "Flow and deformation analysis of partially saturated soils". IX E.C.S.M.F.E. Dublín. Vol.2, 4 pag.
 - Marqués, F. (1984) "Comunicación personal"
 - Marsal, R.J. (1973) "Mechanical properties of rockfill". En "Embankment-Dam Engineering. Casagrande Volume" Ed. R.C. Hirschfeld y S.J. Poulos. J. Wiley, New York. pp 109-200.
 - Marsily, G. de (1984) "Spatial variability of properties in porous media: A stochastic approach". Contribución en "Fundamentals of transport Phenomena in porous media". Ed. J.Bear y M.Y. Corapcioglu. Martinus Nijhoff Publis. pp. 719-770.
 - Martín Viñas, J. (1973) "Mecanismo físico-químico del fenómeno que origina el colapso en los materiales pétreos". Bol. Soc. Esp. de M. S. y C., Nro.6, pp.71-79.
 - Martino, R. Di (1961) "The pellicular water theory in relation to soil cohesion and other phenomena". Proceed. 5th. I.C.S.M.F.E. Paris. Vol.1. pag. 235-241.
 - Maswoswe, J. (1985) "Stress paths for a compacted soil during collapse due to wetting". Ph. D. Thesis. Imperial College. Londres.
 - Matsuoka, H., Tokue, T., Nakai, T. (1985) "Microscopic stress-strain models for granular materials". Contrib. a "Constitutive Laws of Soils". Report of ISSMFE Subcom. on constitutive laws of soils. XI I.C.S.M.F.E. San Francisco. pp. 12-18.
 - Matyas, E.L. y Radhakrishna, H.S. (1968) "Volume change characteristics of partially saturated soils". Géotechnique. Vol. 18. N.4. pp. 432-448.
 - McGrown, A. y Collins, K. (1975) "The microfabric of some expansive and collapsing soils". Proceed. 5th Pan. Am. Conf. SMFE. 1. pp. 323-332.

- Means, R.E. y Parcher, J.V. (1963) "Physical properties of soil". Ch. E. Merrill Publ. Columbus. 464 pag.
- Mendoza, M. y Náder, F. (1979) "Influence of aging and drying on the unconfined strength of compacted soils". 6th Panamerican Conference. Lima. pp.411-419.
- Mindlin R.D. y Deresiewicz, H. (1953) "Elastic spheres in contact under varying oblique forces". Jnl. Appl. Mech. N.20.
- Miquel Canet, J. (1987) "Comunicación personal".
- Mitchell, J.K. (1976) "Fundamentals of Soil Behaviour". Series in Soil Engineering. Wiley. 320 pag.
- Mogami, T. (1965) "A statistical approach to the mechanics of granular materials". Soils and Foundations, vol.5, n.2, pp. 26-36. Citado en Kitamura (1985).
- Molenkamp, F. (1984) "Decomposition of velocity gradient into interparticle slip and rolling". Soils and Foundations. Vol. 24. N.1. pp. 17-33.
- Moore, H. E. (1967) "The engineering properties of the silty soils, Snake River Canyon, State of Washington". U.S.Army Corp of Engin. 31 pag. Citado en Dudley (1970).
- Moore, P.J. y Millar, D.V. (1971) "The collapse of sands upon saturation". Proceed. 1st. Australia-New Zealand Conference on Geomechanics. Melbourne. Vol. 1. pp. 54-60.
- Mroz, Z. y Zubelewicz, A. (1982) "On initiation of flow of granular materials from hoppers". IUTAM Conf. on Deformation and Failure of Granular Materials. Delft. pp. 569-577.
- Müller, L. (1970) "Selection, Compilation and Assesment of Geological Data for the Slope Problem". Proceed. Symposium on Planning of Open Pit Mines. Johannesburg. pp. 153-170.
- Murayama, S. (1966) "A theoretical consideration on the behaviour of sand". Proc. IUTAM symp. on rheology and Soil Mechanics, pp. 146-159.

- Citado en Kitamura (1985).
- Mustoe, G.G.W., Williams, J.R., Hocking G. y Worgan K. (1987) "Penetration and fracturing of brittle plates under dynamic impact". Proceed. Int. Conf. Num. Meth. in Engineering. Theory and Appl. NUMETA'87. Swansea 6-10. Ed. Pande y Middleton. 9 pag.
 - Nakano, M., Amemiya, Y. y Fujii, K. (1986) "Saturated and unsaturated hydraulic conductivity of swelling clays". Soil Science. Vol. 141. N.1. 7 pag.
 - Nagaraj, T.S. y Srinivasa Murthy B.R. (1985) "Compressibility of partly saturated soils". Jnl. Geotech. Engng. Vol.111. N.7. pp.937-942.
 - Nemat-Nasser, S. (1980) "On behavior of granular materials in simple shear". Soils and Foundations, vol.20, n.3, pp. 59-73.
 - Nemat-Nasser, S. (1982) "Fabric and its influence on mechanical behaviour of granular materials". IUTAM Conf. Deformation and Failure of Granular Materials. Delft. pp.37-42.
 - Nemat-Nasser, S., y Shokoh, A. (1979) "A unified approach to densification and liquefaction of cohesionless sand in cyclic shearing". Canadian Geotechnical Journal. Vol. 16, nro.4, pp. 659-678.
 - Nemat-Nasser, S. y Takahashi, K. (1984) "Liquefaction and fabric of sand". Jnl. Geotech. Engin. ASCE, vol.110, n.9, pp. 1291-1306.
 - Newland, P.L., y Allely, B.H. (1957) "Volume changes in drained triaxial tests on granular materials". Géotechnique, vol. 7, n.1, pp. 17-34.
 - Norman, L.D., Maust, E.E. y Skolnick, L.P. (1971) "Computer simulation of particulate systems". Bulletin 658. U.S. Dept. of Interior. Bureau of Mines. 55 pag.
 - Oda, M. (1972) "The mechanism of fabric changes during compressional deformation of sand". Soils and Foundations, vol.12, n.2, pp. 1-18.
 - Oda, M. (1985) "Fabric concept of granular materials". Contrib. a "Constitutive Laws of Soils". Report of ISSMFE Subcom. on constitutive laws of soils. XI I.C.S.M.F.E. San Francisco. pp. 10-12.

- Oda, M. y Konishi, J. (1974) "Microscopic deformation mechanism of granular material in simple shear". Soils and Foundations. Vol. 14. N.4. pp.25-38.
- Oda, M., Konishi, J. y Nemat-Nasser, S. (1980) "Some experimentally based fundamental results on the mechanical behaviour of granular materials". Géotechnique 30. N.4. pp. 479-495.
- Ohnishi, Y., Mimuro, T., Takewaki, N. y Yoshida, J. (1985) "Verification of input parameters for distinct element analysis of jointed rock mass". Proceed. Int. Symposium on Fundamentals of Rock Joints. Björkliden. pp. 205-214.
- Olson, K.R. (1985) "Characterization of pore size distributions within soils by mercury intrusion and water-release methods". Soil Science. pp. 400-405.
- Otter, J.R.H., Cassell, A.C. y Hobbs, R.E. (1966) "Dynamic Relaxation". Proceed. Inst. Civ. Eng. Vol. 35. pp. Citado en Cundall (1971).
- Ozanam, O. (1988) "Modelisation numerique des sols elastoplastiques non satures — Application aux barrages en remblais" Tesis Doct. Ecole Central Paris.
- Padró, (1987) "Comunicación personal".
- Pater, D., y Nieuwenhuis, J.D. (1986) "Method for measuring the deformations of a sand surface". Géotechnique. Vol.36. N.4. pp. 581-585.
- Pavilonsky, V.M. (1987) "The absence of threshold gradient in clayey soils". IX E.C.S.M.F.E. Dublín. Vol.2. pp.917-921.
- Peraire, J., Zienkiewicz, O.C. y Morgan, M. (1986) "Shallow water problems: A general explicit formulation". Int. Jnl. Num. Meth. in Engng. Vol.22. pp. 547-574.
- Petrovic, A.M., Siebert, J.E., y Rieke, P.E. (1982) "Soil bulk density analysis in three dimensions by computed tomographic scanning". Soil Science Soc. Am. J., vol.46, pp. 445-450. Citado en Crestana et al. (1985).
- Pine, R.J. y Cundall P.A. (1985) "Applications of the fluid-rock

- interaction program (FRIP) to the modelling of hot dry rock geothermal energy systems". Proceed. Int. Symposium on Fundamentals of Rock Joints. Björkliden. pp. 293-302.
- Pisarenko, G.S., Yakovlev, A.P. y Matveev, V.V. (1979) "Manual de Resistencia de Materiales". Mir. Moscú.
 - Popescu, M.E. (1986) "A comparison between the behaviour of swelling and of collapsing soils" Engineering Geology, nro.23, pp. 145-163.
 - Pousada, E. (1984) "Deformabilidad de las arcillas expansivas bajo succión controlada". Tesis Doctoral. Publicación C8. C.E.D.E.X. Madrid. 274 pag.
 - Poulouvasilis, A. (1962) "Hysteresis of pore water, an application of the concept of independent domains". Soil Sci. Vol.93. pp.405-412.
 - Push, R. y Feltham, P. (1980) "A stochastic model of the creep of soils". Géotechnique, vol.30, n.4, pp. 497-506.
 - Rahman, A. (1966). Jour. Chem. Phys. , vol.45, n.2585. Citado en Finney (1983).
 - Rasmussen, T. C. y Evans. D.D. (1987) "Unsaturated flow and transport Through Fractured rock. Final report. Phase II". NUREG / CR - 4655. University of Arizona. 474 pag.
 - Raudkivi, A.J. y Van U'u, N. (1976) "Soil moisture movement by temperature gradient". Jour. Geot. Eng. Div. ASCE. Vol. 102, No. GT12, pp. 1225-1244
 - Richards, B.G. (1978) "Application of an experimentaly based non-linear constitutive model of soils in laboratory and field tests". Aust. Geomech. Jnl.G8. pp. 20-30.
 - Richards, B.G., Peter, P. y Martin R. (1984) "The determination of volume change properties in expansive soils". Proceed. 5th Inf. Conf. on Exp. Soils. Adelaide. pp. 179-186.
 - Rodríguez Ortiz, J.M. (1974) "Estudio del comportamiento de medios granulares heterogéneos mediante modelos discontinuos analógicos y matemáticos". Tesis Doctoral. E.T.S.I. C.C.P. Madrid.

- Romo, M.P., Mendoza, M. y Yanes, M. (1979) "Influence of microstructure on the suction developed by a compacted soil". Sexto Congreso Panamericano. pp.521-529.
- Roscoe, K.H. (1970) "The influence of strain in soil mechanics" Tenth Rankine Lecture. Géotechnique 20, 2. pp. 129-170.
- Roscoe, K.H. y Schofield, A.N. (1963) "Mechanical behaviour of and idealised "wet" clay". Proceed. 2on E.C.S.M.F.E. Vol. 1. Wiesbaden. p. 47.
- Rowe, P.W. (1962) "The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact". Proc. Roy. Soc. London. Series A. Vol. 269. pp. 500-527.
- Rowe, P.W. (1969) "The relation between the shear strength of sands in triaxial compression, plane strain and direct shear". Géotechnique, vol.19, n.1, pp. 75-86
- Rowe, P.W. (1971) "Theoretical meaning and observed values of deformation parameters for soil". Proceed. Roscoe Memorial Symposium. pp. 143-173.
- Sander, L.M. (1987) "Crecimiento fractal". Investigación y Ciencia, Abril 1987, pp. 66-73.
- Satake, M. (1982) "Fabric tensor in granular materials". IUTAM Conf. Deformation and Failure of Granular Materials. Delft. pp. 63-68.
- Satija, B.S. (1978) "Shear behavior of partly saturated soils" Ph.D. Thesis, Indian Inst. of Technology. Citado en Fredlund et al. (1987).
- Scarpelli, G. y Wood, D.M. (1982) "Experimental observations of shear band patterns in direct shear tests". IUTAM Conf. Deformation and Failure of Granular Materials. Delft. pp. 473- 484.
- Schuster, P. (1987) "The properties of sealing materials consisting of silty sands mixed with clay exhibiting swell-capacity". IX E.C.S.M.F.E. Vol.2. Dublín. pp.927-930.
- Schuurman, I.R. (1966) "The compresibility of an air water mixture and a theoretical relation between the air and water pressures". Géotechnique Vol.16, N.4, pp 269-281.

-
- **Scott, R.F. (1963)** "Principles of soil mechanics". Addison-Wesley Publis. 550 pag.
 - **Scott, R.F. (1987)** "Failure". Géotechnique, vol. 37, n.4, pp. 423-466.
 - **Scott, R.F. y Craig, J.K.M. (1980)** "Computer modelling of clay structure and mechanics". Jnl. Geotechnical Engineering Division. Vol.106. N.GT1. pp. 17-33.
 - **Seed, H.B. y Chan, C.F. (1959)** "Structure and strength characteristic of compacted clays". Jnl. SMFD. ASCE, 85 (SM5). pp. 87-128.
 - **Sergeev, I.T. (1969)** "The application of probability-processes equations to the theory of stress distribution in non-cohesive foundation beds". Traducción al inglés por Consultants Bureau, New York, 5 pag.
 - **Serra, A. y Bacon, J. (1986)** "Computer simulation of twin boundaries in the h.c.p. metals". Philosophical Magazine A. Vol. 54. N.6. pp. 793-804.
 - **Serrano, A.A. y Rodríguez Ortiz, J.M. (1973)** "A contribution to the mechanics of heterogeneous granular media" Proc. Symp. Plasticity and Soil Mech. Cambridge.
 - **Shahinpoor, M. (1983)** "Some recent results on the behaviour of granular materials". Contribución en "Advances in the mechanics and the flow of granular materials". Ed. M. Shahinpoor. Trans Tech Publ. Vol. I, pp. 297-330.
 - **Sides, G.R. (1972)** "Soil microstructure and sample disturbance observations in the stereoscan electron microscope". Proceed. Roscoe Memorial Symposium "Stress-strain behaviour of soils". Cambridge 1971. pp. 89-98.
 - **Sienko, M.J. y Plane, R.A. (1970)** "Química teórica y descriptiva". Ed. Aguilar. Madrid. 710 pag.
 - **Skinner, A.E. (1969)** "A note on the influence of interparticle friction on the shearing strength of a random assembly of spherical particles". Géotechnique, vol.19, n.1, pp. 150-157.
 - **Sparks, A.D.W. (1963)** "Theoretical considerations of stress equations for partly saturated soils". Proceedings 3rd. Regional Conf. for Africa on

- S.M.F.E., Salisbury. Southern Rhodesia. Vol.1. pp.215-218. Citado en Wood (1979).
- **Spivak, M. (1979)** "A comprehensive introduction to differential geometry". Vol. III. 2da. Ed. Publish or Perish Inc. Berkeley.
 - **Sridharan, A.M., Altschaeffl, A.G. y Diamond, S. (1971)** "Pore size distribution studies". S.M.F.D. A.S.C.E. 97 (SM5). pp.771-787.
 - **Steensen-Bach, J.O., Foged, N. y Steinfeld, J.S. (1987)** "Capillary induced stresses: Fact or fiction?". IX E.C.S.M.F.E. Dublín. Vol.1, pp.83-89.
 - **Strack, O.D.L. y Cundall, P.A. (1978)** "The distinct element method as a tool for research in granular media. Part I". Report to the N.S.F. Univ. Minnesota. 97 pag. 2 anejos.
 - **Subcomité. (1985)** "Constitutive laws of soils". Report of ISSMFE. Subcommittee on Constitutive Laws of Soils and Proceedings of Discussion Session 1A. IX ICSMFE. San Francisco. 175 pag.
 - **Sultan, H.A. (1969)** "Collapsing soils. State-of-the-art". Proceed. 7th I.C.S.M.F.E. México. Special. Session n.5.
 - **Szalwinski, C.M. (1985)** "Flexibility of a contact area of an isotropic elastic body". Journal of Applied Mechanics. Vol. 52. pp.62-66.
 - **Tavenas, F., Jean, P., Lebland, P. y Leroneil, S. (1983)** "The permeability of natural soft clays. Part. II". Can. Geotech. Jnl. 20 (4). pp. 645-660.
 - **Teunissen, J.A.M. (1982)** "Mechanics of a fluid-gas mixture in a porous medium". Jnl. Mech. of Materials. pp.1-28.
 - **Terzaghi, K., y Peck, R. (1967).** "Soil Mechanics in engineering practice". New York, Ed. J. Wiley and Sons.
 - **Tobita, Y. (1983)** "The significance of the fabric tensor in the deformation behavior of saturated sand in cyclic shearing" En "Mechanics of Granular Materials" Ed. Jenkins y Satake. Elsevier (Proceed. Seminar Ithaca, New York, 1982). pp. 41-52.

-
- Toll, D (1987) "The effect of suction on the strength of unsaturated soils". 17 pag.
 - Topp, G.C. y Miller. E.E. (1966) "Hysteretic moisture characteristics and hydraulic conductivities for glass-bead media. Soil Sci. Soc. Amer. Proceed. 30. pp. 156-162.
 - Tower, G.D. y Childs, E.C. (1972) "The mechanical strength of unsaturated porous granular material". Jnl. Soil Science 23 (4) pp.481-498.
 - Trent, B.C., Margolin, L.G., Cundall P.A. y Gaffney E.S. (1987) "The micro-mechanics of cemented granular material". Proceed. 2nd. Int. Conf. on Constitutive Laws for Engin. Materials. Tucson. Vol.I, pp 795-802.
 - Trollope, D.H. (1970) "La mecánica clásica o de medios discontinuos en problemas de Mecánica de Rocas". Capítulo 9 en "Mecánica de Rocas en la ingeniería práctica". Ed. K.G. Stagg y O.C. Zienkiewicz. Blume, Madrid, 398 pag.
 - Uriel, A.O. (1982) "A new model for describing the behaviour of particulate media based on the evolution of interparticle forces and contact angles". IUTAM Symp. Deformation and Failure of granular materials. Delft. Citado en Jiménez Salas y Uriel (1983).
 - Uriel, S. y Serrano, A. (1973) "Geotechnical properties of two collapsible soils of low bulk density at the site of two dams in Canary Islands". Proceed. 8th I.C.S.M.F.E. Vol. 2.2. Moscú. pp. 257-264.
 - Vanmarcke, E.H. (1987) "Stochastic modelling of the void phase of soils". Vol.2. I.C.A.S.P.5. Vancouver. Canadá. pp. 1085-1096.
 - Vardoulakis, I.G. (1982) "Imperfection sensitivity of the biaxial test on dry sand". IUTAM Conf. Deformation and Failure of Granular Materials. Delft. pp. 485-491.
 - Vargas, E. Jr. (1985) "Continuum and discontinuum modelling of some blocky type foundation problems". Proceed.Int.Symposium on Fundamentals of Rock Joints. Björkliden. pp. 543- 552.
 - Vaughan (1987) "Comunicación personal".

- **Walton, O.R. (1982)** "Explicit particle dynamics model for granular materials". Proc. Fourth Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics. Edmonton. Canadá. pp.1261-1268.
- **Walton, O.R. (1983)** "Particle-dynamics calculations of shear flow". En "Mechanics of Granular Materials" Ed. Jenkins y Satake. Elsevier (Proceed. Seminar Ithaca, New York, 1982). pp. 327-338.
- **Weast, R.C. (1974)** "Handbook of chemistry and physics". Editada por R.C. Weast. C.R.C. Press Inc.
- **Werner, B., y Haff, P. (1986)** "The impact process in aeolian saltation: two dimensional studies". Brown Bag Reprint Series BB50. Division of Physics. California Institute of Technology. Citado en Scott (1987).
- **Williams, John R. (1987)** "A method for three dimensional dynamic contact analysis of numerous deformable discrete bodies including automatic fracturing". Proceedings of the Int. Conf. Computational Plasticity. Barcelona. Ed. Owen, Hinton, Oñate. pp.1177-1202.
- **Wu, S., Gray, P.M. y Richard, F.E.Jr. (1984)** "Capillary effects on Dynamic modulus of sands and silts". Jnl. Geotech. Eng. ASCE 110 (GT9). pp.1188-1203.
- **Wu, S., Gray, D.M. y Richard, F.E. Jr. (1985)** "Capillary effects on shear modulus at high strains". Proceed. 11th I.C.S.M.F.E. 2. San Francisco. pp. 1091-1094.
- **Yong, R.N. y Warkentin, B.P. (1965)** "Studies of the mechanism of failure under load in expansive soils". Proceed. 1st. Int. Res. and Engng. Conf. on Expansive Clay Soils, Texas, pp. 69-77.
- **Yoshimi, Y. y Osterberg, F. (1963)** "Compression of partially saturated cohesive soils" Jnl. S.M.F.D. A.S.C.E. vol.89, No. SM4, pp. 1-24.
- **Zienkiewicz. O.C. y Löhner, R. (1985)** "Accelerated relaxation or direct solution?. Future prospects for F.E.M.". Int. Jour. for Num. Methods in Eng. Vol.21. pp. 1-11.



GEOMETRIA DEL MENISCO TOROIDAL.
CASO PARTICULAR

En este anejo se presentan las relaciones geométricas (radios de curvatura, succiones, volúmenes, etc.) para un menisco toroidal en un caso simple. Las condiciones particulares del mismo son (figura A1.1):

- Las partículas sólidas consideradas son dos esferas de radio R , iguales y tangentes en un punto ("contacto estricto").
- La interfase aire-agua está aproximada por la parte interior de un toro de revolución.
- El toro se dispone tangente a las esferas (es decir, ángulo de contacto interfase-sólido nulo), abarcando un "ángulo de mojado", θ , sobre las esferas.
- Como se ha señalado en el epígrafe 4.3 todas las relaciones entre geometría (curvatura) y succiones y fuerzas se particularizan a nivel del "ecuador" del menisco, definido como el plano perpendicular al eje de revolución del toro por el punto de la interfase más próximo a dicho eje.

Concretamente los radios de curvatura en dicho punto serán r_1 y r_2 definidos (positivos) en la figura. Están relacionados con las constantes a y b de la ecuación paramétrica del toro (4.23), dado que $a = r_1 + r_2$, $b = r_2$.

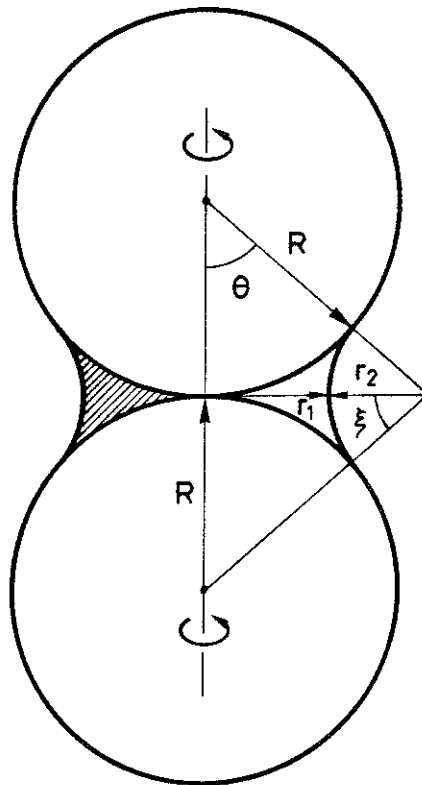


FIGURA A1.1.- Geometría del menisco toroidal. Caso particular.

Unas primeras y sencillas relaciones entre las variables de la figura son:

$$\theta + \xi = \frac{\pi}{2}$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{R}{R + r_2}\right) = \arctan\left(\frac{r_1 + r_2}{R}\right)$$

$$r_1 = R \frac{\sin \theta - 1 + \cos \theta}{\cos \theta} = \frac{2R \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)}{1 + \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

$$r_2 = R \frac{1 - \cos \theta}{\cos \theta} = \frac{r_1^2}{2(R - r_1)} \quad (A1.1)$$

La relación entre el ángulo θ y los radios de curvatura puede verse en la figura 4.15b (caso $\alpha = 0$).

Bajo estos supuestos, dado un R fijo, la geometría del menisco toroidal queda perfectamente determinada especificando uno cualquiera de los valores: θ , r_1 , r_2 , ξ . Sin embargo, por comodidad, la mayoría de las relaciones que siguen son explícitas a partir de un valor del ángulo θ .

El área del casquete esférico mojado hasta el ángulo θ sobre una de las esferas (ver figura A1.2) es:

$$A_C = 2\pi R^2 (1 - \cos \theta) \quad (A1.2)$$

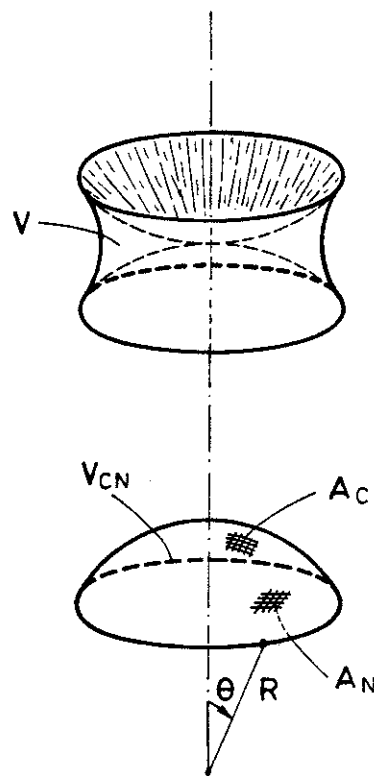


FIGURA A1.2.- Algunos elementos geométricos del menisco toroidal. Caso particular.

El área normal resultante de proyectar lo anterior sobre un plano normal al eje de revolución es:

$$A_N = \pi R^2 \sin^2 \theta \quad (A1.3)$$

El volumen del casquete esférico encerrado entre las anteriores superficies es:

$$V_{CN} = \pi R^3 \left(\frac{2}{3} - \cos \theta + \frac{\cos^3 \theta}{3} \right) \quad (A1.4)$$

El volumen del menisco ocupado por el agua (figura A1.2) obtenido por revolución del triángulo curvilíneo rayado en la figura A1.1, se puede obtener en este caso particular como (modificado de Moore y Millar, 1971):

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3 \left[\frac{\tan^2 \theta}{2} - 1 + \cos \theta - \frac{\xi(1 - \cos \theta)^2}{2 \cos^2 \theta} \left(3 \tan \theta - \frac{(1 - \cos \theta)}{\xi/2} \right) \right] \quad (A1.5)$$

donde los argumentos aislados deberán usarse en radianes. La forma de dicha función $V(\theta)$ queda ilustrada en la figura 4.15c (caso $\alpha = 0$).

Otra manera de determinar dicho volumen por superposición de volúmenes simples y usando la variable auxiliar $\rho = r_1/R$, es (corregido de Kirkham y Powers, 1972):

$$V = \frac{8}{3} \pi R^3 [A(B - D + M) + N]$$

donde

$$A = \frac{3\rho^4}{32(1 - \rho)^3}$$

$$B = (4 - 4\rho + \rho^2) \cos \theta$$

$$D = (2\rho - \rho^2)(\cos \theta \sin \theta - \theta + \pi/2)$$

$$M = \frac{\rho^2}{3}(\cos \theta \sin^2 \theta + 2 \cos \theta)$$

$$N = \frac{1}{4}(\cos \theta \sin^2 \theta + 2 \cos \theta - 2) \quad (A1.6)$$

Dado un conjunto de esferas en una determinada situación relativa conocida (estibación o "packing"), con meniscos en sus contactos con ángulo de mojado θ , se podrá conocer pues el volumen total de agua en dichos meniscos. Dividiendo su peso por el de las partículas sólidas se podrá obtener la "humedad" de ese "suelo ideal". Análogamente se podrá obtener la humedad (en volumen), el grado de saturación, etc.

La presión del agua en el menisco, bajo la acción de la doble curvatura de la interfase aire-agua de tensión superficial σ_s , relativa a la del aire fuera de él, $p_w - p_a$, puede expresarse alternativamente como:

$$p_w - p_a = \sigma_s \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \frac{\sigma_s(3r_1 - 2R)}{r_1^2} \quad (A1.7)$$

$$p_w - p_a = \frac{\sigma_s \cos \theta (\sin \theta + 2 \cos \theta - 2)}{R(1 - \cos \theta)(\sin \theta + \cos \theta - 1)}$$

Nótese que como aquí geoméricamente r_2 está definido como positivo, la correspondiente curvatura va precedida de un signo menos de acuerdo al convenio de signos establecido en relación a la ecuación 4.2.

Si se cumplen las condiciones equivalentes (ver figura 4.15d, caso $\alpha = 0$)

$$r_1 < \frac{2}{3}R \quad ; \quad \theta < 53.13^\circ \quad (A1.8)$$

dicha presión relativa será negativa. Esto significa que el agua está en "déficit de presión" o "a tracción" o sencillamente "bajo succión". En definitiva su presión absoluta es menor que la del aire. Como se resalta en el epígrafe 4.3, éste es el campo de interés conceptual del modelo menisco aislado. En este rango de valores la ecuación A1.7 nos dará la succión "local y actual" (es decir de ese menisco y en ese instante), cambiada de signo.

Por otro lado si la humedad baja ($\theta \rightarrow 0^\circ$), los radios r_1 y r_2 tienden a cero y la presión relativa ($p_w - p_a$) tiende a menos infinito.

También se puede evaluar la fuerza capilar o “de sobrecontacto” en el plano “ecuatorial”: fuerza neta que ejerce el menisco entre las dos esferas que enlaza (ver epígrafe 4.3), teniendo en cuenta que desplaza o evita la actuación de la presión de aire allí donde hay menisco. Aceptando que dicha presión de aire es constante (dado que el estado de poros es muy “abierto”), se puede deducir con expresiones matemáticas o de manera gráfica (ver figura A1.3) que:

$$F_w = \sigma_s 2\pi r_1 - (p_w - p_a) \pi r_1^2 \quad (A1.9)$$

Está compuesta por dos contribuciones: la correspondiente a la deficiencia de presión del agua integrada en la sección “ecuatorial” y la debida a la tensión superficial actuando en la intersección de la interfase y el “ecuador”. Es fácil ver que se puede expresar también como:

$$\begin{aligned} F_w &= \pi \sigma_s (2R - r_1) = \pi \sigma_s R \left(\frac{\cos \theta - \sin \theta + 1}{\cos \theta} \right) = \\ &= \frac{2\pi \sigma_s R}{1 + \tan \frac{\theta}{2}} \end{aligned} \quad (A1.10)$$

Su variación con el ángulo de mojado θ queda reflejada en la figura 4.13e y 4.15e (caso $\alpha = 0$). Su valor límite teórico cuando el ángulo de mojado tiende a cero es:

$$F_{w,max} = 2\pi \sigma_s R \quad (A1.10b)$$

En ausencia de otras acciones (fuerzas) sobre ese par de esferas, por el contacto entre las dos se deberá transmitir una fuerza igual y contraria a F_w .

Bajo determinadas suposiciones muy simplificadas se puede traducir esa fuerza capilar a términos de una tensión de contacto equivalente (fuerza por unidad de área total) que puede igualmente identificarse con una pseudotensión global “isotrópica” imputable al efecto de los meniscos alrededor de todos y cada uno de los contactos.

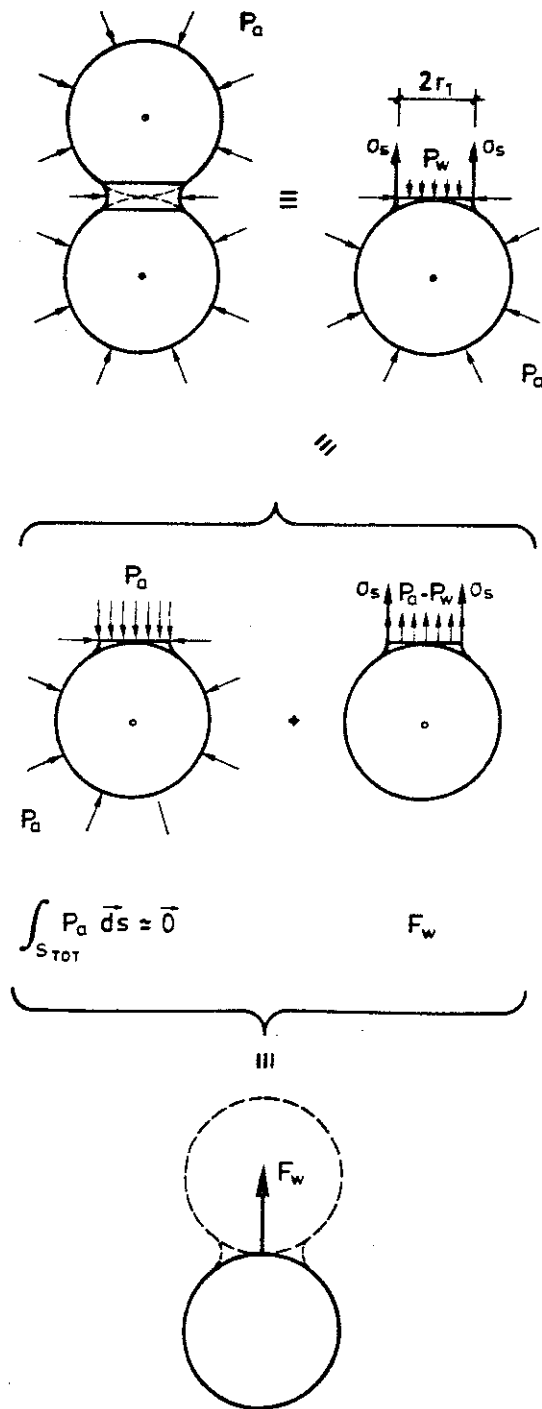


FIGURA A1.3 .- Corte del menisco por un plano ecuatorial para hallar la fuerza capilar o "de sobrecontacto"

Si, por ejemplo, se supone un “packing” cúbico regular el área total por contacto es un cuadrado de radio $2R$ y entonces esa tensión “de sobrecontacto” valdrá:

$$\begin{aligned}\sigma_w &= \frac{F_w}{(2R)^2} = \frac{\pi\sigma_s}{4R^2}(2R - r_1) = \\ &= \frac{\pi\sigma_s}{4R} \left(\frac{\cos\theta - \sin\theta + 1}{\cos\theta} \right) = \\ &= \frac{\pi\sigma_s}{2R} \frac{1}{1 + \tan\frac{\theta}{2}}\end{aligned}\tag{A1.11}$$

Mientras que F_w es directamente proporcional al tamaño de la partícula (R), σ_s lo es inversamente. Por otro lado el peso de cada partícula crece con el cubo de R . A título indicativo en la tabla A1.1 se particularizan estos valores para varios “calibres” de partícula. Especialmente interesante resulta la relación teórica $F_{w,max}/Peso$. Es evidente que a partir del tamaño limo fino las relaciones no se cumplirán, debido a las fuerzas de adhesión, pero se incluyen por extensión.

Para este tipo de “packing” cúbico, que con bastante frecuencia se adopta en la literatura para hacer reflexiones semicuantitativas, hay que señalar que el menisco dejaría de ser realmente aislado para un ángulo $\theta = 45^\circ$; lo que corresponde a una humedad en peso del 6.25% (suponiendo peso específico de sólido 2.65 g/cm^3), si no se considera otra agua que la de los meniscos (por ejemplo agua en películas adheridas a los sólidos). Un hipotético estado en el cual una burbuja esférica ocluída estuviera en el centro de un cubo formado por ocho esferas sólidas y tangente a ellas, tendría una humedad del 19.53%; la humedad de saturación es del 34.3%. La relación entre el grado de saturación con la succión (curva de retención de humedad) para valores de θ inferiores a 45° correspondería a la curva inferior de la figura A1.4 ($\delta = 0$). En dicha figura se presentan otras curvas de retención de humedad para el caso de considerar, adicionalmente al agua de los meniscos, una película de espesor δ cubriendo el resto de las esferas que simbolizan las partículas del suelo. El espesor δ a su vez está relacionado con la presión del agua, dado que en un ambiente “más succionante” δ será menor.

TABLA A1.1

TIPO DE MATERIAL POR CALIBRE	Ø (mm)	$F_{w,max}$ (Kp)	Peso (Kp)	$F_{w,max}/Peso$	σ_w (Kp/cm ²)	
ARENA	4	$9,32 \times 10^{-5}$	9×10^{-5}	~1	$5,8 \times 10^{-4}$	
	2	$4,66 \times 10^{-5}$	1×10^{-5}	4,66	$1,16 \times 10^{-3}$	
	GRUESA	0,6	$1,40 \times 10^{-5}$	$2,7 \times 10^{-7}$	52	$3,9 \times 10^{-3}$
	MEDIA	0,2	$4,66 \times 10^{-6}$	1×10^{-8}	466	0,0116
LIMO	FINA	0,06	$1,40 \times 10^{-6}$	$2,7 \times 10^{-10}$	5 200	0,04
	GRUESO	0,02	$4,66 \times 10^{-7}$	1×10^{-11}	46 600	0,116
	MEDIO	0,006	$1,40 \times 10^{-7}$	$2,7 \times 10^{-13}$	520 000	0,39
	FINO	0,002	$4,66 \times 10^{-8}$	1×10^{-14}	4 660 000	1,16
ARCILLA	GRUESA	0,0006	$1,40 \times 10^{-8}$	$2,7 \times 10^{-16}$	52 000 000	3,86
	MEDIA	0,0002	$4,66 \times 10^{-9}$	1×10^{-17}	466 000 000	11,6
	FINA					

Esta dependencia puede expresarse a través de una hipérbola de sexto orden (Kovacs, 1981) como ya se ha detallado en el texto (apartado 3.2.1) y se indica en la figura. El numerador de la hipérbola puede tomarse como constante para una granulometría dada (Kovacs, 1981). Para el "packing" cúbico regular en cuestión se relaciona con el radio a través de una constante C_K . Un valor medio deducido de los datos de este autor sería $C_K = 2,5 \cdot 10^{-3}$. Entre los casos extremos citados ($\delta = 0$ y $C_K = 2,5 \cdot 10^{-3}$) se incluyen además cuatro curvas intermedias.

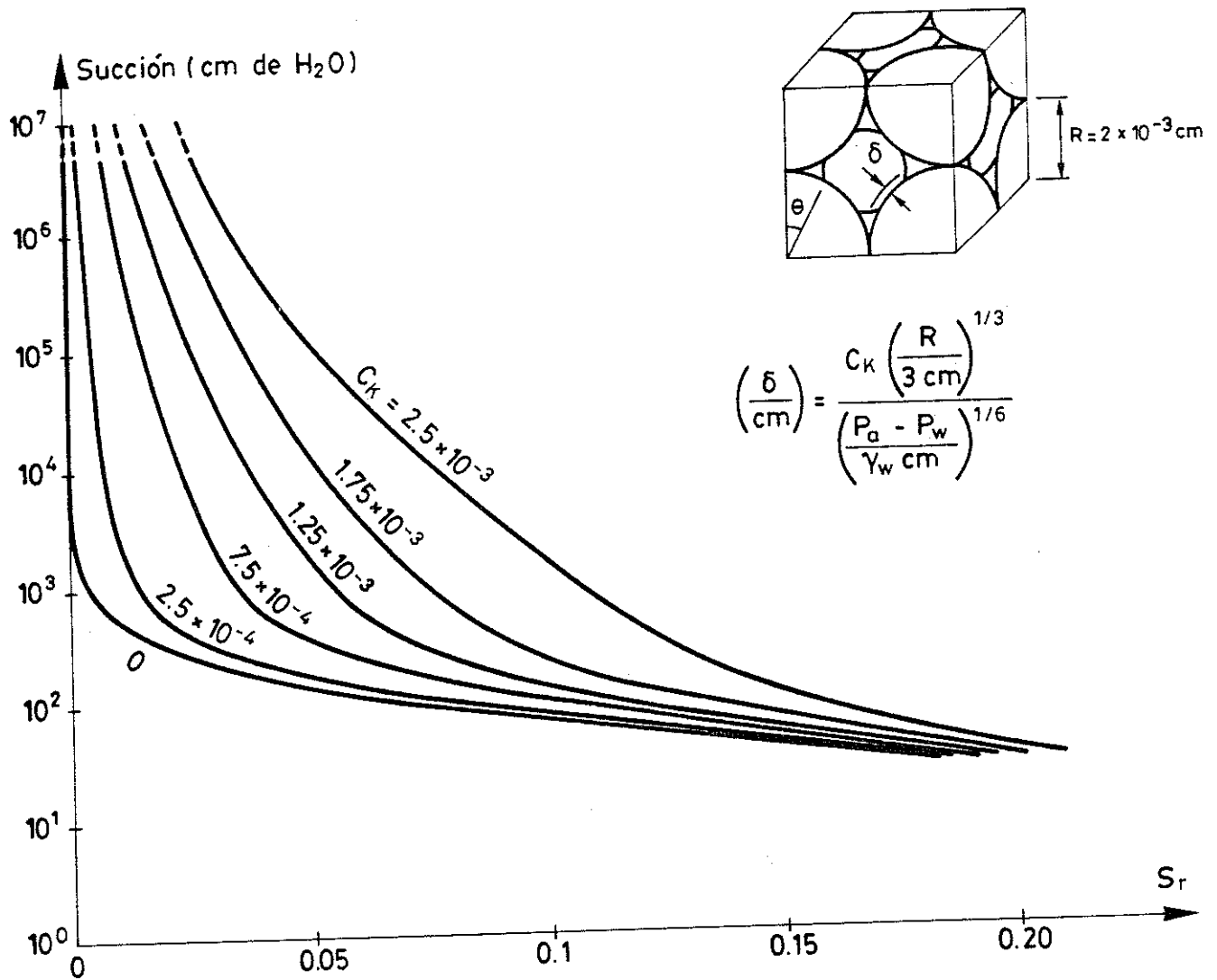


FIGURA A1.4 .- Ejemplo de curvas de retención de humedad para el menisco aislado dispuesto en "packing" cúbico regular con una película de espesor δ sobre el resto de las partículas.

**GEOMETRIA DEL MENISCO TOROIDAL.
CASO GENERALIZADO**

En este anejo se presenta la configuración generalizada del menisco toroidal.

Las condiciones generalizadas son (ver figura A2.1):

- Las partículas sólidas consideradas son dos esferas de radios R_1 y R_2 , cercanas pero no necesariamente tangentes.
- La interfase aire-agua ha sido aproximado por la parte interior de un toro de revolución.
- Dicho toro se dispone tangente a las esferas (es decir ángulo de contacto interfase-sólido nulo), abarcando sendos "ángulos de mojado" θ_1 y θ_2 sobre las esferas.
- Como se ha señalado en el epígrafe 4.3, todas las relaciones entre geometría del menisco (curvaturas) y succiones y fuerzas se particularizan a nivel del "ecuador" del menisco, definido como el plano perpendicular al eje de revolución del toro por el punto de la interfase más próximo a dicho eje.

En lo que sigue se adopta al convenio de llamar R_1 al radio de la esfera mayor (luego $R_1 \geq R_2$).

Se define la distancia algebraica entre las superficies de las esferas de modo que la distancia entre centros es igual a $R_1 + R_2 + D$. Se distingue los casos: $D > 0$ ("cuasi-

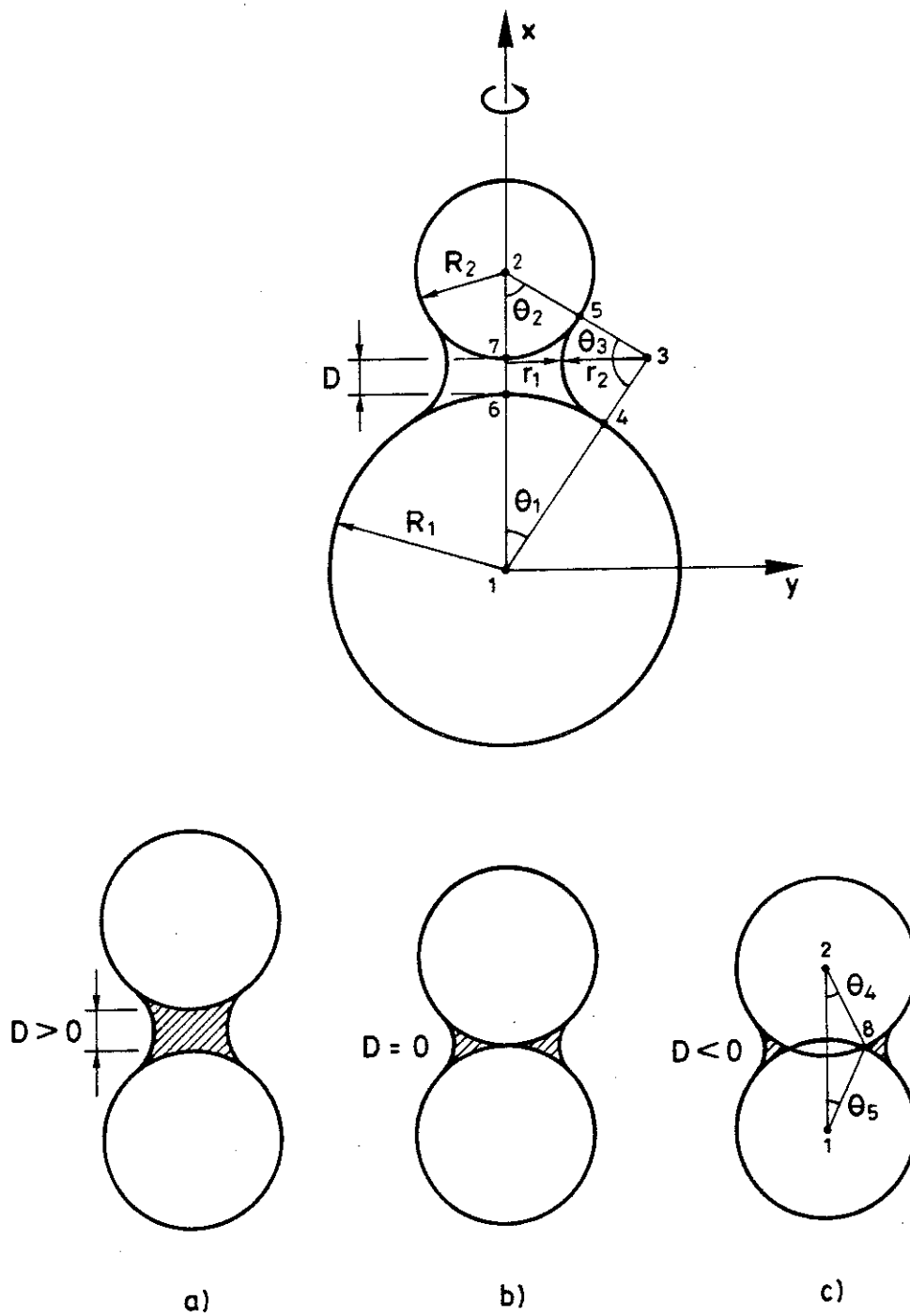


FIGURA A2.1 .- Geometría del menisco toroidal. Caso generalizado.
 En la figura la distancia entre las esferas ha sido exagerada.
 a) "cuasi-contacto".
 b) "contacto-estricto".
 c) solape o "sobre-contacto".

contacto", a); $D = 0$ ("contacto-estricto", b); $D < 0$ (solape o "sobre-contacto", c).

En las expresiones y cálculos que siguen es útil trabajar con valores adimensionales:

$$\gamma = \frac{R_2}{R_1} \quad ; \quad \alpha = \frac{D}{R_2} \quad (A2.1)$$

La geometría del menisco toroidal generalizado queda determinada si se conocen los radios de las esferas R_1 y R_2 , la distancia D que las separa en un determinado instante y, por ejemplo, el ángulo de mojado θ_2 sobre la esfera menor.

Para cualquier cálculo posterior es útil fijar las coordenadas de los puntos que aparecen en la figura respecto a los ejes x e y indicados:

$$\begin{aligned} 1: & \quad x_1 = 0 \quad , \quad y_1 = 0 \\ 2: & \quad x_2 = R_1 + R_2 + D \quad , \quad y_2 = 0 \\ 3: & \quad x_2^2 - (R_1 - R_2)^2 = \frac{2y_3}{\sin \theta_2} (R_1 - R_2 + x_2 \cos \theta_2) \\ & \quad x_3 = x_2 - \frac{y_3}{\tan \theta_2} \\ r_2: & \quad r_2 = \sqrt{x_3^2 + y_3^2} - R_1 \\ r_1: & \quad r_1 = y_3 - r_2 \\ \theta_1: & \quad \theta_1 = \arctan(y_3/x_3) \\ 4: & \quad x_4 = R_1 \cos \theta_1 \quad , \quad y_4 = R_1 \sin \theta_1 \\ 5: & \quad x_5 = x_2 - R_2 \cos \theta_2 \quad , \quad y_5 = R_2 \sin \theta_2 \\ \theta_3: & \quad \theta_3 = \pi - \theta_1 - \theta_2 \\ \text{Si } D < 0: & \quad x_8 = \frac{x_2^2 + R_1^2 - R_2^2}{2x_2} \\ & \quad y_8 = \sqrt{R_1^2 - x_8^2} \\ & \quad \theta_4 = \arctan\left(\frac{y_8}{x_2 - x_8}\right) \\ & \quad \theta_5 = \arctan\left(\frac{y_8}{x_8}\right) \end{aligned} \quad (A2.2)$$

La evolución de los radios de curvatura para el caso $\gamma = 1$ y para algunos

valores de α puede verse en la figura 4.15b.

A partir de los valores anteriores, por superposición de volúmenes es posible averiguar el volumen del menisco como cuerpo de revolución de las áreas curvilíneas que aparecen rayadas en la figura A2.1. En concreto V_3 es el volumen interior al menisco limitado por la interfase y dos planos perpendiculares al eje x por el punto 4 y por el punto 5; los otros volúmenes son de casquetes esféricos, según la ecuación A1.4.

$$\begin{aligned}
 V_3 &= \pi \left[(y_3^2 + r_2^2)(x_5 - x_4) - \frac{(x_5 - x_3)^3}{3} + \frac{(x_4 - x_3)^3}{3} - y_3 r_2^2 \theta_3 - \right. \\
 &\quad \left. - y_3(x_5 - x_3)\sqrt{r_2^2 - (x_5 - x_3)^2} + y_3(x_4 - x_3)\sqrt{r_2^2 - (x_4 - x_3)^2} \right] \\
 V_1 &= \pi R_1^3 \left[\frac{2}{3} - \cos \theta_1 + \frac{\cos^3 \theta_1}{3} \right] \\
 V_2 &= \pi R_2^3 \left[\frac{2}{3} - \cos \theta_2 + \frac{\cos^3 \theta_2}{3} \right] \\
 \text{Si } D \geq 0 \quad V_4 &= 0 \\
 \quad \quad \quad V_5 &= 0 \\
 \text{Si } D < 0 \quad V_4 &= \pi R_2^3 \left[\frac{2}{3} - \cos \theta_4 + \frac{\cos^3 \theta_4}{3} \right] \\
 \quad \quad \quad V_5 &= \pi R_1^3 \left[\frac{2}{3} - \cos \theta_5 + \frac{\cos^3 \theta_5}{3} \right] \\
 V &= V_3 - V_1 - V_2 + V_4 + V_5
 \end{aligned} \tag{A2.3}$$

En la figura 4.15c se presenta el volumen del menisco en función del ángulo de mojado para los valores $\gamma = 1$ y $\alpha = 0.09, 0$ y -0.09 , a título de ejemplo.

Otros elementos geométricos interesantes son el "área recta" del menisco (A_R , área rayada en la figura A2.1) y el "área lateral" del menisco (A_L , que es justamente la superficie total de la interfase aire-agua, obtenida por revolución del arco de

circunferencia $\widehat{45}$ en dicha figura):

$$\begin{aligned}
 A_1 &= x_2 y_3 \\
 A_4 &= r_2^2 \theta_3 \\
 \text{Si } D \geq 0 \quad A_2 &= R_2^2 \theta_2 \\
 A_3 &= R_1^2 \theta_1 \\
 \text{Si } D < 0 \quad A_2 &= R_2^2 (\theta_2 - \theta_4) \\
 A_3 &= R_1^2 (\theta_1 - \theta_5) \\
 A_R &= A_1 - A_2 - A_3 - A_4 \\
 A_L &= 2\pi r_2 y_3 \theta_3 - 2\pi r_2^2 (\cos \theta_2 + \cos \theta_1)
 \end{aligned} \tag{A2.4}$$

Como centro geométrico del menisco puede tomarse:

$$x_M = \frac{x_2 - R_2 + R_1}{2}, \quad y_M = 0 \tag{A2.5}$$

El déficit de presión de agua del menisco, conocidos r_1 y r_2 por las ecuaciones A2.2, vendrá dado por:

$$p_w - p_a = \sigma_s \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \tag{A2.6}$$

siendo válidos cualitativamente los comentarios hechos a la ecuación A1.7 en el anejo A1. En la figura 4.15d se puede estudiar su evolución con el ángulo θ , para algunos valores—ejemplo de γ y α .

Análogamente también se puede evaluar la fuerza capilar o de “sobrecontacto” en el plano “ecuatorial” (ver epígrafe 4.3). El valor de F_w se puede deducir de manera gráfica (similar a la figura A1.3), o de forma algebraica como se hace a continuación.

Dicha fuerza está compuesta por dos contribuciones: la correspondiente a las presiones de fluidos en la superficie de la esfera (F_{w_p}), y la debida a la tensión superficial actuando en la intersección de las interfases y el “ecuador” del menisco (F_{w_σ}).

Para deducir el valor de la primera contribución debemos partir de la superficie total de la esfera. Dicha superficie se puede subdividir (ver figura A2.2):

$$S_T(\text{total}) = S_a(\text{aire}) + S_w(\text{agua}) + S_c(\text{contactos sólidos}) \quad (\text{A2.7})$$

Así la acción de las presiones de los fluidos en toda la esfera se puede transformar en:

$$\int_{S_T} p \cdot \vec{ds} = \int_{S_a} p_a \cdot \vec{ds} + \int_{S_w} p_w \cdot \vec{ds} + \int_{S_c} 0 \cdot \vec{ds} \quad (\text{A2.8})$$

El tercer sumando integral es nulo puesto que en los contactos sólidos no actúa ningún tipo de presión de fluidos, dado que como se supone normalmente a esa escala la presión en los contactos es tan grande que expulsa al agua, evitando cualquier tipo de subpresión (Bowden y Tabor, 1986; Lambe y Whitman, 1979).

Añadiendo a los dos sumandos restantes la cantidad nula:

$$\int_{S_w} p_a \cdot \vec{ds} - \int_{S_w} p_a \cdot \vec{ds} + \int_{S_c} p_a \cdot \vec{ds} - \int_{S_c} p_a \cdot \vec{ds}$$

y reagrupando términos, se obtiene:

$$\int_{S_T} p_a \cdot \vec{ds} + \int_{S_w} (p_w - p_a) \cdot \vec{ds} - \int_{S_c} p_a \cdot \vec{ds} \quad (\text{A2.9})$$

El suelo en ese estado tiene una estructura muy “abierta” y las presiones de aire no diferirán en mucho entre poros vecinos (gradientes prácticamente nulos), por lo que, directamente, o aplicando el teorema de la divergencia a la primera integral, se puede ver que es nula. Los dos restantes sumandos, particularizados para cada menisco “i” y con la dirección y sentido de F_w en la figura A2.2 resultan en:

$$F_{wP} = p_a \pi y_8^2 - (p_w - p_a)(\pi r_1^2 - \pi y_8^2) \quad (\text{A2.10})$$

La segunda contribución para el menisco “i” valdrá:

$$F_{w\sigma} = \sigma_s \cdot 2\pi r_1 \quad (\text{A2.11})$$

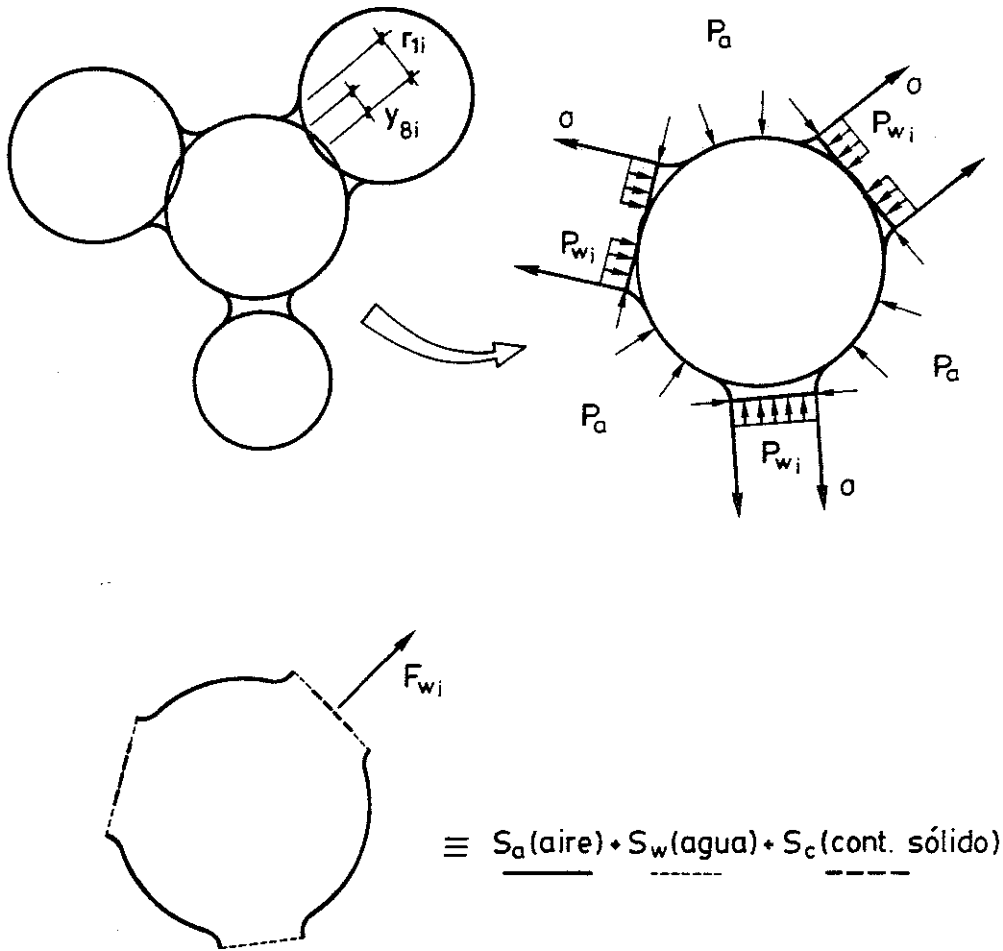


FIGURA A2.2 .- Reducci\u00f3n de las presiones de los fluidos que act\u00faan sobre la superficie total de la esfera a las fuerzas capilares en los contactos.

De manera que, en definitiva, para cada menisco:

$$F_w = \sigma_s \cdot 2\pi r_1 + p_a \pi y_8^2 - (p_w - p_a)(\pi r_1^2 - \pi y_8^2) \quad (A2.12)$$

Como en el anejo A1, dentro de dicha fuerza se incluye de manera indirecta la presión de aire, de modo que finalmente F_w es la reducción a los contactos de las acciones de los fluidos que actúan sobre la superficie total de la esfera. El segundo sumando podría comprometer, teóricamente, la validez de la técnica experimental de ensayo a succión por traslación de ejes, usada frecuentemente. Ocurre sin embargo que en la práctica el radio y_8 debe ser muy pequeño para los valores habituales de compresibilidad de los contactos entre partículas. En el modelo se han supuesto las partículas esféricas e indeformables. Por este motivo la intersección de los círculos máximos de dos de ellas puede dar en algunos casos valores de y_8 desmesurados, sin correspondencia con la realidad. En estos casos es conveniente no considerar esa contribución, por ser más un "residuo" del modelo que un valor real.

La relación entre F_w y θ para algunos valores ejemplo de γ y de α queda ilustrada en la figura 4.15e.

Los desarrollos anteriores observan el caso de menisco entre dos esferas. Un caso que puede presentarse si se utilizan paredes rectas y rígidas como contornos, es el de contacto "degenerado" entre una esfera y una superficie plana. Entonces puede utilizarse un radio R_1 suficientemente grande o bien modificar ligeramente los desarrollos presentados para incluir esta casuística.

En todo caso, ya en un cálculo concreto, deben cuidarse los errores de redondeo en las distintas operaciones puesto que determinados términos pueden hacerse muy grandes y otros muy pequeños especialmente para volúmenes de menisco reducidos. A este respecto puede ser indicado llevar los cálculos de forma adimensional manejando los valores γ y α (ecuación A2.1) en lugar de R_1 , R_2 y D directamente, y "dimensionalizando" los resultados adimensionales multiplicando las áreas por R_1^2 , los volúmenes por R_1^3 , etc.

También es interesante poder conocer, dados R_1 , R_2 y D , el ángulo de mojado θ_2 mínimo (θ_{min}) que podrá dar meniscos geoméricamente adecuados al modelo

contemplado en este anejo (es decir que se correspondan con la figura A2.1). Para el caso de “sobre-contacto” el θ_{min} es el θ_4 de la ecuación A2.2 que se puede calcular explícitamente a partir de R_1 , R_2 y D . El caso de “contacto-estricto” no presenta limitación por este motivo ($\theta_{min} = 0^\circ$). Menos directo es el caso de “cuasi-contacto”. Entonces el menisco menor compatible es el que cumple $r_1 = 0$. El valor de θ_{min} se puede hallar a través de:

$$\begin{aligned}
 E &= 1 + \gamma + \alpha\gamma \\
 A &= \frac{E^2 - (1 - \gamma)^2}{2E} \\
 C &= A - \frac{\gamma(1 - \gamma)}{E} \\
 \cos \theta_{min} &= \frac{C\gamma + \sqrt{C^2\gamma^2 - (\gamma^2 + A^2)(C^2 - A^2)}}{\gamma^2 + A^2}
 \end{aligned}
 \tag{A2.13}$$



ANEJO 3

DESCRIPCION DE LOS PROGRAMAS *

* La presente información completa y se corresponde con la del capítulo 5. Se ha intentado seguir en lo posible las pautas de presentación indicadas por el Subcomité de documentación de programas del Comité "Computer Applications, S.M.F.D." (Proc. A.S.C.E., vol.99, SM3, 1973, pp. 249-266)

A3.1 IDENTIFICACION DE LOS PROGRAMAS

1.1 TITULO: Modelo microestructural discontinuo para medios granulares no saturados.

1.2 CODIGO: BAL9

1.3 AUTOR: J. A. Gili Ripoll.

1.4 ORGANIZACION: Departamento de Ingeniería del Terreno. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Catalunya. España.

1.5 FECHA: Junio de 1988.

1.6 LENGUAJE: FORTRAN (VAX v.4.5).

1.7 RESUMEN:

El conjunto de programas que se describe constituye un modelo numérico de simulación del comportamiento del suelos (granular) no saturado. Se supone una geometría detallada del interior del suelo, en el que se distinguen partículas esféricas (granos), meniscos (aislados) de agua (que también se encuentra adherida en forma de película sobre las superficies sólidas), y poros, ocupados por aire con vapor de agua. La configuración de la muestra es inicialmente circular, con un cierto número de partículas esféricas con centros contenidos en el plano del modelo, en el que se pueden mover (x_B, y_B) , y girar (θ_B) . En el contorno de la muestra se puede aplicar una tensión (isotrópica o desviadora), y una presión de agua y de gas definida. Adicionalmente se puede considerar el caso saturado. Las anteriores condiciones de contorno pueden ser variadas con el tiempo. Mediante un esquema explícito, de tipo relajativo, se siguen los flujos internos entre las fases líquida y gaseosa, y los movimientos de las partículas correspondientes a diversas trayectorias en el plano $(\sigma - p_a) \times s$, con los

consecuentes cambios del contenido de humedad y de geometría (dimensiones, porosidad y distribución de poros).

A3.2 DOCUMENTACION TECNICA*

2.1 DESCRIPCION Y METODO DE SOLUCION DEL PROBLEMA.

La descripción del modelo conceptual (en el que se basa el modelo numérico presente) se encuentra en el capítulo 3, y se concreta en el capítulo 5, junto con una discusión de la extensión del mismo. Básicamente se trata de un suelo granular fino (arena fina o limo) no saturado, a bajo contenido de humedad (en un estado en el cual el agua "libre" se encuentre en forma de meniscos aislados alrededor de los contactos entre partículas; ver capítulo 4). El modelo resuelve el problema flujo-deformacional en dicho estado, concediendo máxima atención a la estructura del suelo. El método de resolución se describe en el capítulo 5. El problema mecánico (fuerzas y desplazamientos) se ha resuelto con una adaptación del D.E.M. (ver por ejemplo Cundall y Strack, 1979). El problema de flujo (entre poros y meniscos) se ha resuelto con un nuevo método, inspirado en el anterior, explícito y muy adaptado a la detallada geometría discontinua del modelo. Sobre el *esquema explícito puro* se resaltan las modificaciones de "flujo exponencial", "actualización inmediata" e "inicio aleatorio".

2.2 POSIBILIDADES DE LOS PROGRAMAS.

Dentro del conjunto de programas que componen el modelo que se describe, conviene distinguir tres etapas:

- ★ **Preproceso.** Programas anteriores al ensayo numérico principal.
 - Con el programa *MENAI*S se pueden llevar a cabo estudios previos

* Los comentarios que se hacen a continuación, se refieren fundamentalmente al programa principal de ensayo numérico, aunque el ambiente de trabajo, y otros extremos, son comunes a todos los programas que se citan en el punto 2.2 de este anejo.

o independientes del rango de valores que adoptan algunas fuerzas entre dos partículas esféricas unidas por un menisco toroidal (*caso generalizado*, correspondiente al anejo A2).

• Los programas *GENAL4* y *GAPLUS7*, de uso normalmente consecutivo, se consagran a la generación aleatoria de partículas en el plano del modelo dentro de una zona circular especificada, y con cierta posibilidad de controlar la porosidad (muestra “abierta” o “cerrada”). Las partículas son tangentes, en una serie de puntos de *contacto*. El segundo programa identifica los poros enmarcados por las partículas generadas, y define los valores iniciales del resto de variables.

* **Ensayo numérico.** Los programas que integran esta etapa son: *BTOT5* (controlador de t , y módulo de flujos), *CHEQ* (módulo de chequeos y cambios geométricos), *HERCU* (módulo mecánico), y *LEC-ES* (módulo de lectura y escritura). Trabajan conjuntamente. Sus posibilidades y especificaciones han sido discutidas en los capítulos 5 y 6.

* **Postproceso.** El programa *DIBU* se encarga de interpretar los archivos del modelo (generalmente extensos), efectuando los dibujos del plano del modelo y las gráficas que se deseen (como las del capítulo 6). Adicionalmente se puede investigar el valor de las variables concretas que se quiera.

2.3 OPCIONES DEL PROGRAMA.

Las principales opciones del programa de ensayo numérico se refieren a la variable ICASO. En función de su valor se permiten (o no) los movimientos de las partículas y los flujos (ver epígrafe 5.3):

- ICASO=0, Modo *sólo flujos*.
- ICASO=1, Modo *normal* (flujos y movimientos).
- ICASO=2, Modo *inundado* (sólo movimientos).
- ICASO=3, Modo *desaturación* (transición de Modo 2 a Modo 1).

2.4 ENTRADA Y SALIDA DE DATOS. SIGNIFICADO DE LAS VARIABLES.

Tras la generación inicial del modelo el ensayo numérico se basa en un archivo principal de datos, de formato sensiblemente constante, tanto para entrada de datos (BAL9VAR.DAT), como para salida de resultados (BAL9VAR.RES). Su contenido es distinto, al referirse a instantes de tiempo diferentes. En la figura A3.1 se incluye una muestra del posible formato de tal archivo. Se lee en formato libre, lo que da máxima elasticidad a las modificaciones de su contenido. Las variables que preceden a los símbolos "@" son unos ordinales que se emplean de control de lectura-escritura. Como el archivo contiene *toda* la información necesaria para restituir completamente el estado del modelo en un momento determinado, se hace especialmente indicado para reiniciar un ensayo numérico desde el "estado" en el que finalizó otro. Así los "ensayos" se pueden llevar a cabo por incrementos (única opción, en general, dado el requerimiento de C.P.U.). Por otro lado, a partir de un archivo o "estado" anterior almacenado, se puede reiniciar el ensayo en una "dirección" (trayectoria tensional) distinta.

* **Archivo BAL9VAR.DAT** . (Ver formato y extracto en la figura A3.1-I a V-) Contiene fundamentalmente información de posiciones (coordenadas de partículas meniscos y poros), de masas en poros y meniscos (de agua, aire, vapor, etc.), y de *conectividades* entre ellos (KPN, MB, MN, etc.). En cabecera también contienen cierta información de tipo general:

- *Control de tiempos*: Incrementos de tiempo usados (TINCF, TINCM); tiempo inicial, corriente y final del "run" (TINI, TIME, TFIN); número de ciclo de flujo (ICICLE); intervalo de ciclos entre escrituras (IWRITE).
- *Caso de flujo que se trata*. (ICASO).
- *Número de "items" o "entes" en el modelo*: NTB (de partículas); NTM (de meniscos); NTP (de poros); NTTIP (número de tamaños de partículas); NBAIS (nro. de partículas aisladas); INPEL, INMEL (número de enteros en la lista de "espera" de poros y meniscos).
- *Valores geométricos globales*: XUMB, ESPZ, ENEPO, GSATU, WHUME, etc., definidos en el capítulo 5.
- *Solicitaciones sobre el modelo y su "velocidad" de variación*: gravedad


```

17 @ YBV
-1.0991238729025894E-02  0.8066156549439481  -7.0177157359402021E-02
-0.1193473530989934    -5.3220889533362615E-02  1.2139726654901194E-02
.....
-7.5817264310901265E-02 -0.1802060968862484      1.2764926962150427E-02
-0.1207483772638251

18 @ TBV(DEG./S)
50.40969390375514      21591.07301938652      2369.691757519823
2947.869191791523     -269.1273215396144     8.439067413323385
.....
-1090.665158492524     2778.744671571777     -59.55890031471798
-2635.428166466921

19 @ ECINL,ECINT
4.0532982210770122E-11  1.1427333191567592E-11

20 @ IMB
  6   6   5   3   5   5   3   7   4   4
  4   6   4   5   4   3   5   6   2   4
.....
  3   2   3   2   3   3   3   3   3   3
  4   2   5   2   2   3   3   4   2

21 @ MB
  10  187  14   7   4  191   0
   1   31  383  553  377  22   0
.....
  980 1107  981 1099   0

22 @ R...
2.5000000000000000E-03  2.0000000000000000E-03  1.5000000000000000E-03

23 @ MENISCOS XM
-9.1513068347359591E-03 -5.9855841263943773E-03  1.1082008032060591E-02
-1.5066152399045314E-03 -3.4060586660037084E-02  4.3549728011173209E-05
.....
  1.1552816367677324E-02  2.0558732782494528E-03 -4.2999219235979707E-03
-9.4598976116305018E-03  3.4415445175826679E-02

24 @ YM
-3.6819039186569604E-02 -3.9054399171594536E-02  1.6736017280520169E-02
  3.2877093031862713E-03 -1.0289907196355562E-02  2.5661040190212102E-03
.....
  2.1770436060439834E-02 -4.2864668710912723E-02  1.3060517235886659E-02
  3.9595475759624717E-02 -1.3349608961518706E-02

25 @ MN
  2   9   1  18
 10   9   2   7
.....
  442  467  381  465
  132  491  108  554

26 @ v
  4.1360036446326933E-11  4.2109155287297754E-11  2.8151655747948268E-11
  3.2156088198748310E-11  3.2504823346865494E-11  2.6357576207576931E-11
.....
  5.1303321718499224E-11  2.9365106894874699E-11  3.5120025353755829E-11
  3.0199678985050928E-11  3.0335557515380564E-11

27 @ TETA(DEG.)
  22.05983925768441      21.23613579983425      25.54793179446724
  27.04048538776981      26.40903424065993      28.24857997252046
.....
  16.73576051523608      23.79545617800713      22.47133902998931
  22.48507495880568      21.39572031461107

28 @ ADMM
  9.7376233647367549E-16  1.1236963083354492E-15  6.6964607212436729E-16

```

FIGURA A3.1 (Cont.) - II

7.5956381310145849E-16	7.6297495802319401E-16	6.2405429107279056E-16
1.1637929002866393E-15	6.9992600262515813E-16	7.5893814541619270E-16
6.9027688599087505E-16	6.4490232027517082E-16	
29 e PWPA		
-0.8987728986072011	-0.8994910949815155	-0.8998241631041738
-0.8972120392566912	-0.8988332228190530	-0.8970716223508901
-0.9001786030559528	-0.8993445476315865	-0.8982434183696958
-0.8992560771458757	-0.9078603003999442	
30 e FN		
1.3785526585669562E-07	-1.8138244153051872E-07	5.7517651868355069E-07
4.7964893604369426E-07	3.7137037707740184E-07	1.0331525269951854E-06
-5.0661493353603912E-07	2.4426359472314668E-07	-3.0654369849869051E-07
-4.1650010511331203E-09	-1.6786268602683184E-07	
31 e FT		
2.3612940013840268E-07	-2.1612152626436407E-07	-5.4642447141234776E-07
-5.3794644038382586E-08	-3.0419064860821826E-07	-2.4548990551854963E-08
-5.9459820956398627E-08	-9.1974203166796281E-08	-2.1519704948173487E-08
1.4552734393718914E-08	3.7968554658205278E-08	
32 e FNSOL		
1.8889389064798059E-06	1.5099367510826178E-06	1.9594054735966250E-06
2.0157813878085387E-06	1.8394079472295256E-06	2.7114019514592725E-06
1.1283735917833222E-06	1.4064790893734045E-06	7.5824522417848030E-07
1.0557876850111505E-06	7.7238187727572379E-07	
33 e FNW		
-1.8161385175173603E-06	-1.6865086535002549E-06	-1.3844063861259991E-06
-1.5363649921248515E-06	-1.4684936340469475E-06	-1.6788694228242504E-06
-1.6278723757339741E-06	-1.2018633676597804E-06	-1.0652862803672299E-06
-1.0739909888834665E-06	-9.7780540704566022E-07	
34 e DELNMAX		
1.3102930787812518E-04	1.1690059054994724E-04	1.2296494656868082E-04
1.2771162945262538E-04	1.1541342527289378E-04	1.8756185490857006E-04
7.1981812130504164E-05	9.0008991444484138E-05	4.7706706465393056E-05
6.5986730313196909E-05	4.8640112857043801E-05	
35 e DELTAS		
3.4397803239736856E-05	-5.7092080205356866E-05	-1.3648540381899780E-04
-1.3396803945363741E-05	-7.6058236010877555E-05	-6.3732747677164718E-06
-1.3503396765675981E-05	-2.0319525434960976E-05	-5.5233506147437607E-06
8.2635264316150831E-06	1.2845653531573374E-05	
36 e POROS XP		
-7.6227285113351404E-03	-7.4349496262464550E-03	1.0524457729373304E-02
-2.1612581813210702E-03	-3.2501956162473674E-02	-1.1614624730924580E-03
2.8077967600385640E-03	-3.9097120577220196E-03	-1.0624286863755937E-02
4.1848058052391067E-02	-3.6638183647344451E-02	0.0000000000000000E+00
37 e YP		
-3.5953675679909923E-02	-4.2182251151784487E-02	1.6079246639647444E-02
4.1594498810639663E-03	-9.3772526753387606E-03	2.2688854041661261E-03
-4.2417414384265243E-02	1.3867407924690946E-02	4.3322413016369324E-02
-1.4641632652863216E-02	2.4020683570530143E-02	0.0000000000000000E+00
38 e IPOR		
1	1	1

FIGURA A3.1 (Cont.) - III

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	3	1	1	1	2	1
1	1	0	1	1	1	1	3	3	3
39 e IKPN									
4	6	3	3	4	3	3	17	4	3
3	3	3	4	3	4	4	3	3	3
3	8	3	4	3	3	5	4	3	8
7	3	0	4	3	3	3	3	3	3
40 e KPN									
1	9	30	31						
2	317	1005	1011	89	90				
935	-531	862							
751	-510	509							
41 e AMAX									
7.4576281051334146E-07	8.7408910074552312E-06	1.6551156339623562E-07							
2.8507988156600478E-07	1.9941222722843221E-06	2.6105432774615879E-07							
2.1115614313910582E-07	2.3327998910959642E-07	1.0533518965228360E-06							
1.0076950276868000E-06	6.8440088841370064E-07	0.0000000000000000E+00							
42 e VMAX									
2.0112519353190662E-08	7.3054374810427087E-08	8.6652583424149935E-09							
9.5631571156228496E-09	2.4144847308512204E-08	9.3845581733661516E-09							
9.0074139145484919E-09	8.7183654995572168E-09	1.2520383845058959E-08							
1.2419966455978275E-08	1.1601249650483725E-08	0.0000000000000000E+00							
43 e APP									
1.000303042262552	0.9913904390487866	0.9988494343442798							
0.9987692046147296	0.9985361931598705	0.9986856358958554							
0.9992975742306601	0.9986744943033756	0.9980172815177019							
0.9998417950121121	0.9983051570929786	0.0000000000000000E+00							
44 e WPP									
1.4685066961545488E-03	1.7657525734908161E-03	1.3601085933931772E-03							
1.3141494971199873E-03	1.4662331834437426E-03	1.3013295850407921E-03							
1.7678148698286289E-03	1.3516329944437693E-03	1.9181226740693657E-03							
1.5649441135417150E-03	1.5903942261227923E-03	0.0000000000000000E+00							
45 e RLICOB									
4.4265675361310542E-02									
			172	329	397	495	292	524	175
			522	552	451	510	543	452	395
120	377	538	71	535	425				201
47 e LICOM									
112									
114	911	910	876	439	640	887	719	871	849
323	776	998	751	509	585	584	1036	1020	846
1029	934								
48 e LICOP									
39									
85	272	340	413	425	441	446	366	440	439
544	464	64	548	156	429	266	144	558	307

FIGURA A3.1 (Cont.) - IV

419	264	560	456	449	323	
49 e	VARIABLES GRIFO					
7.8062780264623974E-13			7.6504398335582736E-13			1.5475215059513234E-11
-1.5475213116063340E-11						
50 e						
8.7350290730074563E-08			7.0100039630021639E-11			1.1518011417000312E-12
-3.0658779720161876E-15						
51 e						
2.0426083107825893E-14			3.8113237770411413E-18			2.6358095002534198E-08
3.6897784063273419E-11						
52 e						
1.9350002440832694E-11			-6.2065006366385053E-14			1.6641177016123143E-11
-1.3661798032065442E-12						
53 e	SUMA MASAS INICIALES					
2.7798530882822881E-08			1.9576069715476329E-14			2.0192090024457192E-08
3.6597204689556223E-15						
54 e	SUMA MASAS SWM, SWP, SAP, SAM					
3.1979144110149912E-08			1.5475679701304145E-11			1.7121786217223471E-08
7.6504398335582117E-13						
55 e	LISTA B.AIS					
0						
56 e	LISTA NP_EMP					
561	553	0				
57 e	LISTA NM_EMP					
0						
58 e	IULTO					
0						
59 e						

FIGURA A3.1.- V

(GX, GY), presión de gas en el contorno (PGCOP), de agua en los meniscos (PWCOM), de tensión (SIG11, SIG22, SIG12, SIG21).

- *Información relativa a las "bolas":* XB, YB, ángulo TB, tipo de partícula (JT), velocidad (XBV, YBV, TBV); energía cinética global (lineal ECINL, y de rotación ECINT); matriz de conectividad MB (ver capítulo 5.3); y radios de los NTTIP tamaños de partícula.

- *Información relativa a los meniscos:* coordenadas (XM, YM); matriz MN (ver capítulo 5.3); volumen o masa del menisco (V); ángulo de mojado (TETA); aire disuelto (ADMM); déficit de presión de agua de cada menisco (PWPA); fuerzas transmitidas a través de ellos, normal total (FN), tangencial total (FT), normal de solape (FNSOL), normal debida al agua (capilar, FW); máximo solape normal (DELNMAX, ver figura 5.19); corrimiento en el sentido tangencial (DELTAS).

- *Información relativa a los poros:* coordenadas (XP, YP); estado del poro (IPOR); conectividad IKPN, KPN (definido capítulo 5.3); área del poro en el plano del modelo, y volumen (AMAX, VMAX); presión del aire y de vapor de agua (APP, WPP).

- *Listas:* de espera de entes "vacíos" (NPEL, NMEL); de entes asociados al contorno (LICOB, LICOM, LICOP); lista de partículas "aisladas" (NAIS).

- *Suma de masas y variables acumulativas* de todos los flujos a través de films, conductos o interfase.

El tamaño del archivo BAL9VAR.DAT se corresponde con el número total de poros, meniscos y partículas que tenga el modelo en un momento determinado: aproximadamente ocupa 1Kbyte (en caracteres ASCII) por cada cuatro entes. Parte de las variables que contiene podrían calcularse a partir del resto (no son imprescindibles), pero se ha preferido guardar información redundante para que el programa de postproceso no tuviera que llevar a cabo cálculos propios de otros módulos

★ **Archivo BAL9CTE.DAT** . (Ver formato en la figura A3.2) Es otro archivo de datos necesario. Contiene los valores de las constantes de flujo. Las variables que en él aparecen se corresponden en valor y significado con las del epígrafe 5.3.1

BAL9CTE.DAT

7.42E-05	'SIGMA '
66400.00	'HENRY '
0.0089	'BETA '
5.0E-05	'CVAP '
2.18E-04	'CFILM '
1.005E-02	'VISCO '
2.0E-05	'DEAD '
1.8E-04	'VISCA '
3.14159265	'PI '
0.5	'FPOISE'
8.206E-02	'RUNIV '
293.16	'TABS '
0.239	'DEWP '
99	

HERCUCTE.DAT

2.6	'DEN '
10.0	'SOLKN '
20.0	'SOLKD '
0.5	'SOLMU '
2.5	'SOLKS '
2.0E-06	'SOLNN '
1.0E-06	'SOLNS '
2.0E-07	'CAMO '
2.4E-13	'TAMO '
99	

FIGURA A3.2.- Ejemplo de archivos que contienen las constantes de flujo (BAL9CTE.DAT), y mecánicas (HERCUCTE.DAT).

* Archivo HERCUCTE.DAT . (Ver formato en la figura A3.2) Es otro archivo de datos necesario. Contiene los valores de los parámetros mecánicos (de contacto y globales): rigideces, amortiguamientos, etc. Se han descrito y cuantificado en el epígrafe 5.3.2. Las variables que en él aparecen se corresponden en valor y significado con las de la lista 5.14.

Al iniciar la ejecución de un programa de ensayo numérico se pregunta al usuario una serie de opciones sobre la escritura de mensajes de atención y sobre la escritura de resultados de tipo "incremental" en el siguiente archivo:

* Archivo BAL9SEL.RES . En él a lo largo de un "run" se va a dejar constancia, cada IWRITE ciclos, de información global del modelo (porosidad, energía cinética, etc.) y de otra (opcional) sobre determinados poros, meniscos y "bolas" de interés. Constituye un poco la historia del "run" para el seguimiento del ensayo. Un ejemplo extractado de su contenido aparece en la figura A3.3.

```

BAL9SEL.RES
TIME ICICLE ECINL/ECINT NTM NTP INMEL INPEL NBAIS/ENEPO GSATU/L11 L22
2.4000000000000000E-03          4800 4.0532982210770122E-11
1.1427333191567592E-11      1118  559 0 2 0
0.5155097789067444          0.1150589892007405
9.1540028025346529E-02      9.0968400044751270E-02
=====
./././
=====
2.5000000000000000E-03          5000 4.0334590237100234E-11
1.1029404230912348E-11      1117  560 1 1 0
0.5154903491790345          0.1150632679024123
9.1539939056733239E-02      9.0968238945794109E-02
    
```

FIGURA A3.3 .- Extracto del archivo BAL9SEL.RES. Para cada instante las cantidades corresponden a las variables indicadas en la primera línea.

Adicionalmente durante un ensayo pueden aparecer mensajes de atención y de error, por pantalla o en el archivo FOR009.DAT; en el archivo FOR011.DAT se guarda información sobre la creación y desaparición de meniscos y poros a lo largo del ensayo. Si el programa no se ejecuta en modo "interactivo" sino en "cola de BATCH" (que es lo usual, dada la duración de algunos "runs"), el anterior esquema queda ligeramente modificado.

2.5 ORGANIZACION GENERAL DEL PROGRAMA.

En el capítulo 5 se han descrito los principios de operación de los programas (epígrafes 5.2 y 5.3). En relación al programa de ensayo numérico, en los puntos 5.3.1 a 5.3.3 se han incluido los organigramas de los módulos que lo integran (figuras 5.13, 5.16, 5.20 y 5.23). Hay que admitir que algunos de los diagramas son simplificados, puesto que la fuerte componente geométrica del problema ha obligado a resolver una amplia casuística de modificaciones geométricas de la conectividad lógica entre los "entes" del modelo. Esto ha llevado a una cierta complejidad y extensión de los algoritmos. Sin embargo se puede obtener información adicional sobre ellos por examen directo de los listados que se incluyen al final del anejo, y también a petición.

2.6 EJEMPLO DE EJECUCION.

En el capítulo 6 se han incluido varios de ellos, con numerosos detalles sobre la ejecución. No parece posible una información (numérica) más detallada por problemas de espacio.

A3.3 DOCUMENTACION DEL SISTEMA EMPLEADO

3.1 ORDENADOR:

Para el desarrollo de los programas se ha contado principalmente con un ordenador VAX-8600, de la casa Digital, velocidad de proceso de 5 Mips, memoria central de 24Mbytes, memoria en disco 1378 Mbytes, sistema operativo VMS, y lenguaje de comandos DCL. Es un ordenador multiusuario, con memoria virtual.

3.2 PERIFERICOS:

Impresoras. Pantallas de caracteres VT. Pantallas gráficas Tektronik 4109 y otras. Plotter Benson 1213. Unidad de cinta magnética para almacenamiento de resultados.

3.3 PROGRAMAS FUENTE:

Al final del anejo se incluyen los listados de los programas. El lenguaje de programación es FORTRAN-VAX (versión 4.5). Básicamente FORTRAN77 más algunas (pequeñas) modificaciones propias del ordenador VAX. Se utilizan operaciones de la "librería" del sistema, comunes (generador de números aleatorios, funciones trigonométricas, etc). Adicionalmente, para el programa de gráficos DIBU, se han usado las subrutinas de la librería de gráficos unificada (LGU), y de la librería de gráficos (LG), desarrolladas en el Centro de Cálculo de la E.T.S.I.C.C. y P.B. Su significado es autoexplicito (DIB\$INITT, DIB\$FINITT, inicio y final del dibujo; DIB\$TWINDO, definición de los límites de la "ventana" de dibujo; DIB\$MOVEA, movimiento del cursor; DIB\$DRAWA, movimiento en dibujo; DIB\$GTEXT, inserción de texto, etc.). Así los programas compilados deben ensamblarse de la siguiente forma (además de con la librería del sistema):

★ **Preproceso:**

- *MENAI5* y *GENAL4*: Sólo.

- *GAPLUS7*: Con *CHEQ* y con *LEC_ES*.
- ★ **Programas de ensayo numérico:**
 - *BTOT5* con *CHEQ*, con *HERCU* y con *LEC_ES*.
- ★ **Postproceso:**
 - *DIBU* con *LEC_ES*, con *LGU*, y con *LG*.

Los "COMMON" no aparecen en la mayor parte de los casos en los listados, incluyéndose automáticamente al compilar, con una sentencia "INCLUDE". El archivo que lo contiene es el "COM.INC", que también está con los listados de los programas, al final del anejo. El mismo proceso se sigue para incluir la precisión de trabajo en los programas (archivo: "PREC.INC"). La precisión es doble para las variables reales. Esto ha sido necesario por el elevado número de operaciones acumulativas que se llevan a cabo en un ensayo, y por dos motivos distintos:

- a) Para las cuestiones geométricas relativas al contacto entre partículas. Si no se usara doble precisión, el error de redondeo en la periferia del modelo (donde las coordenadas absolutas son mayores) podría comprometer el resultado de algunos algoritmos de chequeo. Cuando el número de bolas es grande, el error de redondeo puede no ser despreciable frente al radio de las partículas o frente al (reducido) solape. De todos modos se ha usado para las partículas un *doble* sistema de coordenadas: "finas" y "gruesas". Las variables XBI e YBI contienen el (pequeño) incremento de posición, adicional a XB e YB (absolutas). Sólo cuando XBI ó YBI alcanzan el valor de XUMB, se suma XBI e YBI a XB e YB, instante que se aprovecha para hacer una serie de chequeos en búsqueda de nuevos contactos.
- b) Por otro lado, en simple precisión la (pequeña) magnitud de las masas fluídas en un Δt podría ser *no significativa* frente a la masa de aire existente en un poro, o frente al volumen de agua de un menisco.

3.4 VARIABLES Y SUBROUTINAS:

Adicionalmente a las variables incluidas en los archivos de datos, ya descritas, cabe señalar otras variables importantes:

- RLICOB: Distancia entre la bola más cercana del contorno y el centro del modelo.
- APM(NP): Masa de aire "seco" de los poros.
- WPM(NP): Masa de vapor de agua de los poros.
- VHP(NP): Volumen del poro ocupado por la fase gaseosa.
- DELFI(NP): Espesor del film que recubre las paredes del poro.
- T1(NM): Para cada menisco, ángulo de "mojado" sobre la esfera mayor de las que lo sustentan.
- R1(NM): Radio de curvatura del menisco (hacia el agua).
- Y8(NM): Para cada menisco-contacto, radio de la zona de solape.
- RIA* y RIN*: Variables acumulativas que miden el valor total de las masas fluídas por un determinado tipo de "conducto" (flujo 1, 2 ó 3 según la figura 3.6) desde el inicio del ensayo.
- SW* y SA*: Evalúan la cantidad total de agua en los meniscos y de aire en los poros, en un determinado instante.

Las principales subrutinas han sido vistas en el capítulo 5, cuando se ha comentado la estructura de los módulos. En los mismos programas listados se explica su función principal, en los comentarios iniciales e intermedios con que cuenta cada subrutina. Por este motivo no se va a repetir aquí. A modo de resumen los programas contienen el siguiente número de subrutinas (**propias**) y de líneas (aprox.):

	Subrutinas	Líneas
<i>MENAI5</i>	3	300
<i>GENAL4</i>	4	440
<i>GAPLUS7</i>	0	440
<i>BTOT5</i>	27	1750
<i>CHEQ</i>	31	3600
<i>HERCU</i>	8	550
<i>LEC_ES</i>	5	550
<i>DIBU</i>	15	1800

3.5 MEMORIA UTILIZADA:

Depende del número de "entes" (partículas+meniscos+poros) que se estén tratando en un instante determinado. El archivo principal de datos, como se ha dicho, ocupa aproximadamente un Kbyte por cada cuatro entes. El ordenador usado es de *memoria virtual*, con asignación dinámica de la memoria central. En este sentido es difícil llegar a dimensionar un problema que supere las posibilidades de direccionamiento que ofrece el sistema (varios miles de partículas). Sin embargo llegar a estos niveles de número de entes puede ser prohibitivo por el tiempo de C.P.U. que debería invertirse en los ensayos (de más largo "alcance"), y por el número de "paginaciones" (intercambio de "memoria virtual" - "memoria central"). El programa en su versión actual no es muy "paginador", y en un caso típico con 592 partículas (2219 entes en total) se ocuparon normalmente unos 600 Kbytes de C.P.U., llegándose a 800 en algunos instantes concretos (asociables a las escasas lecturas y escrituras de datos). El número de "paginaciones" fue de 1270 en un "run" de más de dos horas de C.P.U.

A3.4 DOCUMENTACION PARA OPERAR

4.1 INSTRUCCIONES Y MENSAJES PARA EL OPERADOR:

Durante la ejecución no existen mensajes especiales para el operador. Sólo al inicio del "run" los indicados en el apartado 2.4 de este anejo (si es interactivo).

4.2 TIEMPO DE EJECUCION:

El tiempo "unitario" (por ciclo de cálculo), con los esquemas numéricos usados y el ordenador citado son:

$$\begin{aligned} \text{Ciclo de FLUJOS} &: 70 \text{ a } 80 \cdot 10^{-4} \frac{\text{s CPU}}{\text{ciclo y ente}} \\ \text{Ciclo MECANICO} &: 2 \text{ a } 3.5 \cdot 10^{-4} \frac{\text{s CPU}}{\text{ciclo y ente}} \end{aligned}$$

El consumo relativo de la parte mecánica y de la parte de flujos dependerá de la relación de los Δt usados. Estos han sido, con las configuraciones del capítulo 6, de $5 \cdot 10^{-7} \text{s}$ por ciclo de flujo, mientras que el mecánico ha oscilado entre $5 \cdot 10^{-9} \text{s}$ y $1.25 \cdot 10^{-7} \text{s}$.

El tiempo "total" de ejecución de un ensayo depende fundamentalmente de:

- a) del número de entes en juego.
- b) del fenómeno ensayado (si la fase concreta de ensayo conlleva grandes desplazamientos para las partículas o grandes variaciones de los flujos hasta estabilización). Se ha discutido en los capítulos 6.3.2.1 y 6.3.2.2 los criterios para considerar estabilizado un determinado ensayo.
- c) de las características mecánicas de las partículas, especialmente de la rigidez (relacionada con el Δt que se puede usar en el esquema explícito para obtener estabilidad y "ajuste temporal"), y del amortiguamiento.

En términos generales puede decirse que determinados "escalones" de carga (de los incluidos en el capítulo 6) pueden ocupar "sólo" 2 horas de C.P.U., pero

que otros se alargan hasta consumir 40 ó más horas. A título indicativo cabe señalar que el tiempo de C.P.U. consumido en los ensayos numéricos de esta tesis es del orden de las 1000 (mil) horas de C.P.U.

4.3 ERRORES Y RECUPERACION:

Durante la implementación de este nuevo modelo numérico han surgido numerosas interrupciones. Se han resuelto, en la mayoría de los casos, a base de mejoras "ad hoc" de los algoritmos y extensión (ampliación) de los casos por ellos contemplados a nuevas posibilidades. Las mil horas de C.P.U. "ensayadas" han constituido una prueba más, y se puede decir que la mayor parte de las situaciones están previstas (y resueltas) ya en los citados algoritmos. Sin embargo no puede decirse nunca que lo que no ha sucedido no sucederá jamás, y así es posible que en el futuro surjan nuevas situaciones geométricas que obliguen a mejorar los programas.

Algunas interrupciones podrán dar lugar a un final "controlado" del programa (Subrutina STOPAR), con mensajes informativos de dónde y porqué ha surgido la interrupción. Estos mensajes indicarán (indirectamente) la vía de solución. Es interesante resaltar que en algunos casos los funcionamientos anómalos pueden estar directamente relacionados con un mal uso del modelo. Una elección errónea de los parámetros, especialmente del Δt y de los amortiguamientos, puede producir anomalías como las que se incluyen en las figuras A3.4 y siguientes. En la primera de dichas figuras, un Δt excesivo es el responsable de que la bola 8 haya "rebotado" con la número 13, y haya pasado (en un sólo Δt) a solapar a otras. Es un claro efecto de inestabilidad numérica mecánica, y la solución consiste en reducir (bastante) el incremento de tiempo. Una velocidad de carga excesiva puede introducir en el sistema una cantidad de energía desmesurada. Si adicionalmente el amortiguamiento *global* es bajo, el amortiguamiento *de contacto* es incapaz de disipar parte de la energía. La muestra, en una respuesta irreal, "no física", traduce la energía no disipada en energía cinética: *lineal*, en la figura A3.5; y *de rotación*, en la figura A3.6. La solución consiste en reducir la velocidad de carga y aumentar el amortiguamiento global.

En una prueba con las 592 partículas, se redujo el amortiguamiento global bruscamente. La desaparición de las correspondientes fuerzas viscosas "de

golpe”, introdujo un desequilibrio súbito en el conjunto. Tras una serie de oscilaciones se llegó a la situación de la figura A3.7. Evidentemente la prueba se dió por concluída en este punto.

Si son bajos ambos tipos de amortiguamiento (*de contacto y global*), el sistema puede quedarse “vibrando” u oscilando alrededor de una posición de equilibrio (o incluso lejos de ella), de manera inconveniente, dado que no se llegará a situación estabilizada alguna. Esto puede apreciarse en la figura A3.8. Inicialmente, en la subfigura *a* las velocidades son “hacia el interior”, al haberse aplicado un incremento de carga. Los contactos se “comprimen” en exceso, por falta de amortiguamiento adecuado. Pocos ciclos después, el conjunto presenta las velocidades de la subfigura *b* (“hacia el exterior”). Es palpable, con estos ejemplos, la importancia (numérica y física) que tiene el amortiguamiento (relacionado con la rigidez en el contacto y con el Δt a usar) junto con la velocidad de carga, para restituir comportamientos plausibles.

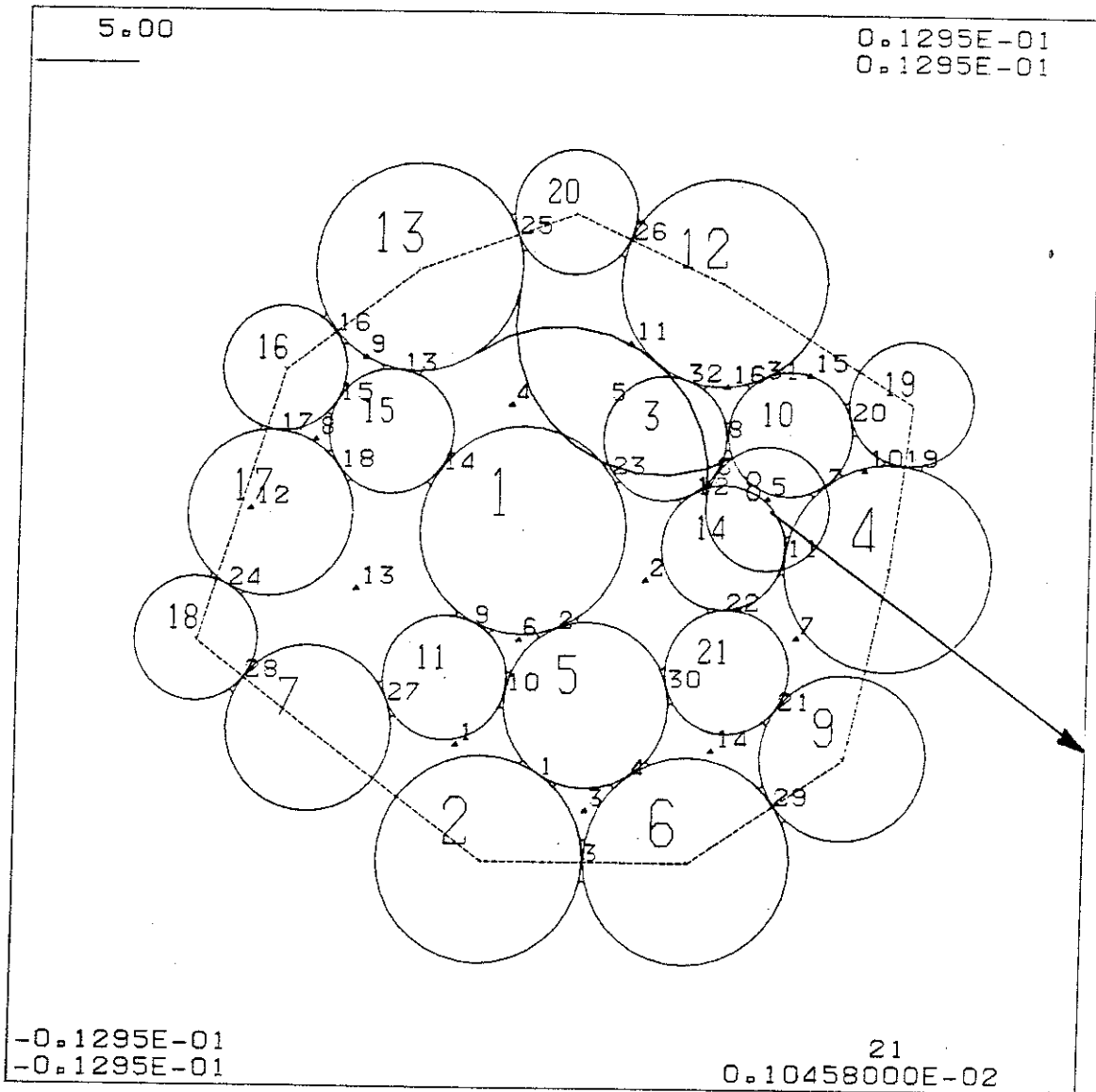


FIGURA A3.4 .- Errores y recuperación.

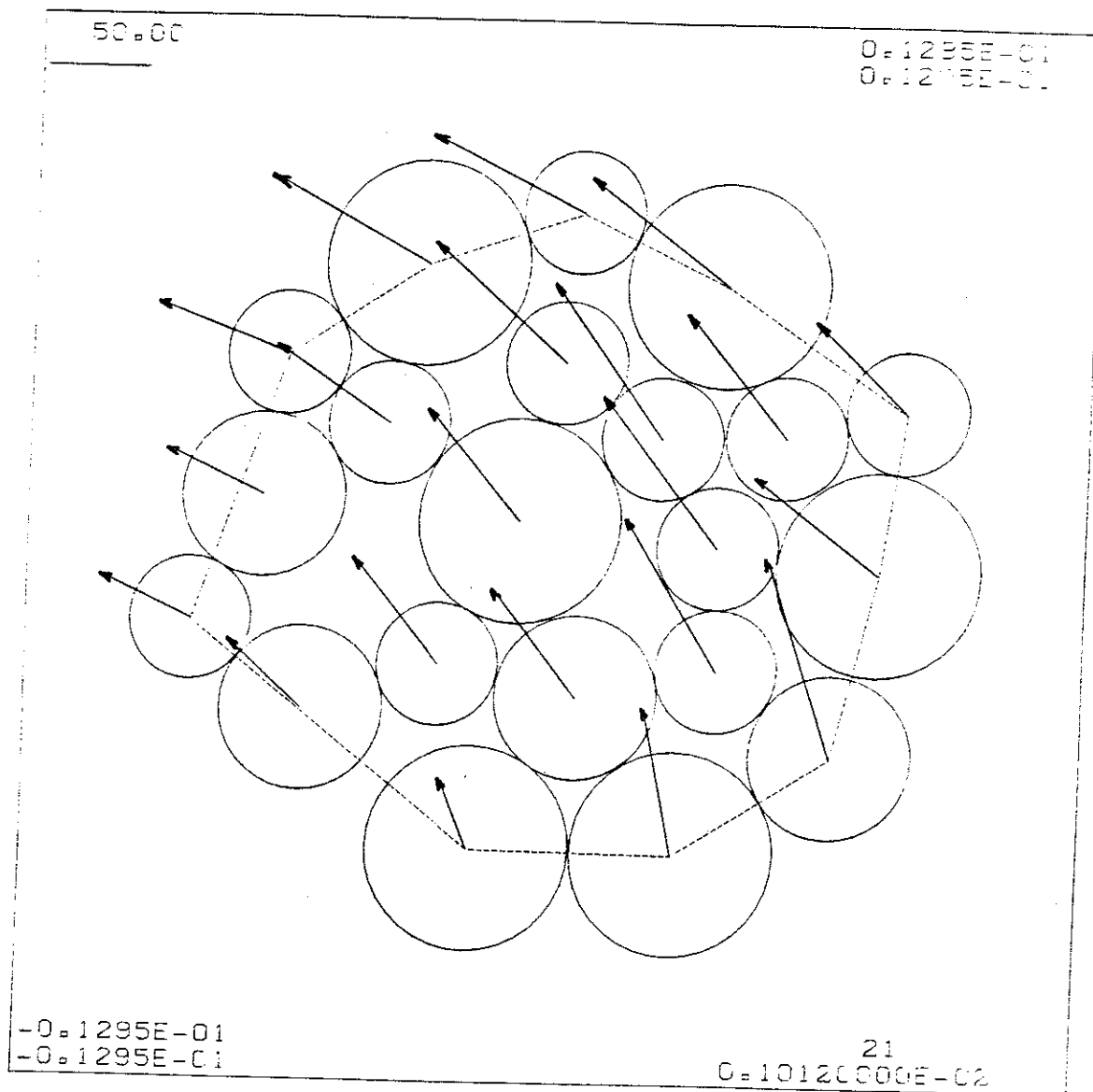


FIGURA A3.5 .- Errores y recuperación.

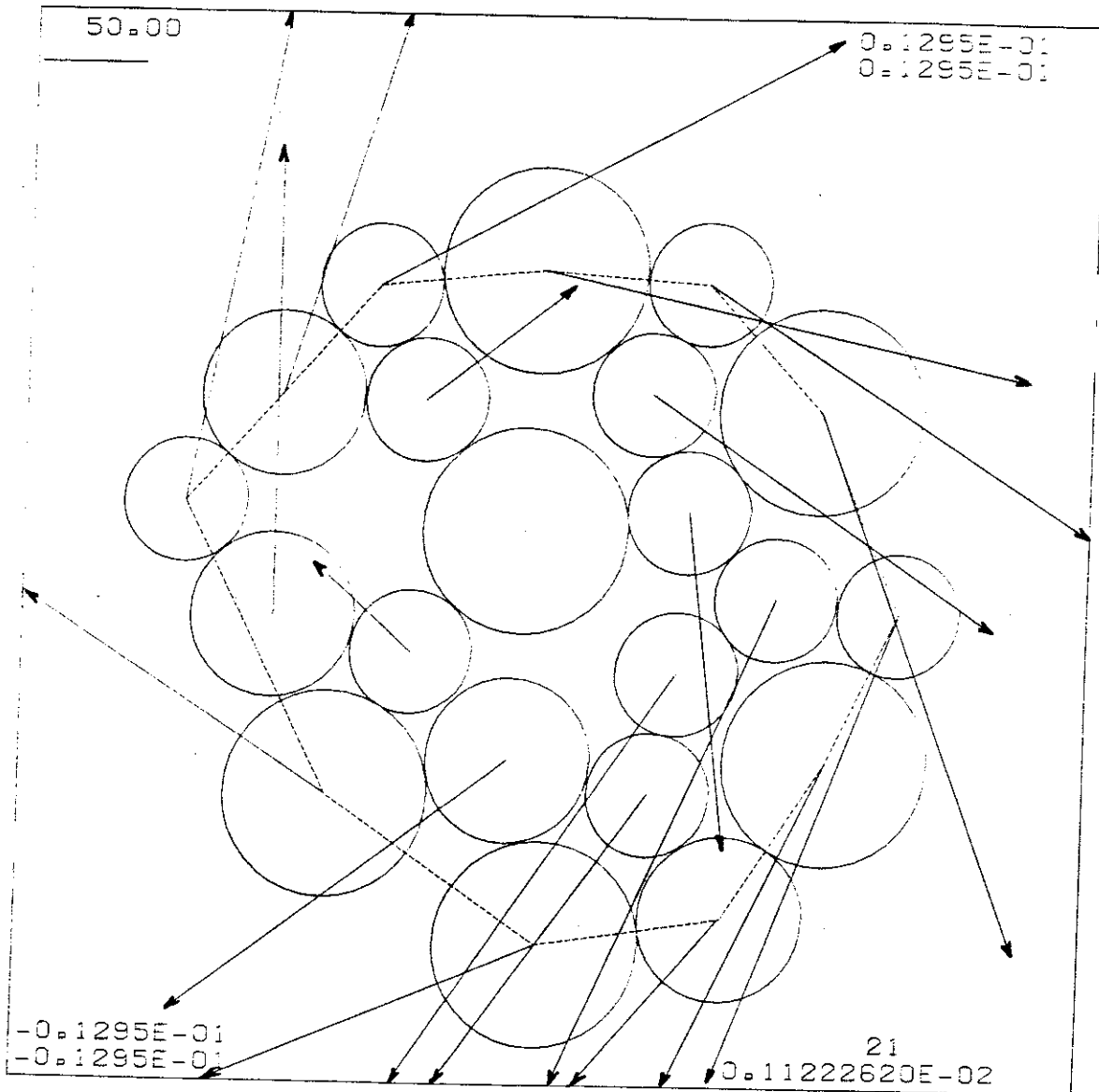


FIGURA A3.6 .- Errores y recuperación.

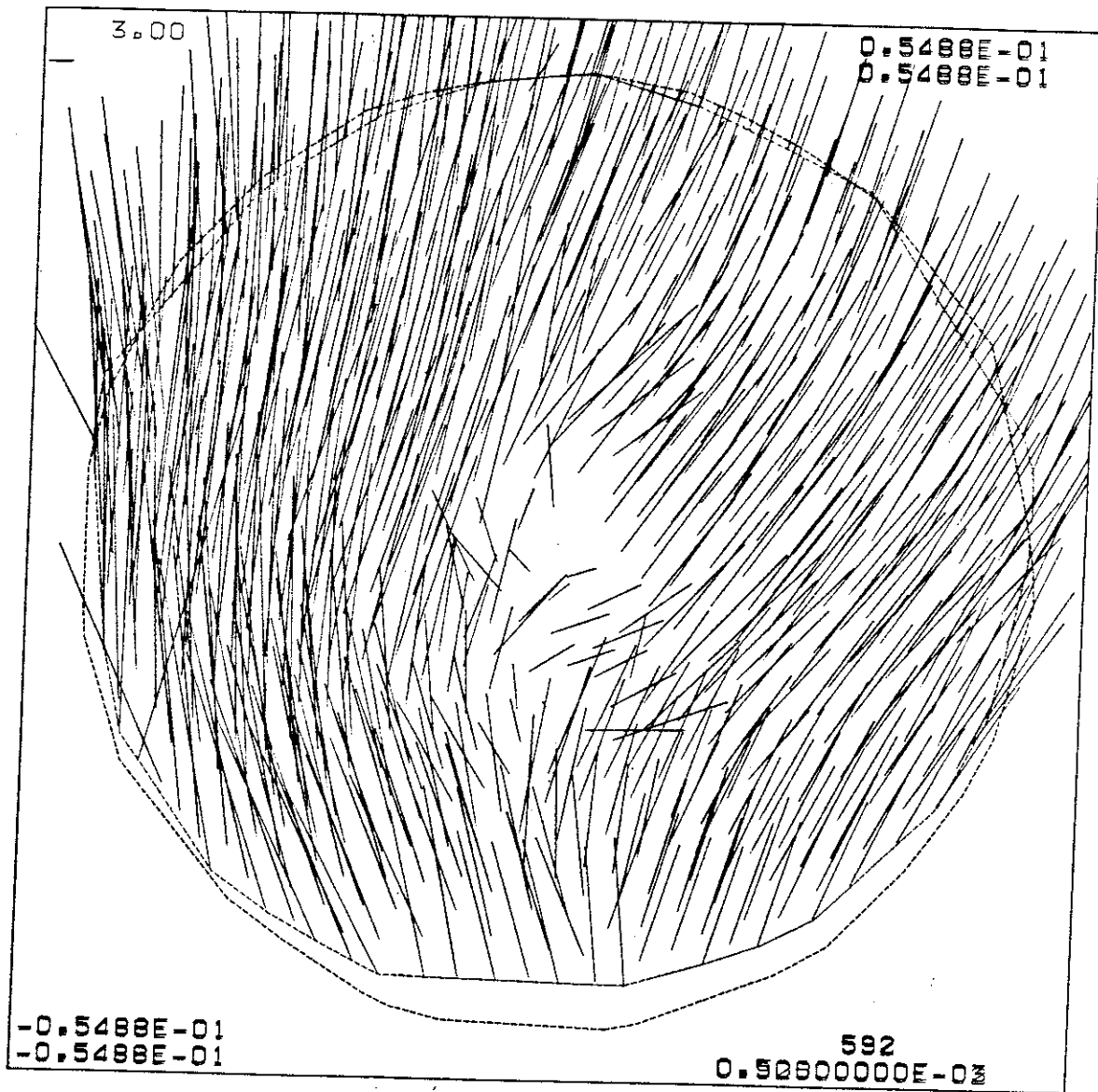


FIGURA A3.7 .- Errores y recuperación.

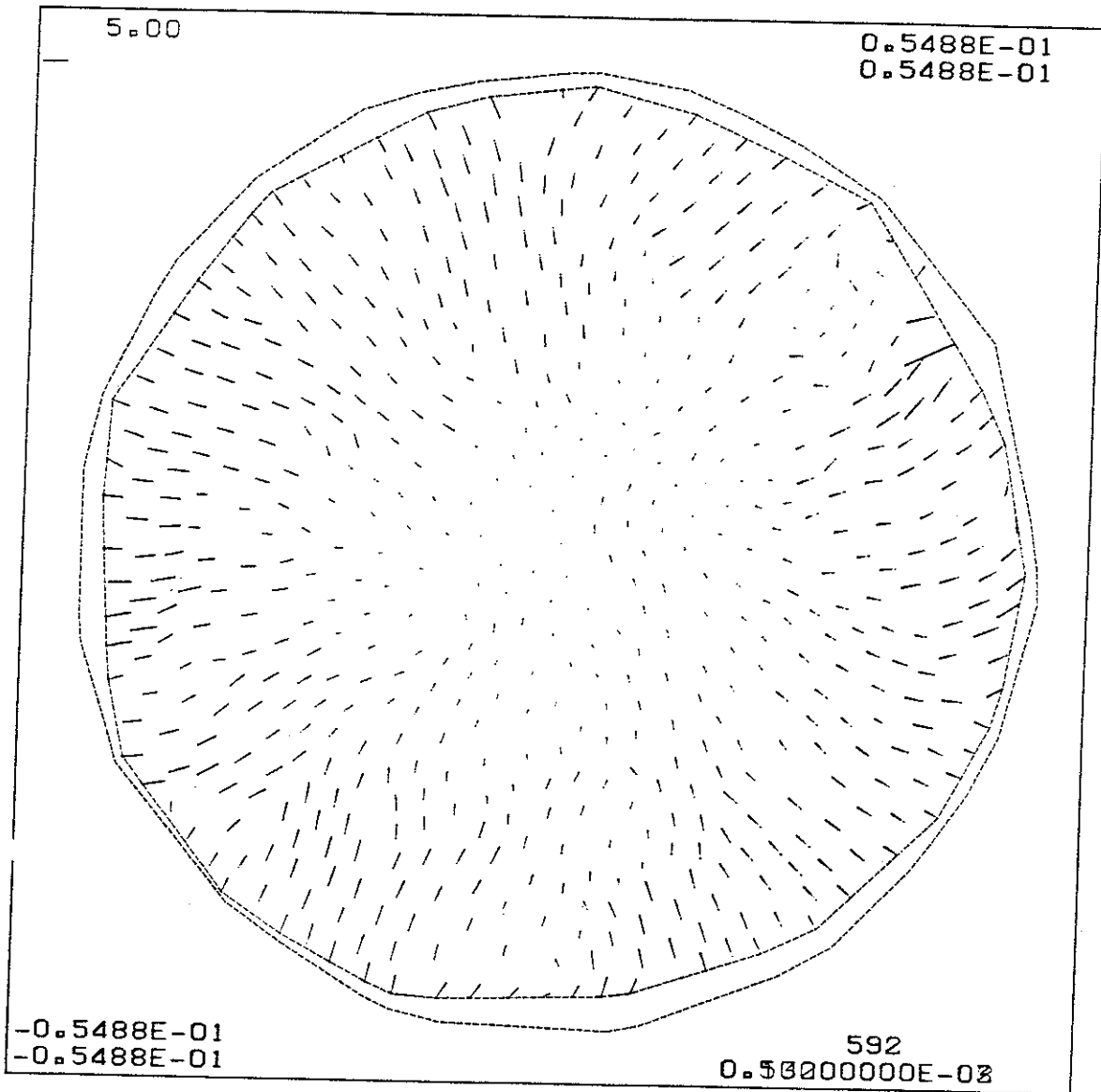


FIGURA A3.8 (a) .- Errores y recuperación.

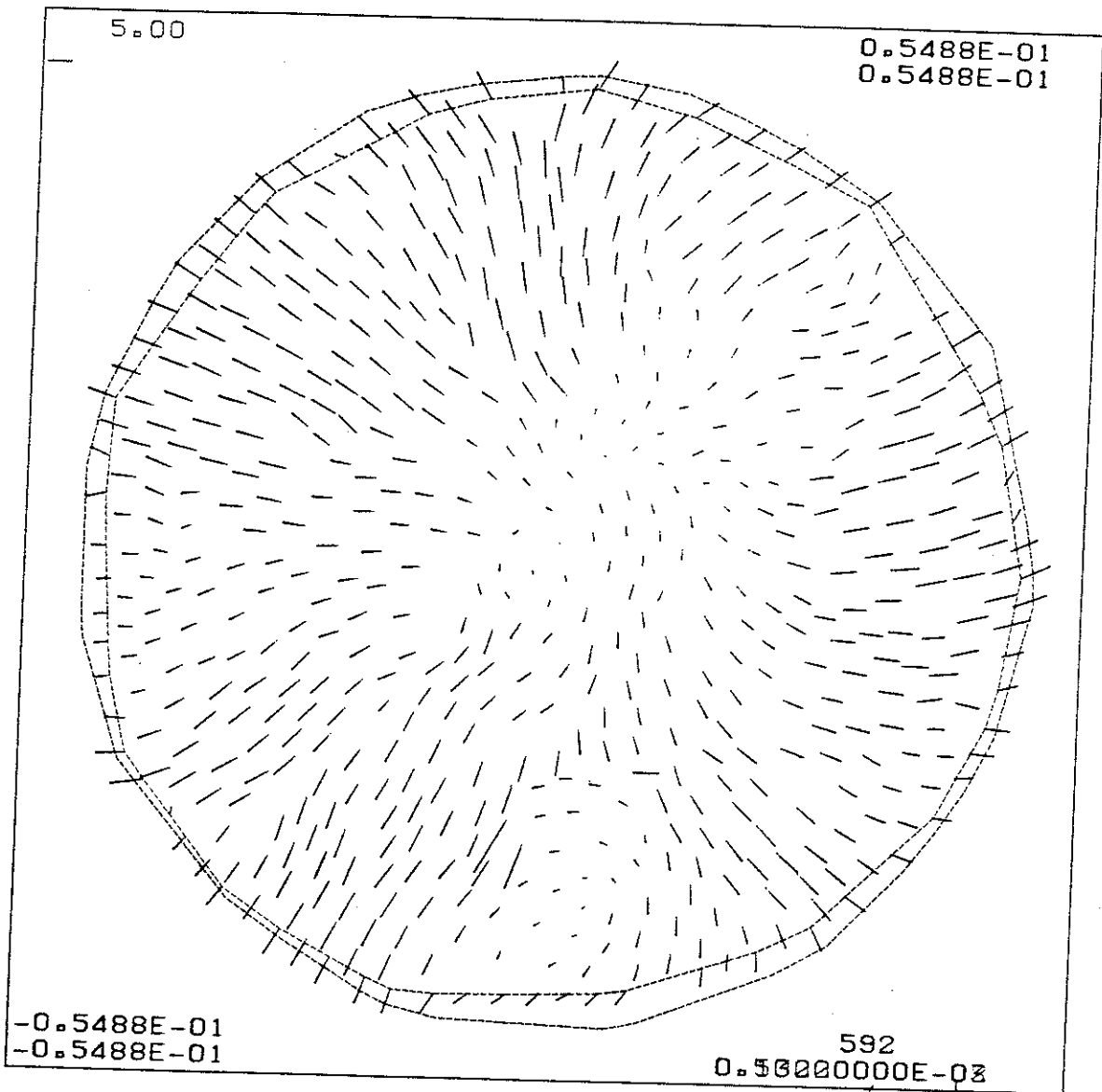


FIGURA A3.8 (b) .- Errores y recuperación.

A3.5 LISTADO DE LOS PROGRAMAS



PROGRAMA MENAIS

**Estudio de un menisco toroidal aislado
Caso generalizado**

```

*****
*****
**
**
**          PROGRAMA MENAIS.FOR
**
*****
*****
**
**          ESTUDIO DE UN MENISCO TOROIDAL AISLADO
**          CASO GENERALIZADO
**          VALORES GEOMETRICOS, FUERZAS Y SUCCION
**
*****
**
**          GEOMETRICOS: RADIOS, VOLUMEN... SE CORRESPONDEN
**          CON LOS CALCULOS SUBROUTINA VOLMEN DE BTOT5.FOR
**          FUERZAS: SE CORRESPONDEN CON CALCULOS DE HERCU.FOR
**          FUERZA DEBIDA A AGUA Y AIRE (2):
**          PWPA(PI*R1*R1-PI*Y8*Y8)-PA*PI*Y8*Y8
**          FUERZA DEBIDA A TENS.SUPERF:
**          -SIGMA*2*PI*R1
**          FUERZA DEBIDO A SOLAPE:
**          Kn*(SOLAPE>0)
**
*****

```

```

IMPLICIT REAL*8 (A-H),(O-Z)

```

C

```

PI=3.14159265

```

C

```

*****
**          SECCION DE ENTRADA INTERACTIVA DE DATOS
**
*****

```

```

WRITE(6,*)' SISTEMA COHERENTE UNIDADES. DATOS :fuerza,long.'
WRITE(6,*)' RESULT: DIMENSIONES: long. long2 long3 '
WRITE(6,*)'          FUERZAS: fuerza TENSIONES:fuerza/long2'
WRITE(6,*)' SI SE UTILIZAN DEFAULTS: fuerza=Kp long=cm.'
WRITE(6,*)' '
WRITE(6,*)' RBOLA1 MAX? (long.)'
READ(5,*)RB1
WRITE(6,*)' RBOLA2 MIN?'
READ(5,*)RB2
GAMA=RB2/RB1
WRITE(6,*)' D[entre sup bolas(+) o solape(-)]?'
READ(5,*)D
ALFA=D/RB2
WRITE(6,*)' SIGMA(fuerza/long)?[=7.42E-05 KP/CM.ENTRAR 0.]'
READ(5,*)SIG
IF(SIG.EQ.0.)SIG=7.42E-05

```

C

C

C

```

SI SE UTILIZA ESTE CONVENIO SE IMPONE UNIDADES KP Y CM.

```

```

WRITE(6,*)' COEFICIENTE SOLAPE Kn (fuerza/long) ?'
READ(5,*)SOLKN

```

C

```

WRITE(6,*)' PRESION gas (fuerza/long2)?'
READ(5,*)PP
PGAS=PP*RB1/SIG
WRITE(6,*)' '

```

C

```

WRITE(6,*)' ADIMENSIONALES SIGNIFICAN:'
WRITE(6,*)' lineales(R1,R2): /Rmax'
WRITE(6,*)' areas(SAL,SAR) : /Rmax2'
WRITE(6,*)' volumen(V) : /Rmax3'
WRITE(6,*)' tensiones(SUC) : *Rmax/Sigma'
WRITE(6,*)' fuerzas(T debida a tension sup)'
WRITE(6,*)' (S debida a succion y aire)'
WRITE(6,*)' (C solape) : /(Sigma*Rmax)'

```

```

*****
**          CALCULO DE TETA.MINIMO Y VOLUMEN MINIMO          **
*****

```

```

X2=1.+GAMA+GAMA*ALFA
IF(ALFA.EQ.0.)THEN
  RMIN=0.
  VMIN=0.
ELSE

```

C

CALCULO DE TMIN SI CASI CONTACTO

```

IF(ALFA.GT.0.)THEN
  RMIN=0.
  Y8=0.
  B=(1.-GAMA)/X2
  A=X2/2.-B*(1.-GAMA)/2.
  C=A-GAMA*B
  G=GAMA
  CG=C*G
  GA=G*G+A*A
  DIS=CG*CG-GA*(C*C-A*A)
  Y=(CG+SQRT(DIS))/GA
  TMIN=ACOS(Y)

```

!CALCULO DE TMIN SI SOBRECONTACTO

```

ELSE
  X8=(X2*X2+1.-GAMA*GAMA)/(2.*X2)
  RMIN=SQRT(1.-X8*X8)
  Y8=RMIN
  TMIN=ATAN(RMIN/(X2-X8))
ENDIF

```

```

50 CALL CALVOL(GAMA,ALFA,TMIN,VMIN)
IF(VMIN.LT.0.)THEN
  WRITE(6,*)' SUMO 0.01 DEG. A TMIN INICIAL'
  TMIN=TMIN+0.01*PI/180.
  GO TO 50
ENDIF
ENDIF

```

C

```

*****
**          ESCRITURA EN PANTALLA DE RESULTADOS PREVIOS          **
*****

```

```

WRITE(6,*)' Y8(contacto con solido) ADIM,DIM',RMIN,RMIN*RB1
WRITE(6,*)' TMIN(CONT.SOLIDO O VMIN_CUASI.CON)',TMIN*180./PI
WRITE(6,*)' VMIN( " " ADIM)',VMIN
WRITE(6,*)' VMIN( " " DIM)',VMIN*RB1*RB1*RB1
WRITE(6,*)' FUERZAS;TENSIONES SE SUPONEN + = APUNTANDO A LA BOLA'
WRITE(6,*)' TETA(DEG, subten. por menisco en esfera Rmin) '

```

C

```

*****
**          INICIO DEL BUCLE DE CALCULOS PARA VARIOS TETA          **
*****

```

```

100 WRITE(6,*)' '
    WRITE(6,*)' teta(fin negativo)?'
    READ(5,*)TET
    TET=TET*PI/180.
    IF(TET.LT.0.) GO TO 900
C
500 CALL CALVOL(GAMA,ALFA,TET,VOL)      !PARA CALCULO DE VOLUMEN
C
40  CALL CALGEOM(GAMA,ALFA,TET,H2R,SAR,SAL,TET1,DT,R1,R2) !GEOMETRIA
C
H2R ES LA -SUCCION ADIMENSIONAL ( PWPA=H2R*SIG/RB1 )
C
T=-2.*R1*PI
S=H2R*(R1*R1-RMIN*RMIN)*pi-PGAS*PI*RMIN*RMIN
C
*****
**          PASO DE LOS RESULTADOS A DIMENSIONALES Y ESCRITURA          **
*****
    VDIM=VOL*RB1*RB1*RB1
    PWPA=H2R*SIG/RB1
    TDIM=T*SIG*RB1
    SDIM=S*SIG*RB1
    IF(D.LT.0.)THEN
    CDIM=-SOLKN*D
    ELSE
    CDIM=0.
    ENDIF
C
    WRITE(6,*)'          R1 Y R2 DEL MENISCO,SAR,SAL (SEMIAREAS)'
    WRITE(6,*)' ADIM',R1,R2,SAR,SAL
    RB9=RB1*RB1
    WRITE(6,*)' DIM',R1*RB1,R2*RB1,SAR*RB9,SAL*RB9
C
    WRITE(6,*)'          VOL          -SUC          S          T
    S+T          C'
    WRITE(6, '(A5,6(1X,E11.4))')' ADIM',VOL,H2R,S,T,S+T,CDIM/(SIG*RB1)
    WRITE(6, '(A5,6(1X,E11.4))')' DIM',VDIM,PWPA,SDIM,TDIM,SDIM+TDIM,
    CDIM
C
GO TO 100
C
900 STOP
END
*****
*****
SUBROUTINE CALVOL(GA,AL,TE,VOL)
*****
** SUBROUTINA PARA HALLAR VOLUMEN ADIMENSIONAL MENISCO GENERALIZADO **
** A PARTIR DE UNA GEOMETRIA (NO INCLUYE CASO DEGENERADO CON PARED) **
*****
C
IMPLICIT REAL*8
C
CALL CALCOR(GA,AL,TE,X1,Y1,X2,Y2,X3,Y3,X4,Y4,X5,Y5,R2,T1,T3)
C
PI=3.14159265
Z6=X4-X3
Z7=X5-X3

```



```
Z1=(Y3*Y3+R2*R2)*(X5-X4)
Z2=(Z7*Z7*Z7-Z6*Z6*Z6)/3.
```

C

```
Z27=R2*R2-Z7*Z7
Z26=R2*R2-Z6*Z6
IF((Z27.LT.0.).OR.(Z26.LT.0.))THEN
  WRITE(6,*)' CALVOL: GEOME. INCOR=> VOL=-1',R2,Z7,Z6
  VOL=-1
  RETURN
ENDIF
```

C

```
Z3=Y3*Z7*SQRT(R2*R2-Z7*Z7)
Z4=Y3*Z6*SQRT(R2*R2-Z6*Z6)
Z5=Y3*T3*R2*R2
VOL3=PI*(Z1-Z2-Z3+Z4-Z5)
VOL2=PI*(GA**3.)*(2./3.-COS(TE)+(COS(TE)**3.)/3.)
VOL1=PI*(2./3.-COS(T1)+(COS(T1)**3.)/3.)
IF(AL.GE.0.)THEN
  VOL4=0.
  VOL5=0.
ELSE
  X8=(X2**2.+1.-GA**2.)/(2.*X2)
  Y8=SQRT(1.-X8**2.)
  T4=ATAN(Y8/(X2-X8))
  T5=ATAN(Y8/X8)
  VOL4=PI*(GA**3.)*(2./3.-COS(T4)+(COS(T4)**3.)/3.)
  VOL5=PI*(2./3.-COS(T5)+(COS(T5)**3.)/3.)
ENDIF
```

C

```
VOL=VOL3-VOL2-VOL1+VOL4+VOL5
```

C

```
WRITE(6,*)' VOL0,3,2,1,4,5',VOL,VOL3,VOL2,VOL1,VOL4,VOL5
IF((VOL3.LT.0.).OR.(VOL2.LT.0.).OR.(VOL1.LT.0.).OR.(VOL4.LT.0.
).OR.(VOL5.LT.0.).OR.(VOL.LT.0.))THEN
WRITE(6,*)' *****ATENCIÓN SIGNOS VOL*****'
ENDIF
```

C

```
IF(R2.LT.0.)THEN
  VOL=-ABS(VOL)
  WRITE(6,*)' GEOMETRIA INCORRECTA.=>-VOL'
ENDIF
```

C

```
RETURN
END
```

```
*****
*****
```

```
SUBROUTINE CALCOR(GA,AL,TE,X1,Y1,X2,Y2,X3,Y3,X4,Y4,X5,Y5,R2,T1,T3)
```

```
*****
** SUBROUTINA CALCULO COORDENADAS LOCALES DEL MENISCO GENER.(LOCALES) **
*****
```

```
IMPLICIT REAL*8
PI=3.14159265
X1=0.
X2=1.+GA+GA*AL
Y1=0.
Y2=0.
```

```

Y3=(X2**2.-(1.-GA)**2.)*SIN(TE)/(2.*(1.-GA+X2*COS(TE)))
X3=X2-Y3/TAN(TE)
R2=SQRT(X3**2.+Y3**2.)-1.
T1=ATAN(Y3/X3)
X4=COS(T1)
Y4=SIN(T1)
X5=X2-GA*COS(TE)
Y5=GA*SIN(TE)
T3=PI-T1-TE

```

C

```

RETURN
END

```

```

*****
*****

```

```

SUBROUTINE CALGEOM(GA,AL,TE,H2R,SAR,SAL,T1,DT,R1,R2)

```

```

*****
**          SUBROUTINA PARA DETERMINAR LA GEOMETRIA DEL MENISCO          **
**          PARA UN ANGULO TETA DETERMINADO                             **
*****

```

```

IMPLICIT REAL*8
PI=3.14159265
CALL CALCOR(GA,AL,TE,X1,Y1,X2,Y2,X3,Y3,X4,Y4,X5,Y5,R2,T1,T3)

```

```

*****
**  CALCULO DE LA -SUCCION ADIM. EN EL "CUELLO DE BOTELLA" MENISCO  **
*****

```

```

R1=Y3-R2
H2R=(1./R1-1./R2)

```

```

*****
**  CALCULO DE LA SEMIAREA RECTA DEL MENISCO(ADIM.)                  **
*****

```

```

A1=X2*Y3/2.
A4=R2*R2*T3/2.
IF(AL.GE.0.)THEN
  A5=0.
  A2=GA*GA*TE/2.
  A3=T1/2.
  Y8=0.
ELSE
  X8=(X2**2.+1.-GA**2.)/(2.*X2)
  Y8=SQRT(1.-X8**2.)
  T4=ATAN(Y8/(X2-X8))
  T5=ATAN(Y8/X8)
  A5=X2*Y8/2.
  A2=(GA**2.)*(TE-T4)/2.
  A3=(T1-T5)/2.
ENDIF
SAR=A1-A2-A3-A4-A5

```

```

*****
**  CALCULO DE LA SEMIAREA LATERAL DEL MENISCO(ADIM.)                **
*****

```

```

SAL=PI*R2*(Y3*T3-R2*(COS(TE)+COS(T1)))
DT=(X2-GA+1.)/2.

```

C

```

IF(Y8.GT.R1)THEN

```

```
WRITE(6,*)' P.E.: Y8SOL>R1MEN:',Y8,R1  
ENDIF
```

C

```
RETURN  
END
```

```
*****  
*****
```


PROGRAMA GENAL4

Generación aleatoria de conjuntos circulares de partículas

```
*****
*****
**
**
**
PROGRAMA GENAL4.FOR
**
**
*****
*****
**
**
GENERACION ALEATORIA DE CONJUNTOS CIRCULARES DE PARTICULAS
**
**
CON POROSIDADES INICIALES VARIABLES
**
**
*****
**
**
EN EL ARCHIVO GENAL4.DAT SE ESPECIFICAN LAS FRACCIONES
**
**
GRANULOMETRICAS DE PARTIDA, Y LOS PARAMETROS DE GENERACION:
**
**
TGIR, RMAX, TRIES, RTRAV.
**
**
LAS BOLAS SE GENERAN EN UN PUNTO ALEATORIO INTERIOR A RMAX,
**
**
SIN SOLAPAR A LAS EXISTENTES.
**
**
SE CALCULA SI DENTRO DE UNA DISTANCIA LIMITADA POR RTRAV,
**
**
Y EN UNA DIRECCION ALEATORIA, LA BOLA CONTACTA A OTRA.
**
**
SI CONTACTA: SE PERMITE UN GIRO COMO MAXIMO DE +- TGIR
**
**
HASTA ESTABLECIMIENTO DE UN SEGUNDO CONTACTO (SI LO HAY)
**
**
SI NO CONTACTA: SE GENERA AISLADA EN EL PUNTO ORIGINAL
**
**
TRAS CONTROLES OPORTUNOS SE VIERTEN RESULTADOS EN GENAL4.RES
**
**
*****
*****
```

```
C
PARAMETER(NBMAX=10000)
PARAMETER(NMMAX=25000)
PARAMETER(MBDIM=40)
PARAMETER(KPDIM=35)
```

```
C
IMPLICIT REAL*8 (A-H),(O-Z)
```

```
C
DIMENSION XB(NBMAX), YB(NBMAX), IB(NBMAX), MB(NBMAX, MBDIM),
.
XM(NMMAX), YM(NMMAX), MN(NMMAX, 4)
```

```
C
CALL GENALSUB4(NBMAX, NMMAX, MBDIM, XB, YB, IB, MB, XM, YM, MN)
```

```
C
STOP
END
```

```
*****
*****
SUBROUTINE GENALSUB4(NBMAX, NMMAX, MBDIM, XB, YB, IB, MB, XM, YM, MN)
```

```
*****
**
SUBROUTINA DONDE SE LLEVA A CABO LA GENERACION
**
*****
```

```
C
IMPLICIT REAL*8 (A-H),(O-Z)
```

```
C
DIMENSION XB(NBMAX), YB(NBMAX), IB(NBMAX), MB(NBMAX, MBDIM),
.
XM(NMMAX), YM(NMMAX), MN(NMMAX, 4)
```

```
C
DIMENSION NFRAC(10), RB(10), NMEM(10)
REAL*8 PI
INTEGER*4 IRAN
```

```

C
OPEN(UNIT=1, FILE='GENAL4.DAT', STATUS='OLD')
READ(1,*)NTB,NTFRAC,TGI,RMAX,TRIES,RTRAV
IF(NTB.GT.NBMAX)THEN
  WRITE(6,*)' EXCESIVAS PARTICULAS ',NTB,NBMAX
  STOP
ENDIF
IF(NTFRAC.GT.10)THEN
  WRITE(6,*)' EXCESIVAS FRACCIONES ',NTFRAC, '10'
  STOP
ENDIF
DO I=1,NTFRAC
READ(1,*)NFRAC(I),RB(I)
ENDDO
CLOSE(1)

C
IRAN=999999999
PI=3.14159265
TGIR=TGI*PI/180.

C
C
C
COLOCACION DE LA PRIMERA PIEDRA

CALL SELT(NTB,NFRAC,ITIP,IRAN) !SELECCION ALEATORIA TAMA/O
NDOUBLE=0
NBAIS=0
NM=0
NB=1
CALL SELX(RMAX,X0,Y0,IRAN) !SELECCION ALEATORIA X Y
XB(NB)=Y0
YB(NB)=X0
IB(NB)=ITIP
NMEM(ITIP)=NMEM(ITIP)+1

C
HLTRAV=RTRAV*RMAX !MAX. LONGITUD BUSQUEDA NUEVOS CONTACTOS

C
*****
** INICIO DEL BUCLE DE GENERACION **
*****
100 CONTINUE
NTRIE=0 !MAX. NRO. INTENTOS
FNB=FLOAT(NB)
MAXT=INT(TRIES*FNB)+1
IF(MAXT.LT.10)MAXT=10
150 NTRIE=NTRIE+1
IF(NTRIE.GT.MAXT)GO TO 900 !SI SE SUPERA MAXT, FIN GENAL4

C
CALL SELT(NTB,NFRAC,ITIP,IRAN)
C
CALL SELX(RMAX,X0,Y0,IRAN)
C
TETA=RAN(IRAN)*2.*PI !SELECCION DIREC. ALEATORIA
C
A=SIN(TETA)
B=-COS(TETA)
C=-A*X0-B*Y0
HLMIN=HLTRAV
NCON=0

C
*****
** CONTROL DE SOLAPE CON LAS EXISTENTES Y DE NUEVOS CONTACTOS **

```

** EN LA DIRECCION ALEATORIA **

```
DO 200 I=1,NB
X1=XB(I)
Y1=YB(I)
DCON=RB(ITIP)+RB(IB(I))
DB=SQRT((X0-X1)**2.+(Y0-Y1)**2.)
IF(DB.LT.DCON)GO TO 150
IF(DB.GT.(HLMIN+DCON))GO TO 200
```

C

```
D=ABS(A*X1+B*Y1+C)
IF(D.GT.DCON)GO TO 200
AE=1.+A*A/(B*B)
BE=2.*Y1*A/B-2.*X1+2.*A*C/(B*B)
CE=X1*X1+Y1*Y1-DCON*DCON+2.*Y1*C/B+C*C/(B*B)
DISC=BE*BE-4.*AE*CE
IF(DISC.LT.0.)THEN
  WRITE(6,*)' DISCRIMINANTE NEG.=> 0: ',DISC
  WRITE(6,*)'X1 Y1 D DCON A B C AE BE CE TETA X0 Y0'
  WRITE(6,*)X1,Y1,D,DCON,A,B,C,AE,BE,CE,TETA,X0,Y0
  DISC=0.
ENDIF
DISC=SQRT(DISC)
HL1=(-BE+DISC)/(2.*AE)-X0/(-B)
HL2=(-BE-DISC)/(2.*AE)-X0/(-B)
```

C

```
IF((HL1.LT.0.).AND.(HL2.LT.0.))GO TO 200
IF((HL1.LT.0.).OR.(HL2.LT.0.))THEN
  WRITE(6,*)' ATENCION: SIGNOS NO CONTEMPLADOS',HL1,HL2
  STOP
ENDIF
IF(HL2.LT.HL1)HL1=HL2
IF(HL1.LE.HLMIN)THEN
  HLMIN=HL1
  NCON=I
ENDIF
200 CONTINUE
```

C

```
NGIR=0
IF(NCON.EQ.0)THEN
  XPROV2=X0
  YPROV2=Y0
  GO TO 350
ENDIF
```

C

```
XPROV=HLMIN*(-B)+X0
YPROV=HLMIN*A+Y0
XPROV2=XPROV
YPROV2=YPROV
```

C

* CONTROL DE SEGUNDO NUEVO CONTACTO GIRANDO SOBRE LA PRIMERA CONTACTADA*

```
AGIR=PI
DO 300 I=1,NB
IF(I.EQ.NCON)GO TO 300
D=SQRT((XB(NCON)-XB(I))**2.+(YB(NCON)-YB(I))**2.)
DCON=RB(IB(NCON))+RB(IB(I))+2.*RB(ITIP)
IF(D.GT.DCON)GO TO 300 !NO LO HABRA CON LA I
CALL TRES(XB(NCON),YB(NCON),RB(IB(NCON)),
```



```

      .           XB(I),YB(I),RB(IB(I)),
      .           XPROV,YPROV,RB(ITIP),
      .           X,Y,ALFA,TGIR)
      IF(ALFA.LT.0.)GO TO 300
      IF(ALFA.GT.AGIR)GO TO 300
      AGIR=ALFA
      NGIR=I
      XPROV2=X
      YPROV2=Y
300    CONTINUE
C
      R0=SQRT(XPROV2*XPROV2+YPROV2*YPROV2)
      IF(R0.GT.RMAX)GO TO 150
C
*****
** CONTROL FINAL DE QUE LA BOLA EN GENERACION NO SOLAPA CON ANTERIORES *
*****
C
      DO 210 I=1,NB
      X1=XB(I)
      Y1=YB(I)
      DCON=0.9999*RB(ITIP)+RB(IB(I))
      DB=SQRT((XPROV2-X1)**2.+(YPROV2-Y1)**2.)
      IF(DB.LT.DCON)THEN
          IBAD=IBAD+1
          GO TO 150
      ENDIF
210    CONTINUE
C
350    NB=NB+1
      IF(NB.GT.NBMAX)THEN
          WRITE(6,*)' SUPERADO EL DIMENSIONAMIENTO: ',NB,NBMAX
          STOP
      ENDIF
                                                    IC3
C
*****
** ASIGNACION DEFINITIVA NUEVA PARTICULA GENERADA Y DE SUS CONTACTOS **
**      MN: MATRIZ CONECTIVIDAD DE LOS MENISCOS **
**      MB: MATRIZ CONECTIVIDAD DE LAS PARTICULAS **
*****
      XB(NB)=XPROV2
      YB(NB)=YPROV2
      IB(NB)=ITIP
      NMEM(ITIP)=NMEM(ITIP)+1
C
C
C      WRITE(6,*)NB,XPROV2,YPROV2,ITIP
C
      IF(NCON.EQ.0)THEN
          GO TO 100
      ENDIF
C
400    MB(NB,1)=NM+1
      NM=NM+1
      IF(NM.GT.NMMAX)THEN
          WRITE(6,*)' EXCESIVOS MENISCOS ',NM,NMMAX
          STOP
      ENDIF
      DO I=1,MBDIM
      IF(MB(NCON,I).EQ.0)THEN
          MB(NCON,I)=NM

```

```

        GO TO 500
    ENDIF
    IF(I.EQ.MBDIM)WRITE(6,*)' DEMASIADOS MENISCOS SOBRE BOLA',NCON
    ENDDO
500    AK=RB(ITIP)/(RB(ITIP)+RB(IB(NCON)))
        XM(NM)=AK*XB(NCON)+(1.-AK)*XB(NB)
        YM(NM)=AK*YB(NCON)+(1.-AK)*YB(NB)
        MN(NM,1)=NCON
        MN(NM,2)=NB
C
        IF(NGIR.NE.0)THEN
            MB(NB,2)=NM+1
            NCON=NGIR
            NGIR=0
            NDOBLE=NDOBLE+1
            GO TO 400
        ENDIF
C
        GO TO 100
C
900    CONTINUE
C
*****
** LA IDENTIFICACION DE LOS POROS ENMARCADOS POR LAS NTB PARTICULAS **
** GENERADAS SE LLEVA A CABO EN EL PROGRAMA GAPLUS7.FOR **
*****
** IDENTIFICACION BOLAS AISLADAS **
*****
        DO I=1,NB
            IF(MB(I,1).EQ.0)NBAIS=NBAIS+1
        ENDDO
C
*****
** ESCRITURA DE RESULTADOS **
*****
        OPEN(UNIT=2,FILE='GENAL4.RES',STATUS='NEW')
        WRITE(2,*)'      NB nbais  NBSSEL  NTFRAC      TGI      RMAX
        TRIES  RTRAV'
        WRITE(2,*)NB,nbais,NTB,NTFRAC,TGI,RMAX,TRIES,RTRAV
        WRITE(2,*)'      I      RADIO      NRO.TEO.(REL.)  NRO.REAL.'
        DO I=1,NTFRAC
            WRITE(2,*)I,IB(I),NFRAC(I),NMEM(I)
        ENDDO
        WRITE(2,*)' NRO.MENISCOS-CONTACTO      NRO.DOBLER'
        WRITE(2,*)NM,NDOBLE
        WRITE(2,*)(XB(I),I=1,NB)
        WRITE(2,*)(YB(I),I=1,NB)
        WRITE(2,*)(IB(I),I=1,NB)
        DO KB=1,NB
            WRITE(2,*)(MB(KB,J),J=1,MBDIM)
        ENDDO
        DO J=1,4
            WRITE(2,*)(MN(I,J),I=1,NM)
        ENDDO
        WRITE(2,*)(XM(I),I=1,NM)
        WRITE(2,*)(YM(I),I=1,NM)
        CLOSE(2)
C
        WRITE(6,*)' NRO. GENERACIONES DESESTIMADAS POR IBAD: ',IBAD

```

RETURN
END

C

SUBROUTINE SELT(NTB,NFRAC,ITIP,IRAN)

** SELECCIONA ALEATORIAMENTE UN TAMA/O DENTRO DE LA GRANULOMETRIA *

DIMENSION NFRAC(10)
INTEGER*4 IRAN

C

N=IFIX(RAN(IRAN)*NTB)+1
NSUM=0
DO I=1,10
NSUM=NSUM+NFRAC(I)
IF(N.LE.NSUM)THEN
ITIP=I
GO TO 900
ENDIF
ENDDO
900 RETURN
END

C

SUBROUTINE SELX(SPAN,X,Y,IRAN)

** SELECCIONA ALEATORIAMENTE X, Y DE GENERACION DENTRO RMAX **

C

INTEGER*4 IRAN
REAL*8 X,Y,SPAN,R
50 X=2.*SPAN*RAN(IRAN)-SPAN
Y=2.*SPAN*RAN(IRAN)-SPAN
R=SQRT(X*X+Y*Y)
IF(R.GT.SPAN)GO TO 50

C

RETURN
END

C

SUBROUTINE TRES(X1,Y1,R1,X2,Y2,R2,X3,Y3,R3,X,Y,ALFA,TGIR)

** CALCULA LA POSICION DE TANGENCIA COMUN (4) DE UNA BOLA DE RADIO R3 *
** Y SITUACION PROVISIONAL 3 CON OTRAS DOS (1 Y 2), CALCULANDO EL *
** ANGULO DE GIRO, ALFA, SOBRE LA 1. SI ALFA < TGIR CALCULA LAS *
** COORDENADAS DEL CENTRO SOLUCION X,Y *

IMPLICIT REAL*8 (A-H),(O-Z)
REAL*8 PI
PI=3.14159265
D24=R2+R3

```

D13=R1+R3
D12=SQRT((X1-X2)**2.+(Y1-Y2)**2.)
ESCA=(X2-X1)*(X3-X1)+(Y2-Y1)*(Y3-Y1)
ESCAP=ESCA/(D12*D13)
IF(ABS(ESCAP).GT.1.)THEN
  IF(ABS(ESCAP).GT.1.001)THEN
    WRITE(6,*)' ERROR EN ACOS; ESCAP= ',ESCAP
    WRITE(6,*)'X1,Y1,R1,X2,Y2,R2,X3,Y3,R3,X,Y,ALFA,TGIR'
    WRITE(6,*)X1,Y1,R1,X2,Y2,R2,X3,Y3,R3,X,Y,ALFA,TGIR
    STOP
  ENDIF
  IF(ESCAP.GT.0.)THEN
    T312=0.
  ELSE
    T312=PI
  ENDIF
ELSE
  T312=ACOS(ESCAP)      !ANGULO EN 1 ENTRE CENTROS 3 Y 2
ENDIF

```

C

```

ESCAP2=(D13*D13+D12*D12-D24*D24)/(2.*D13*D12)
IF(ABS(ESCAP2).GT.1.)THEN
  IF(ABS(ESCAP2).GT.1.001)THEN
    WRITE(6,*)' ERROR EN ACOS; ESCAP2= ',ESCAP2
    WRITE(6,*)'X1,Y1,R1,X2,Y2,R2,X3,Y3,R3,X,Y,ALFA,TGIR'
    WRITE(6,*)X1,Y1,R1,X2,Y2,R2,X3,Y3,R3,X,Y,ALFA,TGIR
    STOP
  ENDIF
  IF(ESCAP2.GT.0.)THEN
    TETA=0.
  ELSE
    TETA=PI
  ENDIF
ELSE
  TETA=ACOS(ESCAP2)    !ANGULO EN 1 ENTRE CENTROS 4 Y 2
ENDIF

```

C

```

ALFA=T312-TETA      !ANGULO EN 1 ENTRE CENTROS 3 Y 4
IF(ALFA.GT.TGIR)THEN
  ALFA=-ALFA
  GO TO 900
ENDIF

```

C
C
C

CALCULO DE X,Y DADO QUE ALFA<TGIR

200

```

IF(X3.EQ.X1)THEN
  ACIM13=PI/2.
  GO TO 200
ENDIF
ACIM13=ATAN((Y3-Y1)/(X3-X1))
IF(ACIM13.LT.0.)ACIM13=ACIM13+PI
IF(Y3.LT.Y1)ACIM13=ACIM13+PI
AC1=ACIM13-ALFA
IF(AC1.LT.0.)AC1=AC1+2.*PI
AC2=ACIM13+ALFA
IF(AC2.GT.(2.*PI))AC2=AC2-2.*PI
X=X1+D13*COS(AC1)
Y=Y1+D13*SIN(AC1)
XS2=X1+D13*COS(AC2)
YS2=Y1+D13*SIN(AC2)

```

```
DS1=SQRT((X-X2)**2.+(Y-Y2)**2.)
DS2=SQRT((XS2-X2)**2.+(YS2-Y2)**2.)
DS1L=DS1/D24
DS2L=DS2/D24
IF(DS1L.GT.DS2L)THEN
  X=XS2
  Y=YS2
  DS1L=DS2L
ENDIF
IF((DS1L.GT.1.01).OR.(DS1L.LT.0.99))THEN
  WRITE(6,*)'ERROR EN DSL: NO PERTENECE A 1.01-0.99'
  WRITE(6,*)' DS1L ',DS1/D24,' DS2L ',DS2/D24
  WRITE(6,*)' LA DEFINIT. ES LA MENOR DE LAS DOS'
ENDIF
900 RETURN
END
```

```
*****
*****
```


PROGRAMA GAPLUS7

Identificación de poros y estado inicial

```

*****
*****
**
**
**          PROGRAMA GAPLUS7.FOR
**
*****
*****
**
**          IDENTIFICACION DE LOS POROS TRAS GENERACION
**          Y DEFINICION DEL ESTADO INICIAL
**
*****
**
**          PROGAMA POSTPROCESO DE GENAL4 (GENERACION ALEATORIA)
**          A PARTIR DE LOS DATOS DEL ARCHIVO GENAL4.RES
**          (PARTICULAS, CONTACTOS Y CONECTIVIDAD):
**          .ORDENA LAS MATRICES DE CONECTIVIDAD SEGUN CONVENIOS
**          .IDENTIFICA Y DEFINE LOS POROS
**          .DEFINE CONTORNO (BOLAS,MENISCOS Y POROS)
**          .DEFINE VOLUMENES INICIALES DE AGUA A CADA MENISCO
**          .DEFINE APROX. ANGULO MENISC. SOBRE BOLA MENOR
**          .DEFINE SUCCION, PRESION DE AIRE, LOS TIEMPOS INICIALES, ETC.
**          UTILIZA EL MISMO ARCHIVO/"INCLUDE" QUE LOS PROGRAMAS BTOT5
**
*****

```

```

C          INCLUDE 'COM.INC'
C
C          DIMENSIONES ACCESORIAS
C
C          DIMENSION ACIM(MBDIM),IJ(MBDIM)
C          DIMENSION NFRAC(10),NMEM(10)
C
C          IRAN=99999999
C          PI=3.14159265
C
*****
**          SECCION DE LECTURA DE LOS DATOS RESULTANTES DE GENAL4
**
*****
C          OPEN(UNIT=1,FILE='GENAL4.RES',STATUS='OLD')
C
C          READ(1,1)A80
1          FORMAT(A80)
C
C          READ(1,*)NTB,NBAIS,NBSEL,NTTIP,TGI,RMAX,TRIES,RTRAV
C
C          IF(NTB.GT.NBMAX)THEN
C            WRITE(6,*)' EXCESIVAS PARTICULAS ',NTB,NBMAX
C            STOP
C          ENDIF
C          IF(NTTIP.GT.10)THEN
C            WRITE(6,*)' EXCESIVAS FRACCIONES ',NTTIP,' 10'
C            STOP
C          ENDIF
C          READ(1,1)A80
C          DO I=1,NTTIP
C            READ(1,*)J,TR(I),NFRAC(I),NMEM(I)
C          ENDDO
C          READ(1,1)A80
C          READ(1,*)NTM,NDOBLE
C          IF(NTM.GT.NMMAX)THEN

```



```
WRITE(6,*)' EXCESIVOS MENISCOS ',NTM,NMMAX
STOP
```

```
ENDIF
```

C

```
READ(1,*)(XB(I),I=1,NTB)
READ(1,*)(YB(I),I=1,NTB)
READ(1,*)(JT(I),I=1,NTB)
```

C

```
DO NB=1,NTB
READ(1,*)(MB(NB,J),J=1,MBDIM)
ENDDO
```

C

```
DO J=1,4
READ(1,*)(MN(I,J),I=1,NTM)
ENDDO
```

C

```
READ(1,*)(XM(I),I=1,NTM)
READ(1,*)(YM(I),I=1,NTM)
```

C

```
CLOSE(1)
```

C

```
*****
** SECCION DE RENUMERACION DE MB(): ORDEN CORRELATIVO **
** ANTIHORARIO DESDE POSICION MAS LEJANA DEL ORIGEN **
*****
```

```
DO 100 I=1,NTB
IF(MB(I,1).EQ.0)GO TO 100 !BOLA AISLADA
CALL ACIM12(0.,0.,XB(I),YB(I),ACIM0)
DO J=1,MBDIM
IJ(J)=MB(I,J)
IF(IJ(J).EQ.0)GO TO 110
CALL ACIM12(XB(I),YB(I),XM(IJ(J)),YM(IJ(J)),ACIM(J))
ACIM(J)=ACIM(J)-ACIM0
IF(ACIM(J).LT.0.)ACIM(J)=ACIM(J)+2.*PI
```

```
ENDDO
```

```
110 IJT=J-1 !NRO. MENISCOS
```

```
IMB(I)=IJT
```

```
120 J=J-1
```

```
DO K=1,J-1
```

```
IF(ACIM(K).GT.ACIM(K+1))THEN
```

```
TEM=ACIM(K)
```

```
JTEM=IJ(K)
```

```
ACIM(K)=ACIM(K+1)
```

```
IJ(K)=IJ(K+1)
```

```
ACIM(K+1)=TEM
```

```
IJ(K+1)=JTEM
```

```
ENDIF
```

```
ENDDO
```

```
IF(J.GT.2)GO TO 120
```

```
DO K=1,IJT
```

```
MB(I,K)=IJ(K)
```

```
ENDDO
```

```
100 CONTINUE
```

C

```
*****
** SECCION REORDENAMIENTO MN() **
*****
```

```
DO I=1,NTM
```

```
J1=MN(I,1)
```

```
J2=MN(I,2)
```

```

IF(JT(J1).EQ.JT(J2))THEN
  IF(J1.GT.J2)THEN
    MN(I,1)=J2
    MN(I,2)=J1
  ENDIF
ELSE
  IF(TR(JT(J1)).LT.TR(JT(J2)))THEN
    MN(I,1)=J2
    MN(I,2)=J1
  ENDIF
ENDIF
ENDDO

```

```

C
*****
** SECCION DEFINICION DE LAS PARTICULAS DEL CONTORNO CONVEXO(CENTROS) **
*****

```

```

YU=0.
IX=0
DO I=1,NTB          !LOCALIZACION PRIMERA
IF(YB(I).LT.YU)THEN
  IX=I
  YU=YB(I)
ENDIF
ENDDO
LICOB(2)=IX
RLICOB=SQRT(XB(IX)*XB(IX)+YB(IX)*YB(IX))

```

```

C8
DO I=MBDIM,2,-1
MB(IX,I)=MB(IX,I-1)
ENDDO
MB(IX,1)=-1

```

```

C
IX2=0          !LOCALIZACION SEGUNDA
TM=PI/2.
DO 200 I=1,NTB
IF(XB(I).LE.XB(IX))GO TO 200
IF(YB(I).GT.(0.5*YB(IX)))GO TO 200
CALL ACIM12(XB(IX),YB(IX),XB(I),YB(I),TE)
IF(TE.GT.TM)GO TO 200
  TM=TE
  IX2=I

```

```

200 CONTINUE
LICOB(3)=IX2
RLICOB2=SQRT(XB(IX2)*XB(IX2)+YB(IX2)*YB(IX2))
IF(RLICOB2.LT.RLICOB)RLICOB=RLICOB2

```

```

C8
DO I=MBDIM,2,-1
MB(IX2,I)=MB(IX2,I-1)
ENDDO
MB(IX2,1)=-1

```

```

C
I=3          !LOCALIZACION DE LAS SIGUIENTES
220 I=I+1
LI=LICOB(I-1)
LJ=LICOB(I-2)
XI=XB(LI)
YI=YB(LI)
XJ=XB(LJ)
YJ=YB(LJ)
CALL ACIM12(XJ,YJ,XI,YI,TJI)

```

```

IX2=0
TM=PI
DO J=1,NTB
IF((J.NE.LI).AND.(J.NE.LJ))THEN
  CALL ACIM12(XI,YI,XB(J),YB(J),TE)
  TE=TE-TJI
  IF((TE.GT.0.).AND.(TE.LT.TM))THEN
    TM=TE
    IX2=J
  ENDIF
ENDIF
ENDDO
IF(IX2.EQ.IX)GO TO 240          ISE HA CERRADO EL CONTORNO
LICOB(I)=IX2
RLICOB2=SQRT(XB(IX2)*XB(IX2)+YB(IX2)*YB(IX2))
IF(RLICOB2.LT.RLICOB)RLICOB=RLICOB2

```

C8

```

DO J=MBDIM,2,-1
MB(IX2,J)=MB(IX2,J-1)
ENDDO
MB(IX2,1)=-1

```

C

```

GO TO 220
240 LICOB(1)=I-2

```

C

```

*****
** SECCION DE CALCULO DEL AREA ENCERRADA ENTRE PARTICULAS CONTORNO **
*****

```

```

ASUM=0.
XBU=XB(LICOB(2))
YBU=YB(LICOB(2))
X1=XBU
Y1=YBU
DO I=3,LICOB(1)+1
XX=XB(LICOB(I))
YY=YB(LICOB(I))
ASUM=ASUM+XBU*YY-YBU*XX
XBU=XX
YBU=YY
ENDDO
ASUM=ASUM+XBU*Y1-YBU*X1
ASUM=ASUM/2.
ATOT=ASUM

```

C

```

*****
** SECCION DE IDENTIFICACION DE LOS POROS (USANDO MODULO CHEQ) **
*****

```

```

NTP=0
LICOP(1)=0
LICOM(1)=0
DO 300 I=1,NTM
  NP=0
  CALL DEF_PORO(I,NP,0)

```

300 CONTINUE

C

```

*****
** SECCION DE CONTROL DE MENISCOS INICIALMENTE NO ASIGNADOS **
*****

```

```

DO I=1,NTM
IF((MN(I,3).EQ.0).OR.(MN(I,4).EQ.0))THEN

```

```

WRITE(6,*)' ATENCION: MEN.NO ASIGNADO MN(,3) MN(,4)'
WRITE(6,*)' ',I,MN(I,3),MN(I,4)
NP=0
CALL DEF_PORO(-I, NP, 0)
IF(NP.EQ.0)THEN
WRITE(6,*)' TAMPOCO CON INICIACION NEGATIVA'
ENDIF
ENDIF
ENDDO

```

```

C
*****
** SECCION DE DETERMINACION DEL ESPESOR DEL MODELO **
*****

```

```

ESPZ=0.
NDENOM=0
DO I=1,NTTIP
ESPZ=ESPZ+TR(I)*FLOAT(NMEM(I))
NDENOM=NDENOM+NMEM(I)
ENDDO
ESPZ=2.*ESPZ/FLOAT(NDENOM)

```

```

C
VBOLAS=0.
SABOL=0.
DO I=1,NTB
VBOLAS=VBOLAS+PI*(TR(JT(I))**3.)/0.75
SABOL=SABOL+4.*PI*(TR(JT(I))**2.)
ENDDO

```

```

C
ENEPO=(ATOT*ESPZ-VBOLAS)/(ATOT*ESPZ)
WRITE(6,*)' SECCION DE DETERMINACION DEL ESPESOR DEL MODELO'
WRITE(6,*)' ESPZ/MED.PONDERADA =',ESPZ
WRITE(6,*)' N/ESPZ.MED.PONDERADA=',ENEPO,' SOLO APROX.'
330 WRITE(6,*)' SE ASUME COMO DEFINITIVO (=1)'
WRITE(6,*)' SE QUIERE TANTEAR ESPZ/N (=2)'
WRITE(6,*)' SE ENTRA NUEVO VALOR ESPZ(=3)?'
READ(5,*)I
IF(I.EQ.1)GO TO 310
IF(I.EQ.3)THEN
WRITE(6,*)' ESPZ?'
READ(5,*)ESPZ
GO TO 310
ENDIF
WRITE(6,*)' ENTRAR VALORES DE N'
320 WRITE(6,*)' N.APROX(FIN=0)?'
READ(5,*)ENEPO
IF(ENEPO.EQ.0.)GO TO 330
ESPZ=VBOLAS/(ATOT*(1.-ENEPO))
WRITE(6,*)' ESPZ=',ESPZ
GO TO 320
310 CONTINUE

```

```

C
NBU=0
DO I=1,NTB
IF(IMB(I).EQ.0)THEN
NBU=NBU+1
LIAIS(NBU)=I
ENDIF
ENDDO
IF(NBAIS.NE.NBU)THEN
WRITE(6,*)' ERROR AL LLENAR LIAIS().NBAIS,NBU',NBAIS,NBU

```

ENDIF

```
C
*****
** ASIGNACION DE LAS PARTICULAS AISLADAS A SUS POROS INICIALES **
*****
WRITE(6,*)' ENTRADA POROS A LOS QUE PERTEN.BOL.AISLADAS'
WRITE(6,*)' EL NUMERO TEORICO DE BOLAS AISLADAS ES DE ',NBAIS
WRITE(6,*)' SE QUIERE VER ESTADO ACTUAL DE AISLADAS(NO=1)?'
READ(5,*)I
IF(I.EQ.1)GO TO 450
405 NBU=0
    NB1=0
```

```
C
DO I=1,NTB
IF(IMB(I).EQ.0)THEN
    WRITE(6,*)' LA BOLA ',I,' ES AISLADA'
    NBU=NBU+1
    IF(MB(I,1).EQ.-1)WRITE(6,*)'          ES DEL CONTORNO'
    J=MB(I,2)
    IF(J.NE.0)THEN
        WRITE(6,*)'          SE SABE PERTENECE PORO ',-J
    ELSE
        NB1=NB1+1
    ENDIF
ENDIF
ENDIF
ENDDO
WRITE(6,*)' ES DECIR SON ',NBU,' BOLAS AISLADAS'
WRITE(6,*)' DE LAS QUE',NB1,' EN PORO DESCONOCIDO'
```

```
C
450 WRITE(6,*)' NUMERO DE BOLA(FIN=-1,RECUENTO=0)?'
    READ(5,*)NB
    IF(NB.LT.0)GO TO 400
    IF(NB.EQ.0)GO TO 405
    IF(IMB(NB).NE.0)THEN
        WRITE(6,*)'          NO ES AISLADA!'
        GO TO 450
    ENDIF
    WRITE(6,*)' NUMERO DE PORO AL QUE PERTENECE?'
    READ(5,*)NP
    MB(NB,2)=-NP
    IF(IPOR(NP).EQ.1)IPOR(NP)=11
    IF(IPOR(NP).EQ.2)IPOR(NP)=12
    IF(IPOR(NP).EQ.3)IPOR(NP)=13
```

```
C
GO TO 450
```

```
C
400 CONTINUE
```

```
C
*****
** SECCION DE CALCULO DE LOS POROS Y DE SU CENTRO (MODULO CHEQ) **
*****
DO I=1,NTP
    CALL RECAL_PORO(I,AMAX(I),APOLI)
    CALL RECAL_AIS(I,IPOR(I),AMAX(I))
ENDDO
```

```
C
*****
** CONTROL DE POSIBLES POROS DOBLEMENTE DETECTADOS(DUPLICANTES) **
*****
TOL=TR(1)/10.
```

```

DO I=1,NTP-1
DO J=I+1,NTP
IF(ABS(XP(I)-XP(J)).LT.TOL)THEN
  IF(ABS(YP(I)-YP(J)).LT.TOL)THEN
    WRITE(6,*)' OJO POROS POSIBLES DUPLICANTES:',I,J
  ENDIF
ENDIF
ENDDO
ENDDO

```

C

```

*****
** SECCION DEFINICION DEL VOLUMEN DE AGUA INICIAL EN CADA MENISCO **
*****
DO I=1,NTM
V(I)=0.25E-10
TETA(I)=12.*PI/180.
PWPA(I)=-0.9
ENDDO

```

C

```

*****
** SECCION DE DEFINICION DE PRESION DE AIRE EN LOS POROS **
*****
DO I=1,NTP
APP(I)=1.00
ENDDO

```

C

```

*****
** SECCION DEFINICION DE LOS TIEMPOS INICIALES DEL FUTURO ENSAYO **
*****
TIME=0.
TINCF=5.E-07
TINCM=1.E-08
IRATIO=50
TFIN=1.E-05
TFAC=1000000.
IWRITE=10

```

C

```

*****
** SECCION DE DEFINICION DEL VALOR UMBRAL DE DESPLAZAMIENTO Y OTROS **
*****
XUMB=TR(1)/100.
PWCOM=0.1
PGCOP=1.0
SIG11=1.
SIG22=1.
DEN=2.6
DO I=1,NTP
DELFI(I)=7.5E-05
ENDDO

```

C

C EL VALOR INICIAL DE OTRAS VARIABLES ES NULO

C

```

*****
** SECCION DE ESCRITURA SEGUN MODULO LEC ES EN ARCHIVO BAL9VAR.DAT **
*****
ICASO=2
CALL CH_CAL_PRESCRITURA
ICASO=0

```

C

WRITE(6,*)' VALORES RESULTANTES:'

```
WRITE(6,*)' ENEPO= ',ENEPO
WRITE(6,*)' ESPZ= ',ESPZ
WRITE(6,*)' ATOT= ',ATOT
WRITE(6,*)' VTOT= ',VTOT
WRITE(6,*)' VHUE= ',VHUE
WRITE(6,*)' VBOLAS= ',VBOLAS
WRITE(6,*)' SABOL= ',SABOL
WRITE(6,*)' SWM= ',SWM, ' SOLO ORIENT.INICIAL'
WRITE(6,*)' VWFIL= ',VWFIL,' SOLO ORIENT.INICIAL'
WRITE(6,*)' GSATU= ',GSATU,' SOLO ORIENT.INICIAL'
WRITE(6,*)' WHUME= ',WHUME,' SOLO ORIENT.INICIAL'
```

C

CALL ESCRES

C

STOP
END

C

COMMON Y PRECISION

Archivos/"INCLUDE" con las variables
comunes y la precisión de trabajo

```

*****
*****
**
**          ARCHIVO/"INCLUDE"      COM.INC
**
**
*****
*****
**
**          ARCHIVO QUE CONTIENE LAS SENTENCIAS PARAMETER
**          LAS SENTENCIAS COMMON
**          QUE SE UTILIZAN EN LOS PROGRAMAS DE ENSAYO PRINCIPAL:
**          DE GENERACION (GAPLUS7.FOR)
**          PRINCIPAL (BTOT5.FOR)
**          DE CHEQUEO (CHEQ.FOR)
**          DE FUERZAS Y MOVIMIENTOS (HERCU.FOR)
**          DE LECTURA ESCRITURA (LEC_ES.FOR)
**          DE DIBUJO (DIBU.FOR)
**          MEDIANTE INCLUSIONES AL INICIO DE LAS SUBROUTINAS
**
*****
**
**          LOS PARAMETER DAN DIMENSION MAXIMA A LAS VARIABLES
**          DIMENSIONALES Y EN DEFINITIVA AL PROBLEMA:
**          NBMAX : NUMERO MAXIMO DE PARTICULAS
**          NMMAX : NUMERO MAXIMO DE MENISCOS
**          NPMAX : NUMERO MAXIMO DE POROS
**          NTIPMAX: NUMERO MAXIMO DE FRACCIONES
**          MBDIM : NUMERO MAXIMO DE MENISCOS POR BOLA
**          KPDIM : NUMERO MAXIMO DE MENISCOS POR PORO
**          AIDIM : NUMERO MAXIMO DE BOLAS AISLADAS
**          LEDIM : NUMERO MAXIMO DE ENTES EN LAS LISTAS
**          EN LOS COMMON SE DIMENSIONAN LAS VARIABLES MAS IMPORTANTES
**          DE USO EN LAS PRINCIPALES SUBROUTINAS
**
*****

```

```

C
PARAMETER(NBMAX=600)
PARAMETER(NMMAX=1200)
PARAMETER(NPMAX=600)
PARAMETER(NTIPMAX=10)
PARAMETER(MBDIM=10)
PARAMETER(KPDIM=50)
PARAMETER(AIDIM=50)
PARAMETER(LEDIM=300)

```

```

C
INCLUDE 'PREC.INC'

```

```

C
*****
**          COMMON DE VARIABLES GENERALES
*****
COMMON TINC,TINI,TIME,TFIN,IWRITE,ICICLE,TFAC,iult0,TINCM,TINCF,
1  NTB,NTM,NTP,NBAIS,NTTIP,RLICOB,INPEL,INMEL,XUMB,ICASO,IRATIO,
2  BETA,CVAP,CFILM,DEAD,DEWP,FPOISE,HENRY,PI,RUNIV,
3  SIGMA,ABST,VISCO,VISCA,IAT,IFIJ,
4  RIAAI,RINAI,RIAWI,RINWI,RIAWF,RINWF,RIAAPD,RINAPD,
5  RIAAFE,RINAFE,RIAAC,RINAC,RIAWCD,RINWCD,RIAWCE,RINWCE,
6  SWM,SWMO,SWP,SWP0,SAP,SAP0,SAM,SAM0,ECINL,ECINT,
7  ESPZ,ENEPO,GSATU,WHUME,ATOT,VTOT,VHUE,VBOLAS,VWFIL,SABOL

```

```

C
*****

```

** COMMON DE VARIABLES ASOCIADAS A LAS PARTICULAS, A LOS MENISCOS **
** A LOS POROS, AL CONTORNO. **

COMMON/MAT/ XB(NBMAX), YB(NBMAX), TB(NBMAX), JT(NBMAX), XBV(NBMAX),
1 XBI(NBMAX), YBI(NBMAX), TBI(NBMAX), IKLIS(NBMAX), KLIS(NBMAX, 3),
1 YBV(NBMAX), TBV(NBMAX), IMB(NBMAX), MB(NBMAX, MBDIM), TR(NTIPMAX),
2 XM(NMMAX), YM(NMMAX), MN(NMMAX, 4), V(NMMAX), TETA(NMMAX), T1(NMMAX),
3 R1(NMMAX), Y8(NMMAX), ADMM(NMMAX), PWPA(NMMAX),
4 HKTE(NMMAX), SARM(NMMAX), SALM(NMMAX),
5 XP(NPMAX), YP(NPMAX), IPOR(NPMAX), IKPN(NPMAX), KPN(NPMAX, KPDIM),
6 AMAX(NPMAX), VMAX(NPMAX), APP(NPMAX), WPP(NPMAX), AHP(NPMAX),
7 DELFI(NPMAX), APM(NPMAX), WPM(NPMAX), VHP(NPMAX),
8 LICOB(200), LICOM(400), LICOP(200),
9 LIAIS(AIDIM), NPEL(LEDIM), NMEL(LEDIM)

C

** COMMON DE VARIABLES DEL MODULO MECANICO **

COMMON/HERCU/ DEN, SOLKN, SOLKD, SOLMU, SOLKS, SOLNN, SOLNS, CAMO, TAMO,
1 SIG11, SIG22, SIG12, SIG21, VSIG11, VSIG22, VSIG12, VSIG21,
2 PWCOM, PGCOP, VPWCOM, VPGCOP, GX, GY, VGX, VGY,
3 DELNMAX(NMMAX), DELTAS(NMMAX), FNW(NMMAX), FN(NMMAX), FT(NMMAX),
4 FNSOL(NMMAX), IHER

C

```

*****
*****
**
**          ARCHIVO/"INCLUDE"          PREC.INC          **
**
*****
*****
**
**          ARCHIVO QUE CONTIENE LA PRECISION QUE          **
**          UTILIZA EN LOS PROGRAMAS DE ENSAYO PRINCIPAL:  **
**          DE GENERACION (GAPLUS7.FOR)                    **
**          PRINCIPAL (BTOT5.FOR)                          **
**          DE CHEQUEO (CHEQ.FOR)                          **
**          DE FUERZAS Y MOVIMIENTOS (HERCU.FOR)           **
**          DE LECTURA ESCRITURA (LEC_ES.FOR)            **
**          DE DIBUJO (DIBU.FOR)                           **
**          MEDIANTE INCLUSIONES AL INICIO DE LAS SUBROUTINAS **
**          O MEDIANTE INCLUSION A TRAVES DE "COM.INC"      **
**
*****

```

```

C
  IMPLICIT REAL*8 (A-H),(O-Z)
  IMPLICIT INTEGER*2 (I-N)
  REAL*8 PI
  INTEGER*4 IRAN,IDEV,icycle,IULTWRITE,IULT0,IVEL0

```

```

C
*****
*****

```

PROGRAMA BTOT5

Controlador del tiempo y Módulo de Flujos

PROGRAMA BTOT5.FOR

PROGRAMA PRINCIPAL DEL MODELO BAL
(COMPORTAMIENTO DE n BOLAS CON MENISCOS Y POROS)

EL PROGRAMA PRINCIPAL CONTIENE EL SEGMENTO CONTROLADOR DEL
TIEMPO Y LAS LLAMADAS A LOS DEMAS SEGMENTOS:

.SUBROUTINAS DE BTOT5.FOR: FLUJOS DE AGUA, VAPOR, AIRE, Y
AIRE DISUELTO

.PROGRAMA CHEQ.FOR: CHEQUEOS DE LA GEOMETRIA (SEGUIMIENTO
DE LA CONECTIVIDAD)

.PROGRAMA HERCU.FOR: FUERZAS Y MOVIMIENTOS EN LAS BOLAS

.PROGRAMA LEC_ES.FOR: LECTURA Y ESCRITURA DE DATOS

SUCCION O/Y OTRAS VARIABLES FIJADAS EN EL CONTORNO:

.PRESION DE GAS EN LOS POROS DEL CONTORNO

.PRESION DE AGUA EN LOS MENISCOS

.TENSION EN EL CONTORNO

ICASO=0 BOLAS INMOVILES (SOLO FLUJOS)

ICASO=1 PARCIALMENTE SATURADO

ICASO=2 INUNDADO (SOLO MODULO MECANICO)

ICASO=3 DESATURACION (AJUSTE V.MEN)

INCLUDE 'COM.INC'

DIMENSION LESCOB(10),LESCM(10),LESCP(10)

CALL LECTDAT

IF(ICASO.EQ.3)THEN

ICASO=2

CALL PRECALCULOS(LESCB,LESCM,LESCP)

ICASO=1

CALL DESATURA

CALL ESCRITURA(LESCB,LESCM,LESCP)

GO TO 999

ENDIF

CALL PRECALCULOS(LESCB,LESCM,LESCP)

IVEL0=INT(TFAC)

IULTWRITE=ICICLE

```
*****
*                               INICIO DEL CICLO TOTAL DE CALCULOS                               *
*****
```

```
100  CONTINUE
C
    IHER=0
    ICICLE=ICICLE+1
C
    IF(ICASO.NE.2)THEN
        CALL COND IMPUESTAS
        TINC=TINCF
        CALL FLUJOS
        CALL INCR_CCF
    ENDIF
C
    IF(ICASO.NE.0)THEN
        TINC=TINCM
        DO IHER=1,IRATIO
            CALL HERCU
        ENDDO
    ENDIF
```

```
*****
*                               INCREMENTOS DE TIEMPO                               *
*****
```

```
    TINC=TINCF
    TIME=TIME+TINC
C
    IF((ICICLE.GE.(IULTWRITE+IWRITE)).OR.(TIME.GE.TFIN))THEN
        CALL ESCRITURA(LESCB,LESCM,LESCP)
        IULTWRITE=ICICLE
        IF (TIME.GE.TFIN)GO TO 999
    ENDIF
C
    IF(ICICLE.GE.(IULT0+IVEL0))THEN
        CALL VELO
        IULT0=ICICLE
    ENDIF
C
    GO TO 100
C
999  CLOSE (4)
C
    STOP
    END
```

```
*****
*****
```

```
    SUBROUTINE PRECALCULOS(LESCB,LESCM,LESCP)
```

```
*****
* SUBROUTINA DE PRECALCULOS E INICIALIZACIONES AL COMENZAR EL PROGRAMA *
*****
```

```
    INCLUDE 'COM.INC'
    DIMENSION LESCB(10),LESCM(10),LESCP(10)
```

IRAN=9999999

C
OPEN(UNIT=4,FILE='BAL9SEL.RES',STATUS='NEW')
CLOSE(4)
IF(ICASO.EQ.2)GO TO 400

IF(TINI.EQ.0.)THEN
SWM0=0.
SAM0=0.
SWP0=0.
SAP0=0.
NMTOT=NTM+INMEL
DO 220 NM=1,NMTOT
IF(V(NM).NE.0.)THEN
SWM0=SWM0+V(NM)
SAM0=SAM0+ADMM(NM)
ENDIF
220 CONTINUE
ENDIF

NMTOT=NTM+INMEL
DO 200 NM=1,NMTOT
IF(V(NM).EQ.0.)GO TO 200
IF(V(NM).LT.0.)THEN
WRITE(6,*)' ERROR BTOT5: MENISCO, V<0',NM,V(NM)
CALL STOPAR
ENDIF
CALL VOLMEN(NM)
200 CONTINUE

* CALCULO DE LAS AREAS Y DE LOS VOLUMENES DE LOS POROS, ESPESOR DE LAS *
* PELICULAS DE AGUA, ETC. *

NPTOT=NTP+INPEL
DO 300 NP=1,NPTOT
IF(IPOR(NP).EQ.0)GO TO 300
CALL VOLPOR(NP)
APM(NP)=APP(NP)*VHP(NP)*0.02894/(RUNIV*ABST)
WPM(NP)=WPP(NP)*VHP(NP)*0.01801/(RUNIV*ABST)
IF(TINI.EQ.0.)THEN
SAP0=SAP0+APM(NP)
SWP0=SWP0+WPM(NP)
ENDIF
300 CONTINUE

C
IF(TINI.EQ.0.)THEN
SAP=SAP0
SWP=SWP0
SWM=SWM0
SAM=SAM0
ENDIF

400 DO I=1,NTB
CALL CH_NUE_CON(I)
ENDDO

* INCREMENTOS DE TIEMPO PARA LOS MODULOS DE FLUJO Y MECANICO *

```
IF(INT(TINCF/TINCM).NE.IRATIO)THEN
  WRITE(6,*)' NO CORRESPONDE IRATIO',IRATIO,INT(TINCF/TINCM)
  STOP
ENDIF
TINC=TINCF
```

```
IF(ICASO.EQ.0)WRITE(6,*)' SOLO FLUJOS'
IF(ICASO.EQ.1)WRITE(6,*)' NORMAL'
IF(ICASO.EQ.2)WRITE(6,*)' INUNDADO'
IF(ICASO.EQ.3)WRITE(6,*)' DESATURACION'
```

* DETERMINACION DE BOLAS MENISCOS Y POROS SELECCIONADOS *

```
WRITE(6,*)' QUE IFIJ (DEFAULT (CENTRAL),=0)?'
READ(5,*)IFIJ
IF(IFIJ.EQ.0)THEN
  D=100.
  DO I=1,NTB
    DB=SQRT(XB(I)*XB(I)+YB(I)*YB(I))
    IF(DB.LT.D)THEN
      D=DB
      IFIJ=I
    ENDIF
  ENDDO
ENDIF
WRITE(6,*)' NB.IFIJ=',IFIJ

WRITE(6,*)' ESCRITURA MENSAJES ATENCION (SI=1)?'
READ(5,*)IAT
```

C

```
WRITE(6,*)' ESCSELECT POR DEFAULT (SI=1)?'
READ(5,*)I
IF(I.EQ.1)THEN
  LESCOB(1)=1
  LESCOB(2)=LICOB(2)
  LESCOB(1)=MB(1,1)
  LESCOB(2)=LICOM(2)
  LESCOB(1)=MN(MB(1,1),3)
  LESCOB(2)=LICOP(2)
ELSE
  DO I=1,10
    WRITE(6,*)' BOLA(FIN=0)?'
    READ(5,*)LESCB(I)
    IF(LESCB(I).EQ.0)GO TO 415
  ENDDO
415 DO I=1,10
    WRITE(6,*)' MENISCO(FIN=0)?'
    READ(5,*)LESCM(I)
    IF(LESCM(I).EQ.0)GO TO 416
  ENDDO
416 DO I=1,10
    WRITE(6,*)' PORO(FIN=0)?'
    READ(5,*)LESCP(I)
    IF(LESCP(I).EQ.0)GO TO 417
  ENDDO
417 CONTINUE
```

ENDIF

* ESCRITURA EN ARCHIVO INCR. DE ALGUNOS DATOS DE PARTIDA *

C CALL ESCSELECT(LESCB,LESCM,LESCP)

C RETURN
END

SUBROUTINE COND_IMPUESTAS

* SUBROUTINA DE FIJACION DE LAS VARIABLES IMPUESTAS EN EL CONTORNO *
* * * * *
* .POROS DEL CONTORNO: PRESION DE LA FASE GASEOSA *
* (FUENTE DE PRESION CON INTERFASE IMPERMEABLE AL VAPOR) *
* * * * *
* .MENISCOS DEL CONTORNO: PRESION DE AGUA *

INCLUDE 'COM.INC'

C DIMENSION KICOM(400)

C DO I=2,LICOP(1)+1
NP=LICOP(I)
APP(NP)=PGCOP-WPP(NP)
APM(NP)=APP(NP)*VHP(NP)*0.02894/(RUNIV*ABST)
ENDDO

C PWPACOM=PWCOM-PGCOP

C DO I=2,LICOM(1)+1
KICOM(I-1)=LICOM(I)
ENDDO
IK=LICOM(1)

C DO I=1,IK
NM=KICOM(I)
IF(V(NM).EQ.0.)THEN
GO TO 408
ENDIF

J=0
JS=0
407 J=J+1

IF(J.GT.10)THEN
CALL AGOTA MEN CONTO(NM,IR)
IF(IR.EQ.1)THEN
IF(JS.GE.100)THEN
WRITE(6,*)' COND_IMP:100 IT.NM,V,PWPA',NM,V(NM),PWPA(NM)
CALL STOPAR
ENDIF
JS=JS+10
J=0
GO TO 407

```

    ENDIF
    GO TO 408
ENDIF
VINC=(PWPACOM-PWPA(NM))/HKTE(NM)
IF(ABS(VINC).GT.V(NM)/10.)THEN
    VINC=0.1*V(NM)*VINC/ABS(VINC)
ENDIF
V(NM)=V(NM)+VINC
CALL PREVOLMEN(NM)
IF(ABS(VINC).LE.(V(NM)/1000.))GO TO 408
GO TO 407
408 ENDDO
C
    RETURN
    END

```


SUBROUTINE DESATURA

* SUBROUTINA DE ASIGNACION DE UN VOLUMEN A TODOS LOS MENISCOS Y DE *
* UNA PRESION A TODOS LOS POROS *

```

    INCLUDE 'COM.INC'

```

```

    NPTOT=NTP+INPEL
    DO NP=1,NPTOT
    IF(IPOR(NP).NE.0)THEN
        APP(NP)=PGCOP
        APM(NP)=APP(NP)*VHP(NP)*0.02894/(RUNIV*ABST)
    ENDIF
    ENDDO

```

```

C
    PWPACOM=PWCOM-PGCOP

```

```

C
    NMTOT=NTM+INMEL
    DO NM=1,NMTOT
    IF(V(NM).EQ.0.)GO TO 408
    V(NM)=3.0E-11
    CALL PREVOLMEN(NM)
    J=0
    JS=0
    407 J=J+1
        IF(J.GT.10)THEN
            IF(JS.GE.100)THEN
                WRITE(6,*)' DESATURA:100 IT.NM,V,PWPA',NM,V(NM),PWPA(NM)
                CALL STOPAR
            ENDIF
            JS=JS+10
            J=0
            GO TO 407
        ENDIF
    VINC=(PWPACOM-PWPA(NM))/HKTE(NM)
    IF(ABS(VINC).GT.V(NM)/10.)THEN
        VINC=0.1*V(NM)*VINC/ABS(VINC)
    ENDIF
    V(NM)=V(NM)+VINC

```

```
CALL PREVOLMEN(NM)
IF(ABS(VINC).LE.(V(NM)/1000.))GO TO 408
GO TO 407
ENDDO
```

408

C

```
RETURN
END
```

```
*****
*****
```

SUBROUTINE FLUJOS

```
*****
* SUBROUTINA DE CALCULO DE LOS FLUJOS ENTRE LAS DIVERSAS FASES *
*****
```

```
INCLUDE 'COM.INC'
```

```
*****
* CICLO ESPACIAL 1: POROS PARA FLUJOS POROS-MENISCOS *
*****
```

```
NPTOT=NTP+INPEL
NP=IFIX(RAN(IRAN)*NPTOT)
```

```
IZDE=2*IFIX(2.*RAN(IRAN))-1
DO 435 NYP=1,NPTOT
NP=NP+IZDE
IF(NP.GT.NPTOT)NP=1
IF(NP.LT.1)NP=NPTOT
IF(IPOR(NP).EQ.0)GO TO 435
```

```
*****
* SUBCICLO A LOS MENISCOS VECINOS A CADA PORO: *
* *
* .FLUJO DE AIRE SECO A TRAVES DE LA INTERFASE *
* .FLUJO DE VAPOR DE AGUA A TRAVES DE LA INTERFASE *
*****
```

```
IYM=ABS(IKPN(NP))
I=IFIX(RAN(IRAN)*IYM)
IZDE2=2*IFIX(2.*RAN(IRAN))-1
DO 420 IY=1,IYM
I=I+IZDE2
IF(I.GT.IYM)I=1
IF(I.LT.1)I=IYM
J=KPN(NP,I)
IF(J.LE.0)GO TO 420
IF(R1(J).LE.0.)GO TO 420
```

C

```
CALL FVWINT(NP,J)
CALL PREVOLMEN(J)
```

C

```
CALL FASINT(NP,J)
CALL PREVOLPOR(NP)
```

C

```
420 CONTINUE
435 CONTINUE
```

 * CICLO ESPACIAL 2: POROS PARA FLUJOS MENISCOS-MENISCOS *

```

NPTOT=NTP+INPEL
NP=IFIX(RAN(IRAN)*NPTOT)
IZDE=2*IFIX(2.*RAN(IRAN))-1
DO 455 NYP=1,NPTOT
NP=NP+IZDE
IF(NP.GT.NPTOT)NP=1
IF(NP.LT.1)NP=NPTOT
IF(IPOR(NP).EQ.0)GO TO 455
  
```

 * SUBCICLO ENTRE MENISCOS VECINOS DENTRO DEL PORO: *
 *

```

* .FLUJO DE AGUA A TRAVES DE LA PELICULA *
* .FLUJO DE AIRE DISUELTO A TRAVES DE LA PELICULA (EFUSION) *
*****
  
```

```

IYM=ABS(IKPN(NP))
I=IFIX(RAN(IRAN)*IYM)
IZDE2=2*IFIX(2.*RAN(IRAN))-1
IF(IZDE2.GT.0)THEN
  LIM1=1
  LIM2=IYM
ELSE
  LIM1=IYM
  LIM2=1
ENDIF
DO 440 IY=1,IYM
I=I+IZDE2
IF((I-LIM2)*IZDE2)10,20,30
10 I2=I+IZDE2
GO TO 40
20 I2=LIM1
GO TO 40
30 I=LIM1
I2=I+IZDE2
40 J=KPN(NP,I)
J2=KPN(NP,I2)
IF((J.LE.0).OR.(J2.LE.0))GO TO 440
IF(J.EQ.J2)GO TO 440
IF((R1(J).LE.0.).OR.(R1(J2).LE.0.))GO TO 440
CALL FWFILM(NP,J,J2)
CALL ACTU1(J,J2)
440 CONTINUE
455 CONTINUE
  
```

 * CICLO ESPACIAL 3: POROS PARA FLUJOS PORO-PORO *

```

NPTOT=NTP+INPEL
NP=IFIX(RAN(IRAN)*NPTOT)
IZDE=2*IFIX(2.*RAN(IRAN))-1
DO 475 NYP=1,NPTOT
NP=NP+IZDE
IF(NP.GT.NPTOT)NP=1
IF(NP.LT.1)NP=NPTOT
  
```

IF(IPOR(NP).EQ.0)GO TO 475

```
*****
*          SUBCICLO ENTRE EL PORO Y LOS POROS VECINOS:          *
*                                                                 *
*          .FLUJO DE AIRE GLOBAL A TRAVES DE LOS CONDUCTOS     *
*          .FLUJO DE VAPOR POR EFUSION                          *
*****
```

```
IYM=ABS(IKPN(NP))
I=IFIX(RAN(IRAN)*IYM)
IZDE2=2*IFIX(2.*RAN(IRAN))-1
DO 460 IY=1,IYM
I=I+IZDE2
IF(I.GT.IYM)I=1
IF(I.LT.1)I=IYM
J=KPN(NP,I)
IF(J.LE.0)GO TO 460
J2=MN(J,3)
IF(J2.EQ.NP)GO TO 460
CALL FACOND(NP,J2)
CALL PREVLPOR(NP)
CALL PREVLPOR(J2)
460 CONTINUE
475 CONTINUE
```

```
*****
*          CHEQUEOS SOBRE TODOS LOS MENISCOS                      *
*****
```

```
NMTOT=NTM+INMEL
DO 480 NM=1,NMTOT
IF(V(NM).EQ.0.)GO TO 480
IF(R1(NM).GT.0.)GO TO 480
CALL ROT_CONT(NM)
480 CONTINUE
```

```
C
RETURN
END
```

```
*****
*****
```

SUBROUTINE ESCRITURA(LESCB,LESCM,LESCP)

```
*****
*          SUBROUTINA DE ESCRITURA DE RESULTADOS                *
*****
```

INCLUDE 'COM.INC'

```
*****
*          CHEQUEOS DE CONTROL SOBRE LOS POROS Y LOS MENISCOS Y CALCULOS
*          DIVERSOS PREVIOS A LA ESCRITURA
*****
```

```
C
CALL CH_CAL_PRESERITURA
C
CALL ESCRES
C
```

CALL ESCSELECT(LESCB,LESCM,LESCP)

C

RETURN
END

SUBROUTINE AGOTA_MEN_CONTO(N,IR)

* SUBROUTINA DE LLAMADA A ROT CONT CON VMIN, PARA UN MENISCO QUE ERA *
* DEL CONTORNO Y SE HA AGOTADO POR NO PODER SATISFACER COND IMPUESTAS *

INCLUDE 'COM.INC'

C

IR=0

* CALCULO DE GAMA Y ALFA *

I1=MN(N,1)
I2=MN(N,2)
RB1=TR(JT(I1))
RB2=TR(JT(I2))
XBB1=XB(I1)+XBI(I1)
YBB1=YB(I1)+YBI(I1)
XBB2=XB(I2)+XBI(I2)
YBB2=YB(I2)+YBI(I2)
Z1=XBB1-XBB2
Z2=YBB1-YBB2
D=SQRT(Z1*Z1+Z2*Z2)-RB1-RB2

C

GAMA=RB2/RB1
ALFA=D/RB2

C

IF(ALFA.LE.0.)THEN
IR=1
GO TO 900
ENDIF

C

CALL TMINVMIN(GAMA,ALFA,TMIN,VMIN,IAT)
V(N)=VMIN*RB1*RB1*RB1

C

CALL ROT_CONT(N)

C

900 RETURN
END

SUBROUTINE VELO

* SUBROUTINA PARA ANULAR LAS VELOCIDADES CADA TFAC (IVELO) CICLOS *

C

```

      INCLUDE 'COM.INC'
C
      RAD=PI/180.
C
      CALL ECIN
C
      RMSX=0.
      RMSY=0.
      RMST=0.
C
      DO I=1,NTB
      RMSX=RMSX+XBV(I)*XBV(I)
      RMSY=RMSY+YBV(I)*YBV(I)
      RMST=RMST+TBV(I)*TBV(I)
      XBV(I)=0.
      YBV(I)=0.
      TBV(I)=0.
      ENDDO
C
      FNTB=FLOAT(NTB)
      RMSX=SQRT(RMSX/FNTB)
      RMSY=SQRT(RMSY/FNTB)
      RMST=SQRT(RMST/FNTB)
C
      WRITE(6,*)' TIME ACERO / RMSX,Y,T / ECINL,T',TIME
      WRITE(6,*)RMSX,RMSY,RMST/RAD
      WRITE(6,*)ECINL,ECINT
C
      RETURN
      END

```

```

*****
*****

```

SUBROUTINE VOLMEN(N)

```

*****
*   SUBROUTINA PARA OBTENER LA GEOMETRIA GENERAL DE UN MENISCO   *
*****

```

```

C
      INCLUDE 'COM.INC'
C
      RAD=PI/180.
C
      IF(V(N).LE.0.)THEN
        R1(N)=0.
        GO TO 900
      ENDIF

```

```

*****
*   IDENTIFICACION DE LAS VARIABLES GENERALES CON LAS INTERNAS DE LA *
*   SUBROUTINA                                                         *
*****

```

```

      I1=MN(N,1)
      I2=MN(N,2)
      RB1=TR(JT(I1))
      RB2=TR(JT(I2))
      XBB1=XB(I1)+XBI(I1)
      YBB1=YB(I1)+YBI(I1)
      XBB2=XB(I2)+XBI(I2)

```



```
YBB2=YB(I2)+YBI(I2)
VMEN=V(N)
TET2=TETA(N)
Z1=XBB1-XBB2
Z2=YBB1-YBB2
D=SQRT(Z1*Z1+Z2*Z2)-RB1-RB2
```

C

```
VMENA=VMEN/(RB1*RB1*RB1)
GAMA=RB2/RB1
ALFA=D/RB2
```

C

```
CALL TMINVMIN(GAMA,ALFA,TMIN,VMIN,IAT)
IF(VMENA.LE.VMIN)THEN
  R1(N)=0.
  GO TO 900
```

ENDIF

```
IF(TET2.LE.TMIN)TET2=TMIN*1.001
```

C

```
TET=TET2*1.01
ZTET=TET
CALL CALVOL(GAMA,ALFA,TET,VOL)
ZVOL=VOL
```

C

```
WRITE(6,*)' GAMA ',GAMA,' ALFA',ALFA,' TET',TET/RAD,' VOL',VOL
```

VOLH=VOL

TETH=TET

TET=TET2

```
CALL CALVOL(GAMA,ALFA,TET,VOL)
```

C

```
WRITE(6,*)' GAMA ',GAMA,' ALFA',ALFA,' TET',TET/RAD,' VOL',VOL
```

TETI=TET

I=0

30 I=I+1

C

```
IF(I.GT.10)THEN
```

```
  IF(I.EQ.11)THEN
```

```
    WRITE(6,*)' VOLMEN NM,NB1,X,Y,NB2,X,Y,VMEN()'
```

```
    WRITE(6,*)' ',N,I1,XBB1,YBB1,I2,XBB2,YBB2,VMEN
```

```
    WRITE(6,*)' ITER, TET, VOL.ADIM'
```

ENDIF

```
  WRITE(6,*)' ',I,TET/RAD,VOL
```

```
  IF(I.GT.20)THEN
```

```
    CALL STOPAR
```

ENDIF

ENDIF

C

```
TETINC=-(VOL-VMENA)*(TETI-TETH)/(VOL-VOLH)
```

```
IF(ABS(TETINC).GT.0.08726)THEN
```

```
  TETINC=0.08726*TETINC/ABS(TETINC)
```

ENDIF

```
TET=TETI+TETINC
```

```
IF(TET.GE.PI/2.)THEN
```

```
800 WRITE(6,*)' ERROR VOLMEN: N,I,TETI,TETINC,TET,VOL,VMENA,PWPA'
```

```
  WRITE(6,*)N,I,TETI/RAD,TETINC/RAD,TET/RAD,VOL,VMENA,PWPA(N)
```

```
  CALL STOPAR
```

ENDIF

C

```
IF(TET.LE.TMIN)THEN
```

```
  IF(TET.LE.0.)GO TO 800
```

```
  TET=TMIN*1.001
```

ENDIF

C

```

C
IF (ABS (VOL-VMENA) .LE. (VMENA/1000.)) GO TO 40
TETH=TETI
TETI=TET
VOLH=VOL
CALL CALVOL (GAMA, ALFA, TET, VOL)
GO TO 30
40 CALL CALGEOM (GAMA, ALFA, TET, H2R, SAR, SAL, TET1, DT, R1 (N), Y8 (N))

```

```

*****
* PASOS A DIMENSIONAL E IDENTIFICACIONES INVERSAS *
*****

```

```

TETA (N) = TET
PWPA (N) = H2R * SIGMA / RB1
R1 (N) = R1 (N) * RB1
Y8 (N) = Y8 (N) * RB1
SARM (N) = SAR * RB1 * RB1
SALM (N) = SAL * RB1 * RB1
T1 (N) = TET1

```

```

*****
* CALCULO DEL FACTOR HKTE *
*****

```

```

DTDV = (TET - ZTET) / ((VOL - ZVOL) * RB1 * RB1 * RB1)
TET2 = TET * .99
CALL CALGEOM (GAMA, ALFA, TET2, H2R2, SAR, SAL, TET1, DT, R1Z, Y8Z)
DPDT = (H2R - H2R2) * SIGMA / (RB1 * (TET - TET2))
HKTE (N) = DTDV * DPDT

```

```

C
900 RETURN
END

```

```

*****
*****

```

```

SUBROUTINE TMINVMIN (GAMA, ALFA, TMIN, VMIN, IAT)

```

```

*****
* SUBROUTINA PARA HALLAR EL VOLUMEN ADIMENSIONAL MINIMO COMPATIBLE CON *
* GAMA Y ALFA DADOS (BOLAS FIJAS), Y EL TETA CORRESPONDIENTE *
*****

```

```

INCLUDE 'PREC.INC'

```

```

C
PI = 3.141592654
T1DEG = PI / 180.
TMIN = 0.
VMIN = 0.
IF (ALFA .EQ. 0.) GO TO 900
X2 = 1. + GAMA + GAMA * ALFA
IF (ALFA .LT. 0.) THEN
  X8 = (X2 * X2 + 1. - GAMA * GAMA) / (2. * X2)
  RMIN = SQRT (1. - X8 * X8)
  TMIN = ATAN (RMIN / (X2 - X8))
  TMIN = TMIN + 0.01 * T1DEG
  VMIN = 0.
ELSE
  B = (1. - GAMA) / X2

```

```

A=X2/2.-B*(1.-GAMA)/2.
C=A-GAMA*B
CG=C*GAMA
GA=GAMA*GAMA+A*A
DIS=CG*CG-GA*(C*C-A*A)
Y=(CG+SQRT(DIS))/GA

```

C

```

IF(ABS(Y).GT.1.)THEN
  IF((ABS(Y).LT.1.0001).AND.(Y.GT.0.))THEN
    Y=1.
  ELSE
    Y=(CG-SQRT(DIS))/GA
    IF(IAT.EQ.1)THEN
      WRITE(6,*)' ATENCION TMINVMIN: ABS(Y)>1. =',Y
      WRITE(6,*)' GAMA,ALFA',GAMA,ALFA
      WRITE(6,*)' CG,DIS,GA',CG,DIS,GA
      WRITE(6,*)' ADOPTO Y=',Y
    ENDIF
    IF(ABS(Y).GT.1.)THEN
      WRITE(6,*)' TMINVMIN, INCORRECTO. ME PARO Y=',Y
      CALL STOPAR
    ENDIF
  ENDIF
ENDIF

```

C

```

400 TMIN=ACOS(Y)
    TMIN=TMIN+0.1*T1DEG
    CALL CALVOL(GAMA,ALFA,TMIN,VMIN)
    IF(VMIN.LE.0.)THEN
      TMIN=TMIN+0.1*T1DEG
      GO TO 400
    ENDIF
  ENDIF

```

C

```

900 RETURN
END

```

```

*****
*****

```

SUBROUTINE CALVOL(GA,AL,TE,VOL)

```

*****
* SUBROUTINA PARA HALLAR EL VOLUMEN ADIMENSIONAL DE UN MENISCO *
* GENERALIZADO A PARTIR DE UN TETA ITERADO (NO INCLUYE EL CASO *
* DEGENERADO CON PARED) *
*****

```

INCLUDE 'PREC.INC'

C

```

CALL CALCOR(GA,AL,TE,X1,Y1,X2,Y2,X3,Y3,X4,Y4,X5,Y5,R2,T1,T3)

PI=3.14159265
Z6=X4-X3
Z7=X5-X3
Z1=(Y3*Y3+R2*R2)*(X5-X4)
Z2=(Z7*Z7*Z7-Z6*Z6*Z6)/3.
Z3=Y3*Z7*SQRT(R2*R2-Z7*Z7)
Z4=Y3*Z6*SQRT(R2*R2-Z6*Z6)
Z5=Y3*T3*R2*R2

```

```

VOL3=PI*(Z1-Z2-Z3+Z4-Z5)
Z1=COS(TE)
Z2=COS(T1)
Z3=GA*GA*GA
VOL2=PI*Z3*(2./3.-Z1+(Z1*Z1*Z1)/3.)
VOL1=PI*(2./3.-Z2+(Z2*Z2*Z2)/3.)
IF(AL.GE.0.)THEN
  VOL4=0.
  VOL5=0.
ELSE
  X8=(X2*X2+1.-GA*GA)/(2.*X2)
  Y8=SQRT(1.-X8*X8)
  T4=ATAN(Y8/(X2-X8))
  T5=ATAN(Y8/X8)
  Z4=COS(T4)
  Z5=COS(T5)
  VOL4=PI*Z3*(2./3.-Z4+(Z4*Z4*Z4)/3.)
  VOL5=PI*(2./3.-Z5+(Z5*Z5*Z5)/3.)
ENDIF

```

```

C
VOL=VOL3-VOL2-VOL1+VOL4+VOL5

```

```

C
IF(R2.LT.0.)THEN
  VOL=-ABS(VOL)
ENDIF

```

```

C
RETURN
END

```

```

*****
*****

```

```

SUBROUTINE CALCOR(GA,AL,TE,X1,Y1,X2,Y2,X3,Y3,X4,Y4,X5,Y5,R2,T1,T3)

```

```

*****
* SUBROUTINA PARA EL CALCULO DE LAS COORDENADAS LOCALES DEL MENISCO *
* GENERALIZADO *
*****

```

```

INCLUDE 'PREC.INC'

```

```

C
PI=3.14159265
X1=0.
X2=1.+GA+GA*AL
Y1=0.
Y2=0.
Z1=1.-GA
Y3=(X2*X2-Z1*Z1)*SIN(TE)/(2.*(Z1+X2*COS(TE)))
X3=X2-Y3/TAN(TE)
R2=SQRT(X3*X3+Y3*Y3)-1.
T1=ATAN(Y3/X3)
X4=COS(T1)
Y4=SIN(T1)
X5=X2-GA*COS(TE)
Y5=GA*SIN(TE)
T3=PI-T1-TE

```

```

C
RETURN
END

```


SUBROUTINE CALGEOM(GA,AL,TE,H2R,SAR,SAL,T1,DT,R1,Y8)

* SUBROUTINA PARA HALLAR LOS VALORES DEL MENISCO UNA VEZ SE SABE TETA *
* CONVERGIDO *

INCLUDE 'PREC.INC'

C
PI=3.14159265
CALL CALCOR(GA,AL,TE,X1,Y1,X2,Y2,X3,Y3,X4,Y4,X5,Y5,R2,T1,T3)

C

* CALCULO DE LA SUCCION ADIMENSIONAL EN EL CUELLO DEL MENISCO *

C
R1=Y3-R2
H2R=(1./R1-1./R2)

C
A1=X2*Y3/2.
A4=R2*R2*T3/2.
IF(AL.GE.0.)THEN
A5=0.
A2=GA*GA*TE/2.
A3=T1/2.
Y8=0.
ELSE
X8=(X2*X2+1.-GA*GA)/(2.*X2)
Y8=SQRT(1.-X8*X8)

C
IF(Y8.GT.R1)THEN
WRITE(6,*)' ERROR CALGEOM:Y8(SOL)>R1(MEN):',Y8,R1
CALL STOPAR
ENDIF

C
T4=ATAN(Y8/(X2-X8))
T5=ATAN(Y8/X8)
A5=X2*Y8/2.
A2=GA*GA*(TE-T4)/2.
A3=(T1-T5)/2.
ENDIF
SAR=A1-A2-A3-A4-A5

C
SAL=PI*R2*(Y3*T3-R2*(COS(TE)+COS(T1)))

C
DT=(X2-GA+1.)/2.

C
RETURN
END

SUBROUTINE VOLMENPAR(N)

* SUBROUTINA PARA HALLAR GEOMETRIA GENERAL DE UN MENISCO, EN CONTACTO *
 * CON UNA PARED *

INCLUDE 'COM.INC'
 DIMENSION TW(10),YW(10),XW(10)

C

RAD=PI/180.

 * IDENTIFICACION DE LAS VARIABLES GENERALES CON LAS INTERNAS DE LA *
 * SUBROUTINA *

I1=-MN(N,1)
 I2=MN(N,2)
 XW1=XW(I1)
 YW1=YW(I1)
 TW1=TW(I1)
 XB2=XB(I2)
 YB2=YB(I2)
 RB2=TR(JT(I2))
 VMEN=V(N)
 TET2=TETA(N)

C

A=TAN(TW1)
 C=YW1-XW1*A
 D=(A*XB2-YB2+C)/SQRT(A*A+1.)
 D=ABS(D)
 D=D-RB2
 ALFA=D/RB2
 GAMA=0.

C

TET=TET2*.99
 ZTET=TET
 CALL CALVOLPAR(GAMA,ALFA,TET,VOL)
 ZVOL=VOL
 VOLH=VOL
 TETH=TET
 TET=TET2
 VMENA=VMEN/(RB2*RB2*RB2)
 CALL CALVOLPAR(GAMA,ALFA,TET,VOL)
 TETI=TET
 I=0

30 I=I+1

TET=TETI-(VOL-VMENA)*(TETI-TETH)/(VOL-VOLH)
 IF(ABS(VOL-VMENA).LE.(VMENA/1000.)) GO TO 40
 TETH=TETI
 TETI=TET
 VOLH=VOL
 CALL CALVOLPAR(GAMA,ALFA,TET,VOL)
 GO TO 30

40 CALL CALGEMPAR(GAMA,ALFA,TET,H2R,SAR,SAL,TET1,DT,R1(N),R2Z)

 * PASOS A DIMENSIONAL E IDENTIFICACIONES INVERSAS *

TETA(N)=TET
 PWPA(N)=H2R*SIGMA/RB2

```

R1(N)=R1(N)*RB2
SARM(N)=SAR*RB2*RB2
SALM(N)=SAL*RB2*RB2
T1(N)=TET1*RB2
XM(N)=XB2-DT*RB2*COS(TW1-PI/2.)
YM(N)=YB2-DT*RB2*SIN(TW1-PI/2.)

```

C

```

DTDV=(TET-ZTET)/((VOL-ZVOL)*RB2*RB2*RB2)
TET2=TET*.99
CALL CALGEMPAR(GAMA,ALFA,TET2,H2R2,SAR,SAL,TET1,DT,R1Z,R2Z)
DPDT=(H2R-H2R2)*SIGMA/(RB2*(TET-TET2))
HKTE(N)=DTDV*DPDT
RETURN
END

```

```

*****
*****

```

SUBROUTINE CALVOLPAR(GA,AL,TE,VOL)

```

*****
* SUBROUTINA PARA HALLAR EL VOLUMEN ADIMENSIONAL DE UN MENISCO *
* GENERALIZADO A PARTIR DE UN TETA ITERADO (CASO BOLA-PARED) *
*****

```

INCLUDE 'PREC.INC'

C

CALL CALCORPAR(GA,AL,TE,X1,Y1,X2,Y2,X3,Y3,X4,Y4,X5,Y5,R2,T1,T3)

C

```

PI=3.14159265
Z6=X4-X3
Z7=X5-X3
Z1=(Y3*Y3+R2*R2)*(X5-X4)
Z2=(Z7*Z7*Z7-Z6*Z6*Z6)/3.
Z3=Y3*Z7*SQRT(R2*R2-Z7*Z7)
Z4=Y3*Z6*SQRT(R2*R2-Z6*Z6)
Z5=Y3*T3*R2*R2
VOL3=PI*(Z1-Z2-Z3+Z4-Z5)
Z1=COS(TE)
VOL2=PI*(2./3.-Z1+(Z1*Z1*Z1)/3.)
IF(AL.GE.0.)THEN
  VOL4=0.
ELSE
  Y8=SQRT(1.-X2*X2)
  T4=ATAN(Y8/X2)
  Z4=COS(T4)
  VOL4=PI*(2./3.-Z4+(Z4*Z4*Z4)/3.)
ENDIF

```

C

```

VOL=VOL3-VOL2+VOL4
RETURN
END

```

```

*****
*****

```

SUBROUTINE CALCORPAR(GA,AL,TE,X1,Y1,X2,Y2,X3,Y3,X4,Y4,X5,Y5,R2,T1,T3)

```

*****
*****

```

```

* SUBROUTINA PARA EL CALCULO DE LAS COORDENADAS LOCALES DE UN MENISCO *
* GENERALIZADO (CASO BOLA-PARED) *
*****

```

```

INCLUDE 'PREC.INC'

```

C

```

PI=3.14159265
X1=0.
X2=1.+AL
Y1=0.
Y2=0.
Y3=(X2+1.)*SIN(TE)/(1.+COS(TE))
X3=X2-Y3/TAN(TE)
R2=X3
T1=Y3
X4=0.
Y4=Y3
X5=X2-COS(TE)
Y5=SIN(TE)
T3=PI-TE

```

C

```

RETURN
END

```

```

*****
*****

```

```

SUBROUTINE CALGEMPAR(GA,AL,TE,H2R,SAR,SAL,T1,DT,R1,R2)

```

```

*****
* SUBROUTINA PARA HALLAR LOS VALORES DE UN MENISCO UNA VEZ SE SABE TETA *
* CONVERGIDO (CASO BOLA-PARED) *
*****

```

```

INCLUDE 'PREC.INC'

```

C

```

PI=3.14159265
CALL CALCORPAR(GA,AL,TE,X1,Y1,X2,Y2,X3,Y3,X4,Y4,X5,Y5,R2,T1,T3)

```

C

```

* CALCULO DE LA SUCCION ADIMENSIONAL EN EL CUELLO DEL MENISCO *
*****

```

C

```

R1=Y3-R2
H2R=(1./R1-1./R2)
A1=(R2+X2)*Y3/2.
A4=R2*R2*T3/2.
IF(AL.GE.0.)THEN
  A5=0.
  A2=TE/2.
ELSE
  Y8=SQRT(1.-X2*X2)
  T4=ATAN(Y8/X2)
  A5=X2*Y8/2.
  A2=(TE-T4)/2.
ENDIF
SAR=A1-A2-A4-A5
SAL=PI*R2*(Y3*T3-R2*(COS(TE)+1.))

```

C

```

DT=1.+AL/2.

```


C

RETURN
END

SUBROUTINE VOLPOR(N)

* SUBROUTINA PARA DETERMINAR EN CADA PORO DIVERSOS PARAMETROS (ESPESOR *
* DE LA PELICULA, VOLUMEN VACIO, ETC.) *

INCLUDE 'COM.INC'
RAD=PI/180.

C

SUMV=0.
SUMA=0.
SUMS=0.
K=0
DO 30 I=1,ABS(IKPN(N))
J=KPN(N,I)
IF(J.LE.0)GO TO 30
K=K+1
SUMV=SUMV+V(J)/2.
SUMA=SUMA+SARM(J)
SUMS=SUMS+PWPA(J)
30 CONTINUE
40 AHP(N)=AMAX(N)-SUMA
VHP(N)=VMAX(N)-SUMV
IF(AHP(N).LT.0.)THEN
IF((IPOR(N).EQ.3).OR.(IPOR(N).EQ.13))THEN
AHP(N)=0.
ELSE
WRITE(6,*)' ER.VOLPOR NP,AMAX,SUMA,AHP',N,AMAX(N),
SUMA,AHP(N)
CALL STOPAR
ENDIF
ENDIF
IF(VHP(N).LE.0.)THEN
IF((IPOR(N).EQ.3).OR.(IPOR(N).EQ.13))THEN
VHP(N)=(APM(N)*RUNIV*ABST)/(0.02894*(PGCOP-WPP(N)))
IF((VHP(N).LE.0.).OR.(VHP(N).GT.(VMAX(N)/10.))THEN
VHP(N)=VMAX(N)/10.
ENDIF
ELSE
WRITE(6,*)' ER.VOLPO.NP,VMAX,SUMV,VHP',N,VMAX(N),SUMV,VHP(N)
CALL STOPAR
ENDIF
ENDIF

C

FI=-SUMS*1.E+03/FLOAT(K)
IF(FI.LT.0.14723513)THEN
IF(IAT.EQ.1)WRITE(6,*)' ATENCION VOLPOR: NP,FI<0.147...=',N,FI
FI=0.14723513
ENDIF

C

DELFI(N)=CFILM/(FI**(1./6.))

RETURN

END

SUBROUTINE FASINT(NP,NM)

* SUBROUTINA PARA DETERMINAR EL FLUJO DE AIRE SECO A TRAVES DE LA *
* INTERFASE *

INCLUDE 'COM.INC'

C AMINF=V(NM)*1.609*APP(NP)/HENRY

C C1=BETA*SALM(NM)/V(NM)
C C2=C1*(AMINF-ADMM(NM))
CALL DIFEXP(C1,C2,TINC,XAMINC)
AMINC=XAMINC

C IF((ADMM(NM)+AMINC).LE.0.)AMINC=-ADMM(NM)*0.95
C IF((APM(NP)-AMINC).LE.0.)AMINC=APM(NP)*0.95

C ADMM(NM)=ADMM(NM)+AMINC
C APM(NP)=APM(NP)-AMINC
C RIAAI=RIAAI+ABS(AMINC)
C RINAI=RINAI+AMINC

C RETURN
END

SUBROUTINE FWINT(NP,NM)

* SUBROUTINA PARA DETERMINAR EL FLUJO DE VAPOR DE AGUA A TRAVES *
* INTERFASE *

C INCLUDE 'COM.INC'

C FI=PWPA(NM)*1.E+03
H=EXP(FI*7.2529E-07)
EVWEQ=H*17.5/760.

C C1=CVAP*SALM(NM)*RUNIV*ABST/(VHP(NP)*0.01801)
C C2=CVAP*SALM(NM)*(WPP(NP)-EVWEQ)
CALL DIFEXP(C1,C2,TINC,XVMINC)
VMINC=XVMINC

C IF((V(NM)+VMINC).GT.0.)GO TO 196

C N=NM
WRITE(6,*)' MENISCO QUE SE AGOTABA POR INTERFASE.IMPEDIMOS'
WRITE(6,*)' EN FWINT: NP,NAGO',NP,N
WRITE(6,*)' TIME',TIME
WRITE(6,*)' PWPA,V',PWPA(N),V(N)

```
WRITE(6,*)' EVWEQ,C1,C2,VMINC',EVWEQ,C1,C2,VMINC
WRITE(6,*)' SALM,VHP,WPP',SALM(N),VHP(NP),WPP(NP)
VMINC=-V(N)*0.5
WRITE(6,*)' VMINC AUTORIZADO',VMINC
```

```
C
196 IF((WPM(NP)-VMINC).GT.0.)GO TO 197
```

```
C
      N=NM
      WRITE(6,*)' VAPOR PORO QUE SE AGOTABA POR INTERF.IMPEDIMOS'
      WRITE(6,*)' EN FVWINT: NP,NAGO',NP,N
      WRITE(6,*)' TIME',TIME
      WRITE(6,*)' PWPA,V',PWPA(N),V(N)
      WRITE(6,*)' EVWEQ,C1,C2,VMINC',EVWEQ,C1,C2,VMINC
      WRITE(6,*)' SALM,VHP,WPP',SALM(N),VHP(NP),WPP(NP)
      VMINC=WPM(NP)*0.5
      WRITE(6,*)' VMINC AUTORIZADO',VMINC
```

```
C
197 V(NM)=V(NM)+VMINC
      WPM(NP)=WPM(NP)-VMINC
      RIAWI=RIAWI+ABS(VMINC)
      RINWI=RINWI+VMINC
```

```
C
      RETURN
      END
```

```
*****
*****
```

```
      SUBROUTINE FWFILM(NP,NM1,NM2)
```

```
*****
* SUBROUTINA PARA DETERMINAR FLUJO DE AGUA ENTRE DOS MENISCOS POR LA *
* PELICULA *
*****
```

```
      INCLUDE 'COM.INC'
```

```
C
      I1=MN(NM1,1)
      I2=MN(NM1,2)
      I3=MN(NM2,1)
      I4=MN(NM2,2)
      XM1=XM(NM1)
      YM1=YM(NM1)
      XM2=XM(NM2)
      YM2=YM(NM2)
      IF(I1.EQ.I4)THEN
          NB=I1
          TE1=T1(NM1)
          TE2=TETA(NM2)
          GO TO 100
      ENDIF
      IF(I2.EQ.I3)THEN
          NB=I2
          TE1=TETA(NM1)
          TE2=T1(NM2)
          GO TO 100
      ENDIF
      IF(I2.EQ.I4)THEN
          NB=I2
          TE1=TETA(NM1)
```

```

      TE2=TETA(NM2)
      GO TO 100
    ENDIF
    IF(I1.EQ.I3)THEN
      NB=I1
      TE1=T1(NM1)
      TE2=T1(NM2)
      GO TO 100
    ENDIF

```

```

    WRITE(6,*)' ERROR CONECTIVIDAD FWFILM(NP,NM1,NM2):',NP,NM1,NM2
    CALL STOPAR

```

```

C
100 XB1=XB(NB)
    YB1=YB(NB)
    RB1=TR(JT(NB))
    CALL FILMGEO(XM1,YM1,XM2,YM2,TE1,TE2,XB1,YB1,RB1,ZTRAN,XLON)
200 CONTINUE

```

```

C
*****
*   FLUJO POR DIFUSION DEL AGUA CON AIRE DISUELTO POR GRADIENTE DE   *
*                               POTENCIAL                               *
*****

```

```

C
      ZTER=(GX*(XM2-XM1)+GY*(YM2-YM1))/(-9.8E+05)
      PRESI=PWPA(NM2)-PWPA(NM1)+ZTER
250 DF=DELFI(NP)

```

```

C
      FLUJO EXPONENCIAL:
      CC=ZTRAN*9.8E+05*DF*DF*DF/(3.*VISCO*XLON)
      C1=(HKTE(NM1)+HKTE(NM2))*CC
      C2=PRESI*CC
      IF(C1.LT.0.)C1=0.
      CALL DIFEXP(C1,C2,TINC,XVWINC)
      VWINC=XVWINC

```

```

C
      WMINC=VWINC

```

```

C
      IF((V(NM1)+WMINC).LE.0.)WMINC=-V(NM1)*0.95
      IF((V(NM2)-WMINC).LE.0.)WMINC=V(NM2)*0.95

```

```

C
      V(NM1)=V(NM1)+WMINC
      V(NM2)=V(NM2)-WMINC
      RIAWF=RIAWF+ABS(WMINC)
      RINWF=RINWF+WMINC

```

```

C
*****
*   CALCULO DEL AIRE DISUELTO CIRCULADO (ARRASTRADO EN LA DIFUSION)   *
*****

```

```

C
      IF(PRESI.GE.0.)THEN
        SPRES=1.
      ELSE
        SPRES=-1.
      ENDIF
      IF(VWINC.GE.0.)THEN
        SVWIN=1.
      ELSE
        SVWIN=-1.
      ENDIF

```

```

C

```

```

IF(SPRES.NE.SVWIN) THEN
  WRITE(6,*) ' ATENCION SIGNOS'
  VWINC=-VWINC
ENDIF
IF(PRESI.GE.0.) THEN
  NX=NM2
ELSE
  NX=NM1
ENDIF
AMINC=ADMM(NX)*VWINC/V(NX)

```

```

C
  IF((ADMM(NM1)+AMINC).LE.0.) AMINC=-ADMM(NM1)*0.95
  IF((ADMM(NM2)-AMINC).LE.0.) AMINC=ADMM(NM2)*0.95

```

```

C
  ADMM(NM1)=ADMM(NM1)+AMINC
  ADMM(NM2)=ADMM(NM2)-AMINC
  RIAAFD=RIAAFD+ABS(AMINC)
  RINAFD=RINAFD+AMINC

```

```

C
*****
* FLUJO POR EFUSION DEL AIRE DISUELTO, EN LA PELICULA, POR GRADIENTE *
* DE CONCENTRACION *
*****

```

```

C
  CONCI=(ADMM(NM2)/V(NM2))-(ADMM(NM1)/V(NM1))

```

```

C
  C1=DEAD*ZTRAN*DELFI(NP)*(1./V(NM2)+1./V(NM1))/XLON
  C2=DEAD*ZTRAN*DELFI(NP)*CONCI/XLON
  CALL DIFEXP(C1,C2,TINC,XAMINCE)
  AMINCE=XAMINCE

```

```

C
  IF((ADMM(NM1)+AMINCE).LE.0.) AMINCE=-ADMM(NM1)*0.95
  IF((ADMM(NM2)-AMINCE).LE.0.) AMINCE=ADMM(NM2)*0.95

```

```

C
  ADMM(NM1)=ADMM(NM1)+AMINCE
  ADMM(NM2)=ADMM(NM2)-AMINCE
  RIAAFE=RIAAFE+ABS(AMINCE)
  RINAFE=RINAFE+AMINCE

```

```

C
  RETURN
  END

```

```

*****
*****

```

```

SUBROUTINE FILMGEO(XM1,YM1,XM2,YM2,TE1,TE2,XB1,YB1,RB1,ZTRAN,XLON)

```

```

*****
* SUBROUTINA PARA DETERMINAR LA GEOMETRIA DE LA PELICULA ENTRE DOS *
* MENISCOS *
*****

```

```

  INCLUDE 'PREC.INC'

```

```

C
  XV1=XM1-XB1
  XV2=XM2-XB1
  YV1=YM1-YB1
  YV2=YM2-YB1
  PESC=XV1*XV2+YV1*YV2
  PMOD=SQRT(XV1*XV1+YV1*YV1)*SQRT(XV2*XV2+YV2*YV2)

```

ZEDA=ACOS(PESC/PMOD)

C

RMED=RB1*(COS(TE1)+COS(TE2))/2.
XL1=RB1*(ZEDA-TE1-TE2)
XL2=ZEDA*RMED
XLON=(XL1+XL2)/2.

C

ZE=ACOS(RMED/RB1)
ZTRAN=2.*ZE*RB1

C

RETURN
END

SUBROUTINE FILMGPAR(XM1, YM1, XM2, YM2, TE1, TE2, ZTRAN, XLON)

* SUBROUTINA PARA DETERMINAR LA GEOMETRIA DE LA PELICULA ENTRE DOS *
* MENISCOS (CASO PELICULA-PARED) *

INCLUDE 'PREC.INC'

C

XV1=XM1-XM2
YV1=YM1-YM2
DIST=SQRT(XV1*XV1+YV1*YV1)
XLON=(2.*DIST-TE1-TE2)/2.
ZTRAN=TE1+TE2

C

RETURN
END

SUBROUTINE FACOND(NP, NP2)

* SUBROUTINA PARA DETERMINAR EL FLUJO DE AIRE GLOBAL ENTRE DOS POROS *
* A TRAVES DE LOS CONDUCTOS (DIFUSION POR GRADIENTES DE PRESION) Y EL *
* FLUJO DE VAPOR DE AGUA POR GRADIENTES DE CONCENTRACION (EFUSION) *

INCLUDE 'COM.INC'

C

* DIFUSION DE AIRE CON VAPOR POR GRADIENTE DE PRESIONES *

C

PRESI=APP(NP2)+WPP(NP2)-APP(NP)-WPP(NP)
AEQ=(AHP(NP)+AHP(NP2))/2.
REQ2=AEQ/PI
XV1=XP(NP)-XP(NP2)
YV1=YP(NP)-YP(NP2)
HLEF=SQRT(XV1*XV1+YV1*YV1)
HLEQ=FPOISE*HLEF

C

CPEPE=PI*REQ2*REQ2*1.225E+05/(HLEQ*VISCA)

C1=CPEPE*(1./VHP(NP2)+1./VHP(NP))
C2=CPEPE*PRESI

CALL DIFEXP(C1,C2,TINC,XVF1AT)
VF1AT=XVF1AT

IF(PRESI.GE.0.)THEN
NX=NP2
ELSE
NX=NP
ENDIF
VAS=VF1AT*APP(NX)/(APP(NX)+WPP(NX))
VWP=VF1AT-VAS

APINC=VAS*0.02894/(RUNIV*ABST)
WPINC=VWP*0.01801/(RUNIV*ABST)

IF((APM(NP)+APINC).LE.0.)APINC=-APM(NP)*0.95
IF((APM(NP2)-APINC).LE.0.)APINC=APM(NP2)*0.95

IF((WPM(NP)+WPINC).LE.0.)WPINC=-WPM(NP)*0.95
IF((WPM(NP2)-WPINC).LE.0.)WPINC=WPM(NP2)*0.95

APM(NP)=APM(NP)+APINC
APM(NP2)=APM(NP2)-APINC
RIAAC=RIAAC+ABS(APINC)
RINAC=RINAC+APINC
WPM(NP)=WPM(NP)+WPINC
WPM(NP2)=WPM(NP2)-WPINC
RIAWCD=RIAWCD+ABS(WPINC)
RINWCD=RINWCD+WPINC

* EFUSION DE VAPOR POR GRADIENTE DE CONCENTRACION *

CONCI=(WPP(NP2)-WPP(NP))*0.01801/(RUNIV*ABST)
C1=DEWP*AEQ*(1./VHP(NP2)+1./VHP(NP))/HLEF
C2=DEWP*AEQ*CONCI/HLEF
CALL DIFEXP(C1,C2,TINC,XWPINCE)
WPINCE=XWPINCE

IF((WPM(NP)+WPINCE).LE.0.)WPINCE=-WPM(NP)*0.95
IF((WPM(NP2)-WPINCE).LE.0.)WPINCE=WPM(NP2)*0.95

WPM(NP)=WPM(NP)+WPINCE
WPM(NP2)=WPM(NP2)-WPINCE
RIAWCE=RIAWCE+ABS(WPINCE)
RINWCE=RINWCE+WPINCE

RETURN
END

SUBROUTINE DIFEXP(C1,C2,TINC,XMINC)

* SUBROUTINA DE INCREMENTO DE MASA EN EL TIEMPO TRAS LA RESOLUCION DE *

LA ECUACION DIFERENCIAL DE FLUJO

* *****

INCLUDE 'PREC.INC'

C

```
IF(C1.LE.0.)THEN
  IF(C1.LT.0.)THEN
    WRITE(6,*)' ERROR DIFEXP: 0>C1=',C1,' ME PARO'
    CALL STOPAR
  ENDIF
  XMINC=C2*TINC
ELSE
  XMINC=(C2/C1)*(1.-EXP(-C1*TINC))
ENDIF
```

C

RETURN
END

SUBROUTINE PREVOLMEN(NM)

* SUBROUTINA PREVIA A VOLMEN *

INCLUDE 'COM.INC'

C

CALL VOLMEN(NM)

C

RETURN
END

SUBROUTINE PREVOLPOR(NP)

* SUBROUTINA PREVIA A VOLPOR *

C

INCLUDE 'COM.INC'

C

```
CALL VOLPOR(NP)
APP(NP)=APM(NP)*RUNIV*ABST/(VHP(NP)*0.02894)
WPP(NP)=WPM(NP)*RUNIV*ABST/(VHP(NP)*0.01801)
```

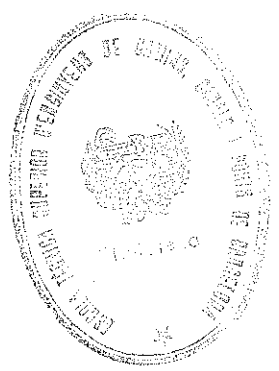
C

RETURN
END

SUBROUTINE ACTU1(J,J2)

* SUBROUTINA DE ACTUALIZACION DE MASAS Y PRESIONES *

C INCLUDE 'COM.INC'
C CALL PREVOLMEN(J)
C CALL PREVOLMEN(J2)
C RETURN
C END



PROGRAMA CHEQ

Módulo de chequeos y cambios geométricos

```

*****
*****
**
**
**          PROGRAMA CHEQ.FOR
**
**
**          MODULO DE CHEQUEOS Y CAMBIOS GEOMETRICOS
**
*****
*****
**
**          SEGMENTO DE PROGRAMA QUE EFECTUA LAS OPERACIONES
**          NECESARIAS PARA LA ACTUALIZACION DE LAS VARIABLES DE
**          CONECTIVIDAD DEL MODELO NUMERICO ANTE VARIACIONES
**          DEL MISMO: MOVIMIENTOS DE LAS PARTICULAS, APARICION
**          Y DESAPARICION DE CONTACTOS-MENISCO ENTRE ELLAS, ETC.
**          EN PARTICULAR DEFINE LOS POROS Y CALCULA SU AREA.
**
*****
*****

```

```

SUBROUTINE CH_NUE_CON(NB)

```

```

*****
*          SUBROUTINA DE CHEQUEO DE LA APARICION DE NUEVOS CONTACTOS POR
*          MOVIMIENTO DE LAS BOLAS
*****

```

```

INCLUDE 'COM.INC'

```

```

C          DIMENSION MBZ(MBDIM),MNZ(MBDIM,2),NRPL(10),NBPL(10)

```

```

C          INBPL=0
          NROT=0
          NROTP=0
          NPEND=0
10         INCID=0
          IKLIS(NB)=0

```

```

C          XB(NB)=XB(NB)+XBI(NB)
          YB(NB)=YB(NB)+YBI(NB)
          TB(NB)=TB(NB)+TBI(NB)

```

```

C          XBI(NB)=0.
          YBI(NB)=0.
          TBI(NB)=0.

```

```

C          IF(IMB(NB).GT.0)THEN
            J=0
            IF(MB(NB,1).EQ.-1)J=1
            DO I=1+J,IMB(NB)+J
              NM=MB(NB,I)
              CALL CAL_COOR_MEN(NM)
            ENDDO
            CALL REORDENA_MB(NB)
          ENDIF

```

```

C          NROT=0
50         INM=1
          NM=MB(NB,1)
          D=SQRT(XB(NB)*XB(NB)+YB(NB)*YB(NB))

```

```

IF(NM.EQ.-1)THEN
  CALL CH_BOLA ABAN CONT(NB,NROT,D)
  IF(NROT.EQ.1)THEN
    NM=MB(NB,1)
    GO TO 60
  ENDIF
  INM=2
  NM=MB(NB,2)
ELSE
  IF(D.GT.0.95*RLICOB)CALL CH_BOLA INGR CONT(NB,NROT,D)
  IF(NROT.EQ.-1)INM=2
ENDIF

```

```

C
60 IF((NROTP.NE.0).AND.(NPEND.EQ.0))THEN
  WRITE(6,*)' CAMBIADO NROT POR NROTP.RECURR.CH_NUE_CON',NB
  NROT=NROTP
ENDIF
IF(IMB(NB).EQ.0)THEN
  CALL CH_BOLA PORO(NB,-MB(NB,2),NROT,INCID)
  IF(INCID.LT.0)GO TO 950
  GO TO 900
ENDIF

```

```

C
  IMBZ=IMB(NB)
  MBZ(1)=MB(NB,1)
  DO I=2,IMBZ+1
    NMA=MB(NB,I)
    MBZ(I)=NMA
    MNZ(I,1)=MN(NMA,3)
    MNZ(I,2)=MN(NMA,4)
  ENDDO

```

```

C
  NPINF=MN(NM,3)
  NPSUP=MN(NM,4)
  IF(NPSUP.NE.-1)THEN
    CALL CH_BOLA PORO(NB,NPSUP,NROT,INCID)
    IF(INCID.LT.0)GO TO 950
  ENDIF
  IF(NPSUP.NE.NPINF)THEN
    CALL CH_BOLA PORO(NB,NPINF,NROT,INCID)
    IF(INCID.LT.0)GO TO 950
  ENDIF

```

```

C
  IF(IMBZ.EQ.1)GO TO 900
  IF((IMBZ.EQ.2).AND.(INM.EQ.1))GO TO 900

```

```

C
  INM2=INM+1
  NM2=MBZ(INM2)
  NPINF2=MNZ(INM2,1)
  NPSUP2=MNZ(INM2,2)
  IF((NPSUP.EQ.NPINF2).OR.(NPSUP.EQ.NPSUP2))THEN
    NPCHE=NPSUP
    NPCHE0=NPINF
    GO TO 100
  ENDIF
  IF((NPINF.EQ.NPINF2).OR.(NPINF.EQ.NPSUP2))THEN
    NPCHE=NPINF
    NPCHE0=NPSUP
    GO TO 100
  ENDIF

```

```

WRITE(6,*)' FALLO HIPOTESIS NPSUP, NPINF, NPSUP2, NPINF2, NB'
WRITE(6,*)'      ', NPSUP, NPINF, NPSUP2, NPINF2, NB
WRITE(6,*)' ME PARO'
CALL STOPAR

C
100 CONTINUE

NPCHE2=0
IDOINF=INM+1
IDOSUP=IMBZ+2*(INM-1)-1
DO J=IDOINF, IDOSUP
NM=MBZ(J)
NPINF=MNZ(J,1)
NPSUP=MNZ(J,2)
IF(NPCHE.EQ.NPINF) THEN
  NPCHE2=NPSUP
  GO TO 200
ENDIF
IF(NPCHE.EQ.NPSUP) THEN
  NPCHE2=NPINF
  GO TO 200
ENDIF
IF(NPCHE2.EQ.NPINF) THEN
  NPCHE2=NPSUP
  GO TO 200
ENDIF
IF(NPCHE2.EQ.NPSUP) THEN
  NPCHE2=NPINF
  GO TO 200
ENDIF
WRITE(6,*)' FALLO HIPOTESIS NPINF, NPSUP, NPCHE, NB, NM'
WRITE(6,*)' NPINF, NPSUP, NPCHE, NB, NM'
WRITE(6,*)'      ME PARO'
CALL STOPAR
200 IF(NPCHE2.EQ.NPCHE) GO TO 300
IF(NPCHE2.EQ.-1) GO TO 400
IF(NPCHE2.EQ.NPCHE0) GO TO 300
CALL CH BOLA PORO(NB, NPCHE2, NROT, INCID)
IF(INCID.LT.0) GO TO 950
NPCHE=NPCHE2
300 ENDDO
400 CONTINUE

C
900 IF(NROT.EQ.-1) THEN
  WRITE(6,*)' ATENCION, PUESTO QUE SE DETECTA QUE LA BOLA ', NB
  WRITE(6,*)'      INGRESA EN EL CONTORNO, PERO NO DONDE.'
  IF((NROTP.NE.0).AND.(NPEND.EQ.0)) THEN
    WRITE(6,*)' SIGO: POSIBLEMENTE DEBIDO A NROT=NROTP'
  ELSE
    WRITE(6,*)' ME PARO'
    CALL STOPAR
  ENDIF
ENDIF

C
GO TO 960
950 IF(INBPL.GE.10) THEN
  WRITE(6,*)' CH_NUE_CON: NIVELES RECURR.>10.ME PARO.NB=', NB
  CALL STOPAR
ENDIF
NPEND=1

```

```
INBPL=INBPL+1
NBPL(INBPL)=NB
NRPL(INBPL)=NROT
NB=-INCID
GO TO 10
```

```
C
960 IF(INBPL.EQ.0)GO TO 990
    NB=NBPL(INBPL)
    NROTP=NRPL(INBPL)
    INBPL=INBPL-1
    NPEND=0
    GO TO 10
```

```
C
990 RETURN
    END
```

```
*****
*****
```

```
      SUBROUTINE CH_BOLA_PORO(NB, NP, NROT, INCID)
```

```
*****
*      SUBROUTINA DE CHEQUEO DE NUEVOS CONTACTOS DE BOLAS CON OTRAS DE SU *
*                                  MISMO PORO                               *
*****
```

```
      INCLUDE 'COM.INC'
```

```
C
      DIMENSION LIS(KPDIM,3),KPNZ(KPDIM),NUEM(5),NC(5),AMAXZ(5)
C
      IF((NB.EQ.0).OR.(NP.EQ.0))THEN
        WRITE(6,*)' ATENCION EN CH_BOLA_PORO(NB,NP=',NB,NP
          IF(NROT.NE.0)THEN
            WRITE(6,*)'  SEGURAMENTE DEBIDO A I/O CONTORNO.RETORNO'
            GO TO 960
          ELSE
            WRITE(6,*)'  ME PARO'
            CALL STOPAR
          ENDIF
        ENDIF
      ENDIF
```

```
C
      INUEM=0
      ILIS=0
      ILISC=0
      INC=0
```

```
C
*****
*      DETECCION DE LAS BOLAS DEL PORO Y CUALES YA ESTAN EN CONTACTO *
*****
```

```
C
      IF(IKPN(NP).LT.0)THEN
        NBMIN=MN(KPN(NP,1),2)
        NBMAX=MN(KPN(NP,1),1)
      ELSE
        NBMIN=MN(KPN(NP,1),1)
        NBMAX=MN(KPN(NP,1),2)
      ENDIF
      LIS(1,1)=NBMAX
      IFLAG=0
      LIS(1,3)=0
```

```

IF(NBMAY.EQ.NB)THEN
  LIS(1,2)=-1
  IFLAG=-1
ELSE
  LIS(1,2)=0
ENDIF
IF(NBMIN.EQ.NB)LIS(1,2)=-1
NBMIN=NBMAY

C
DO I=2,ABS(IKPN(NP))
IM=KPN(NP,I)
LIS(I,3)=0
IF(IM.LT.0)THEN
  NBMAY=-IM
  IF(ILISC.EQ.0)THEN
    ILISC=1
    LIS(I-1,3)=1
  ENDIF
  ILISC=ILISC+1
  LIS(I,3)=1
  LIS(I,1)=NBMAY
  IF(NBMAY.EQ.NB)THEN
    LIS(I,2)=-1
  ELSE
    LIS(I,2)=0
  ENDIF
ELSE
  IF(NBMAY.EQ.MN(IM,1))THEN
    NBMAY=MN(IM,2)
  ELSE
    NBMAY=MN(IM,1)
  ENDIF
  LIS(I,1)=NBMAY
  IF(NBMAY.EQ.NB)THEN
    LIS(I,2)=-1
    LIS(I-1,2)=-1
  ELSE
    LIS(I,2)=0
  ENDIF
  IF(NBMIN.EQ.NB)LIS(I,2)=-1
  NBMIN=NBMAY
ENDIF
ENDDO
ILIS=ABS(IKPN(NP))
ILCOR=ILIS
IF(IFLAG.EQ.-1)LIS(ILIS,2)=-1

```

```

C
*****
*          BUSQUEDA DE BOLAS AISLADAS QUE NO SEAN DEL CONTORNO          *
*****

```

```

C
J=IPOR(NP)
IAIS=0
ITOT=0
IF((J.EQ.11).OR:(J.EQ.13).OR:(J.EQ.12))THEN
  DO I=1,NBAIS
  N=LIAIS(I)
  IF(-MB(N,2).EQ.NP)THEN
    ITOT=ITOT+1
    IF(MB(N,1).NE.-1)THEN

```



```

        IAIS=IAIS+1
        ILIS=ILIS+1
        LIS(ILIS,1)=N
        LIS(ILIS,2)=0
        IF(N.EQ.NB)LIS(ILIS,2)--1
        LIS(ILIS,3)--1
    ENDIF
ENDIF
ENDDO
IF(ITOT.EQ.0)THEN
    WRITE(6,*)' ERROR, NO ENCONTRE AISLADAS.NP,NB ,ME PARO'
    WRITE(6,*)'      ',NP,NB
    CALL STOPAR
ENDIF
ENDIF

```

C

 * CONTROL DE LA ENTRADA EN EL CONTORNO DE ALGUNA BOLA DEL PORO *

 C

```

    IF((IPOR(NP).EQ.3).OR.(IPOR(NP).EQ.13))THEN
        DO I=1,ILIS
            N=LIS(I,1)
            IF(MB(N,1).NE.-1)THEN
                IF(N.NE.NB)THEN
                    INCID=10
                    CALL CH BOLA INGR CONT(N,INCID,100.)
                    IF(INCID.EQ.-1)THEN
                        INCID=-N
                        GO TO 960
                    ENDIF
                ENDIF
            ENDIF
        ENDIF
    ENDDO
ENDIF

```

C

 * CHEQUEOS BOLA-BOLA *

 C

```

    DO I=1,5
    NC(I)=0
    ENDDO
    NSI=0

```

```

C
DO I=1,ILIS
IF(LIS(I,2).NE.-1)THEN
CALL CH BOLA BOLA(NB,LIS(I,1),D)
IF((D.GT.0.)AND.(D.LT.2.83*XUMB))THEN
IF(IKLIS(NB).LT.3)THEN
IKLIS(NB)=IKLIS(NB)+1
KLIS(NB,IKLIS(NB))=LIS(I,1)
ELSE
WRITE(6,*)' BOLA, TOO CERCANAS: NB,NPERDIDA',NB,LIS(I,1)
ENDIF
ENDIF
IF(D.LE.0.)THEN
DO J=1,INC
IF(NC(J).EQ.LIS(I,1))THEN
WRITE(6,*)' SE HA DADO EL CASO ALTAMENTE IMPROBABLE'

```

```

WRITE(6,*)' DE CONTACTO POR PARTIDA DOBLE. ME QUEDO'
WRITE(6,*)' CON LA PRIMERA POSICION DE CONTACTO Y SIGO'
WRITE(6,*)' NB, NC_DOBLE ',NB,NC(J)
LIS(I,2)=2
GO TO 200
ENDIF
ENDDO
DO 150 J=1,IMB(NB)+1
IM=MB(NB,J)
IF(IM.LE.0)GO TO 150
NB MAY=MN(IM,1)
IF(NB MAY.EQ.NB)NB MAY=MN(IM,2)
IF(NB MAY.EQ.LIS(I,1))THEN
GO TO 200
ENDIF
150 CONTINUE
C
IF((IMB(NB).EQ.0).AND.(IMB(LIS(I,1)).EQ.0))THEN
WRITE(6,*)' DOS BOLAS AISLADAS SOLAPAN:',NB,LIS(I,1)
WRITE(6,*)' CASO NO CONTEMPLADO:IGNORO CONTAC. Y SIGO'
GO TO 200
ENDIF
C
CALL CH CONT CORR(NP,NB,I RESP,I,ILCOR,LIS)
IF(I RESP.EQ.0)GO TO 200
C
INC=INC+1
IF(INC.GT.5)THEN
WRITE(6,*)' DEMASIADOS NUEVOS CONTACTOS NC, ME PARO'
CALL STOPAR
ENDIF
LIS(I,2)=1
NC(INC)=LIS(I,1)
200 ENDF
ENDF
C
IF(NROT.EQ.-1)THEN
IF(LIS(I,3).EQ.1)THEN
IF(LIS(I+1,3).EQ.1)THEN
IF((LIS(I,1).NE.NB).AND.(LIS(I+1,1).NE.NB))THEN
NSI=0
CALL CH BOLA SEG CONT(NB,LIS(I,1),LIS(I+1,1),NSI)
IF(NSI.EQ.1)THEN
NROT=-2
ENDIF
ENDIF
ENDIF
ENDIF
ENDIF
ENDDO
C
*****
* REORGANIZACION DE LAS CONECTIVIDADES SEGUN LOS NUEVOS CONTACTOS *
*****
C
IF(INC.EQ.0)THEN
IF(NROT.NE.0)THEN
IF(NROT.LT.0)THEN
ENDIF
C

```

```
IKPNZ=ABS(IKPN(NP))
DO I=1,IKPNZ
KPNZ(I)=KPN(NP,I)
ENDDO
```

```
C
MINI=KPN(NP,1)
CALL DESARMA_PORO(NP,NROT)
DO I=1,IKPNZ
IF(KPNZ(I).GT.0)THEN
NPN=NP
CALL DEF_PORO(KPNZ(I),NPN,NROT)
IF(NPN.NE.0)GO TO 404
ENDIF
ENDDO
```

```
C
DO I=1,IKPNZ
IF(KPNZ(I).GT.0)THEN
NPN=NP
CALL DEF_PORO(-KPNZ(I),NPN,NROT)
IF(NPN.NE.0)GO TO 404
ENDIF
ENDDO
```

404

```
C
IF(NPN.NE.NP)THEN
```

```
C
IF(NROT.LT.0)THEN
IF(ICASO.NE.2)THEN
NPV=MN(ABS(MINI),3)
IF(NPV.EQ.NP)THEN
WRITE(6,*)' ERROR CHEQ: AL DETERMINAR VECINO'
WRITE(6,*)' NPV=NP,MN(,4):',NP,MN(ABS(MINI),4)
CALL STOPAR
ENDIF
APM(NPV)=APM(NPV)+APM(NP)
WPM(NPV)=WPM(NPV)+WPM(NP)
ENDIF
APM(NP)=0.
WPM(NP)=0.
CALL NP_EMP_LIS(NP,1)
GO TO 960
ELSE
```

```
C
WRITE(6,*)' ERROR HIPOTESIS REDEFINIC. PORO',NP,NPN
WRITE(6,*)' QUE SE ENVIABA POR CUESTION SOLO IPOR'
CALL STOPAR
```

```
ENDIF
ENDIF
```

```
C
CALL RECAL_PORO(NP,AREA,APOLI)
INC=1
NC(1)=NP
AMAXZ(1)=AREA
GO TO 800
```

```
C
ELSE
CALL RECAL_PORO(NP,AREA,APOLI)
INC=1
NC(1)=NP
AMAXZ(1)=AREA
GO TO 900
```

ENDIF
ENDIF

C
IKPNZ=ABS(IKPN(NP))
DO I=1,IKPNZ
KPNZ(I)=KPN(NP,I)
ENDDO

C
DO I=1,INC
IF(NC(I).GT.0)THEN
NBC=NC(I)

C

* CREACION DE UN NUEVO MENISCO DE CONTACTO *

C
CALL NM EMP LIS(NM,-1)
INUEM=INUEM+1
NUEM(INUEM)=NM
IF(JT(NB).EQ.JT(NBC))THEN
IF(NB.LT.NBC)THEN
MN(NM,1)=NB
MN(NM,2)=NBC
ELSE
MN(NM,1)=NBC
MN(NM,2)=NB
ENDIF
ELSE
IF(TR(JT(NB)).GT.TR(JT(NBC)))THEN
MN(NM,1)=NB
MN(NM,2)=NBC
ELSE
MN(NM,1)=NBC
MN(NM,2)=NB
ENDIF
ENDIF
IF(IMB(NB).EQ.0)THEN
IF(MB(NB,1).NE.-1)THEN
IAIS=IAIS-1
ENDIF
IMB(NB)=1
CALL BAIS LIS(NB,-1)
MB(NB,2)=0
J=1
IF(MB(NB,1).EQ.-1)J=2
MB(NB,J)=NM
ELSE
IMB(NB)=IMB(NB)+1
J=0
IF(MB(NB,1).EQ.-1)J=1
MB(NB,IMB(NB)+J)=NM
ENDIF

C
IF(IMB(NBC).EQ.0)THEN
IF(MB(NBC,1).NE.-1)THEN
IAIS=IAIS-1
ENDIF
IMB(NBC)=1
CALL BAIS LIS(NBC,-1)
MB(NBC,2)=0

```

      J=1
      IF(MB(NBC,1).EQ.-1)J=2
      MB(NBC,J)=NM
    ELSE
      IMB(NBC)=IMB(NBC)+1
      J=0
      IF(MB(NBC,1).EQ.-1)J=1
      MB(NBC,IMB(NBC)+J)=NM
    ENDIF

```

```

C
  CALL CAL_COOR_MEN(NM)

```

```

C
  CALL REORDENA_MB(NB)
  CALL REORDENA_MB(NBC)

```

```

C
  IF(ICASO.EQ.2)THEN
    V(NM)=1.
    GO TO 317
  ENDIF

```

```

C
  NMB1=0
  NMB2=0
  NMBC1=0
  NMBC2=0
  JB=0
  JBC=0
  IF(MB(NB,1).EQ.-1)JB=1
  IF(MB(NBC,1).EQ.-1)JBC=1

```

```

C
  IF(IMB(NB).GT.1)THEN
    DO KI=1+JB,IMB(NB)+JB
    IF(MB(NB,KI).EQ.NM)GO TO 300
    ENDDO

```

```

300  IF(KI.EQ.(1+JB))THEN
      NMB1=MB(NB,IMB(NB)+JB)
    ELSE
      NMB1=MB(NB,KI-1)
    ENDIF

```

```

  IF(KI.EQ.(IMB(NB)+JB))THEN
    NMB2=MB(NB,1+JB)
  ELSE
    NMB2=MB(NB,KI+1)
  ENDIF
ENDIF

```

```

C
  IF(IMB(NBC).GT.1)THEN
    DO KI=1+JBC,IMB(NBC)+JBC
    IF(MB(NBC,KI).EQ.NM)GO TO 320
    ENDDO

```

```

320  IF(KI.EQ.(1+JBC))THEN
      NMBC1=MB(NBC,IMB(NBC)+JBC)
    ELSE
      NMBC1=MB(NBC,KI-1)
    ENDIF

```

```

  IF(KI.EQ.(IMB(NBC)+JBC))THEN
    NMBC2=MB(NBC,1+JBC)
  ELSE
    NMBC2=MB(NBC,KI+1)
  ENDIF
ENDIF

```

C

```

V(NM)=0.
IF(NMB1.GT.0)THEN
  V(NM)=V(NM)+0.05*V(NMB1)
  V(NMB1)=0.95*V(NMB1)
ENDIF
IF(NMB2.GT.0)THEN
  V(NM)=V(NM)+0.05*V(NMB2)
  V(NMB2)=0.95*V(NMB2)
ENDIF
IF(NMBC1.GT.0)THEN
  V(NM)=V(NM)+0.05*V(NMBC1)
  V(NMBC1)=0.95*V(NMBC1)
ENDIF
IF(NMBC2.GT.0)THEN
  V(NM)=V(NM)+0.05*V(NMBC2)
  V(NMBC2)=0.95*V(NMBC2)
ENDIF

```

C

```
CALL PREVOLMEN(NM)
```

C

```
317 CONTINUE
```

```
ENDIF
ENDDO
```

C

```

MINI=KPN(NP,1)
NPN=NP
  IF(1KPN(NP).LT.0)MINI=-MINI
CALL DESARMA_PORO(NP,NROT)
CALL DEF_PORO(MINI,NPN,NROT)
IF(NPN.NE.NP)THEN
  WRITE(6,*)' ATENCION:NO REDEFINIDO PORO CON INIC.ANTIG.'
  WRITE(6,*)' NP,NPN,MINI,NROT,TIME',NP,NPN,MINI,NROT,TIME
  IF(NROT.LT.0)THEN
    IF(ICASO.NE.2)THEN
      NPV=MN(ABS(MINI),3)
      IF(NPV.EQ.NP)THEN
        WRITE(6,*)' ERROR CHEQ: AL DETERMINAR VECINO.2'
        WRITE(6,*)' NPV=NP,MN(,4):',NP,MN(ABS(MINI),4)
        CALL STOPAR
      ENDIF
      APM(NPV)=APM(NPV)+APM(NP)
      WPM(NPV)=WPM(NPV)+WPM(NP)
    ENDIF
    APM(NP)=0.
    WPM(NP)=0.
    CALL NP_EMP_LIS(NP,1)
    GO TO 800
  ELSE
    CALL STOPAR
  ENDIF
ENDIF
CALL RECAL_PORO(NP,AREA,APOLI)
INC=1
NC(1)=NP
AMAXZ(1)=AREA

```

C

```

*****
* DEFINICION DE NUEVOS POROS A PARTIR DE MENISCOS ANTIGUOS *
*****

```

```

C
800  CONTINUE
      DO I=2, IKPNZ
      NPN=0
      IF(KPNZ(I).GT.0)THEN
        CALL DEF_PORO(KPNZ(I),NPN,NROT)
        IF(NPN.NE.0)THEN
          CALL RECAL_PORO(NPN,AREA,APOLI)
          INC=INC+1
          NC(INC)=NPN
          AMAXZ(INC)=AREA
        ENDIF
      ENDIF
    ENDDO

```

```

C
*****
*      DEFINICION DE NUEVOS POROS A PARTIR DE NUEVOS MENISCOS      *
*****

```

```

C
      IF(INUEM.GT.0)THEN
      DO I=1, INUEM
      NPN=0
      CALL DEF_PORO(NUEM(I),NPN,NROT)
      IF(NPN.NE.0)THEN
        CALL RECAL_PORO(NPN,AREA,APOLI)
        INC=INC+1
        NC(INC)=NPN
        AMAXZ(INC)=AREA
      ENDIF
    ENDDO
  ENDIF

```

```

C
*****
*      CHEQUEO DE LA EXISTENCIA DE MENISCOS NO RODEADOS DE POROS  *
*****

```

```

C
850  IKPAS=-IKPNZ
      CALL CH_HUERFA(IKPAS,KPNZ)
      IF(IKPAS.LT.0)THEN
        NPN=0
        CALL DEF_PORO(IKPAS,NPN,NROT)
        IF(NPN.NE.0)THEN
          CALL RECAL_PORO(NPN,AREA,APOLI)
          INC=INC+1
          NC(INC)=NPN
          AMAXZ(INC)=AREA
          GO TO 850
        ELSE
          IF(NROT.GE.0)THEN
            WRITE(6,*)' ERROR CH BOLA PORO:NB,NP,NROT',NB,NP,NROT
            WRITE(6,*)' MENISCO HUERFANO INCLUSO INI.NEG.:',-IKPAS
            WRITE(6,*)' MN():',(MN(-IKPAS,K),K=1,4)
            CALL STOPAR
          ENDIF
        ENDIF
      ENDIF

```

```

C
      IF(INUEM.GT.0)THEN
      CALL CH_HUERFA(INUEM,NUEM)
    ENDIF

```

```

C
*****
* ASIGNACION DE BOLAS AISLADAS NO DEL CONTORNO A NUEVOS POROS *
*****
C
900 IF(IAIS.LT.0)THEN
      WRITE(6,*)' ERROR IAIS= ',IAIS,' MENOR CERO; ME PARO'
      CALL STOPAR
    ENDIF
    IF(IAIS.EQ.0)GO TO 950
    DO I=1,ILIS
    IF(LIS(I,3).EQ.-1)THEN
      NAIS=LIS(I,1)
      IF(IMB(NAIS).EQ.0)THEN
        IF(MB(NAIS,1).EQ.0)THEN
          DMIN=100.
          DO J=1,INC
            DBPX=XB(NAIS)-XP(NC(J))
            DBPY=YB(NAIS)-YP(NC(J))
            DBP=SQRT(DBPX*DBPX+DBPY*DBPY)
            IF(DBP.LT.DMIN)THEN
              C
                SSUM=PI*(TR(JT(NAIS))**2.)
                VSUM=PI*(TR(JT(NAIS))**3.)/0.75
                NPAZ=NC(J)
                ICAZ=IPOR(NC(J))
                IF((ICAZ.EQ.3).OR.(ICAZ.EQ.13))THEN
                  CALL RECAL_PORO(NPAZ,AREA,APOLI)
                  CALL SECTOR_EX_CONT(NAIS,SSUM,VSUM)
                ENDIF
                IF((AMAXZ(J).LT.SSUM).OR.(VMAX(NPAZ).LT.VSUM))THEN
                  GO TO 333
                ENDIF
              C
                DMIN=DBP
                NPBA=NC(J)
                JPBA=J
              ENDIF
            ENDIF
          ENDDO
          333
          C
            IF(DMIN.EQ.100.)THEN
              WRITE(6,*)' ERROR AL IMPUTAR AISLADAS.NO CABE?',NAIS
              WRITE(6,*)' SSUM,VSUM',SSUM,VSUM
              WRITE(6,*)' NB NP',NB,NP,' LIS',(LIS(J,1),J=1,ILIS)
              WRITE(6,*)' NC',(NC(J),J=1,INC)
            ENDIF
          C
            MB(NAIS,2)=-NPBA
            CALL RECAL_PORO(NPBA,AREA,APOLI)
            ICAR=11
            CALL RECAL_AIS(NPBA,ICAR,AREA)
            AMAXZ(JPBA)=AREA
            IAIS=IAIS-1
          ENDIF
        ENDIF
      ENDIF
    ENDDO
  C
    IF(IAIS.EQ.0)GO TO 950
    WRITE(6,*)' ERROR EN LA IMPUTACION DE LAS AISLADAS NO CONT'

```



```
WRITE(6,*)' IAIS= ',IAIS,' # 0 ; ME PARO.'
CALL STOPAR
```

```
C
*****
*                               REPARTO DE LAS MASAS                               *
*****
```

```
C
950  DO I=1,INC
      AMAX(NC(I))=AMAXZ(I)
      ENDDO
      IF(ICASO.EQ.2)GO TO 960
      VSUM=0.
      DO I=1,INC
        CALL PREVOLPOR(NC(I))
        VSUM=VSUM+VHP(NC(I))
      ENDDO
```

```
C
      APMSUM=APM(NP)
      WPMSUM=WPM(NP)
```

```
C
      DO I=1,INC
        APM(NC(I))=APMSUM*VHP(NC(I))/VSUM
        WPM(NC(I))=WPMSUM*VHP(NC(I))/VSUM
      CALL PREVOLPOR(NC(I))
      ENDDO
```

```
C
960  CONTINUE
      RETURN
      END
```

```
C
*****
*****
```

```
      SUBROUTINE CH_BOLA_BOLA(NB1,NB2,D)
```

```
*****
**   DETERMINA SI LA BOLA NB1 HA ENTRADO EN CONTACTO CON LA NB2           **
**   D= DISTANCIA ENTRE SUPERFICIE DE LAS DOS BOLAS = POSITIVA           **
**                                       CASO SOLAPE= NEGATIVA             **
*****
      INCLUDE 'COM.INC'
```

```
C
      XX=XB(NB2)+XBI(NB2)-XB(NB1)-XBI(NB1)
      YY=YB(NB2)+YBI(NB2)-YB(NB1)-YBI(NB1)
      D=SQRT(XX*XX+YY*YY)
      D=D-TR(JT(NB1))-TR(JT(NB2))
```

```
C
      RETURN
      END
```

```
C
*****
*****
```

```
      SUBROUTINE CH_BOLA_ABAN_CONT(NB,NROT,D)
```

```
*****
**   DETERMINA SI LA BOLA NB, QUE ERA DEL CONTORNO, SIGUE SIENDOLO       **
**   SI LO ABANDONA: NROT=1                                               **
**   EFECTUA LA REORGANIZACION DE LOS POROS AFECTADOS                   **
*****
```

INCLUDE 'COM.INC'

```
C
      DIMENSION KPNZ(KPDIM),NPZ(4),NPZA(4)
C
      DO I=2,LICOB(1)+1
      IF(LICOB(I).EQ.NB)GO TO 100
      ENDDO
      WRITE(6,*)'      ERROR LA BOLA A CH_ABAN_CONT NO ESTA CONTORNO'
      CALL STOPAR
C
100   IF(I.EQ.2)THEN
      NBA=LICOB(LICOB(1)+1)
      NBD=LICOB(3)
      GO TO 200
    ENDIF
    IF(I.EQ.(LICOB(1)+1))THEN
      NBA=LICOB(LICOB(1))
      NBD=LICOB(2)
      GO TO 200
    ENDIF
    NBA=LICOB(I-1)
    NBD=LICOB(I+1)
C
      CHEQUEO VIA PROD.VECTORIAL
C
200   X1=XB(NB)+XBI(NB)-(XB(NBA)+XBI(NBA))
      Y1=YB(NB)+YBI(NB)-(YB(NBA)+YBI(NBA))
      X2=XB(NBD)+XBI(NBD)-(XB(NBA)+XBI(NBA))
      Y2=YB(NBD)+YBI(NBD)-(YB(NBA)+YBI(NBA))
      PV12=X1*Y2-X2*Y1
      NROT=0
      IF(PV12.GE.0.)GO TO 210
      DNB=ABS(PV12/SQRT(X2*X2+Y2*Y2))
      IF(DNB.GT.(2.83*XUMB))NROT=1
C
210   IF(NROT.EQ.0)THEN
      IF(D.LT.RLICOB)RLICOB=D
      GO TO 900
    ENDIF
C
      DO J=I,LICOB(1)+1
      LICOB(J)=LICOB(J+1)
      ENDDO
      LICOB(LICOB(1)+1)=0
      LICOB(1)=LICOB(1)-1
C
*****
** CASO C **
*****
C
      IF(IMB(NB).EQ.0)THEN
      MB(NB,1)=0
      GO TO 900
      ELSE
      DO J=1,IMB(NB)+1
      MB(NB,J)=MB(NB,J+1)      !ARREGLAMOS MB
      ENDDO
      ENDIF
C
*****
```

** CASO B **

C

```
IF(IMB(NB).EQ.1)THEN
  NM=MB(NB,1)
  IF(MN(NM,4).EQ.-1)THEN
    NP=MN(NM,3)
    IF((IPOR(NP).EQ.3).OR.(IPOR(NP).EQ.13))THEN
      IKPNZ=ABS(IKPN(NP))
      DO I=1,IKPNZ
        KPNZ(I)=KPN(NP,I)
      ENDDO
      MINI=KPN(NP,1)
      IF(IKPN(NP).LT.0)MINI=-MINI
      ICAR=IPOR(NP)
      CALL DESARMA PORO(NP,NROT)
      CALL DEF PORO(MINI,NP,NROT)
      CALL CH HUERFA(IKPNZ,KPNZ)
      IF(ICAR.GT.10)THEN
        IF(IPOR(NP).EQ.1)IPOR(NP)=11
        IF(IPOR(NP).EQ.2)IPOR(NP)=12
        IF(IPOR(NP).EQ.3)IPOR(NP)=13
      ENDIF
      GO TO 900
    ENDIF
  ENDIF
ENDIF
```

C

** CASO D **

C

```
NM1=MB(NB,1)
NM2=MB(NB,IMB(NB))
IF((MN(NM1,4).EQ.-1).OR.(MN(NM2,4).EQ.-1))THEN
  IF((MN(NM1,4).NE.-1).OR.(MN(NM2,4).NE.-1))THEN
    IF(MN(NM2,4).EQ.-1)THEN
      NM=NM1
      NM1=NM2
      NM2=NM
    ENDIF
    NP=MN(NM2,3)
    IF((IPOR(NP).EQ.3).OR.(IPOR(NP).EQ.13))THEN
      NP=MN(NM2,3)
      NP2=MN(NM2,4)
    ELSE
      NP=MN(NM2,4)
      NP2=MN(NM2,3)
    ENDIF
    IF((IPOR(NP2).EQ.3).OR.(IPOR(NP2).EQ.13))THEN
      WRITE(6,*)' CH BOLA ABAN CONT:CUIDADO,2 IPOR=3 O 13'
      WRITE(6,*)' NB',NB,' POROS: ',NP,NP2,' .SIGO'
    ENDIF
    IF(NP.NE.NP2)THEN
      IF(NP.EQ.MN(NM1,3))NP=NP2
    ENDIF
  ENDIF
  IKPNZ=ABS(IKPN(NP))
  DO I=1,IKPNZ
```

C

C

```

KPNZ(I)=KPN(NP,I)
ENDDO
MINI=KPN(NP,1)
IF(IKPN(NP).LT.0)MINI=-MINI
ICAR=IPOR(NP)
CALL DESARMA_MEN(NM1,0,NROT)
CALL DESARMA_PORO(NP,NROT)
CALL DEF_PORO(MINI,NP,NROT)
CALL CH_HUERFA(IKPNZ,KPNZ)
  IF(ICAR.GT.10)THEN
    IF(IPOR(NP).EQ.1)IPOR(NP)=11
    IF(IPOR(NP).EQ.2)IPOR(NP)=12
    IF(IPOR(NP).EQ.3)IPOR(NP)=13
  ENDIF
GO TO 900
ELSE

```

```

C
*****
** CASO A **
*****

```

```

C
NP1=MN(NM1,3)
NP2=MN(NM2,3)
IF((IPOR(NP1).EQ.2).OR.(IPOR(NP1).EQ.12))THEN
  IF((IPOR(NP2).EQ.2).OR.(IPOR(NP2).EQ.12))THEN
    GO TO 400
  ENDIF
ENDIF
WRITE(6,*)' FALLO HIPOTESIS CASO A ;STOP; POROS E IPOR:'
WRITE(6,*)' ',NP1,NP2,' ',IPOR(NP1),IPOR(NP2)
CALL STOPAR
400 IKPNZ=ABS(IKPN(NP1))
DO I=1,IKPNZ
KPNZ(I)=KPN(NP1,I)
ENDDO
ICAR1=IPOR(NP1)
CALL DESARMA_PORO(NP1,NROT)
IF(NP1.NE.NP2)THEN
  DO I=1,ABS(IKPN(NP2))
KPNZ(IKPNZ+I)=KPN(NP2,I)
ENDDO
IKPNZ=IKPNZ+ABS(IKPN(NP2))
IF(IKPNZ.GT.KPDIM)THEN
  WRITE(6,*)' PROBLEMAS DIMENSION KPNZ: ',IKPNZ
  CALL STOPAR
ENDIF
MINI2=KPN(NP2,1)
ICAR2=IPOR(NP2)
CALL DESARMA_PORO(NP2,NROT)
ENDIF
CALL DEF_PORO(KPNZ(1),NP1,NROT)
IF(NP1.NE.NP2)CALL DEF_PORO(MINI2,NP2,NROT)
NNP=0
NNP1=0
NNP2=0
CALL DEF_PORO(NM1,NNP1,NROT)
IF(NNP1.NE.0)NNP=NNP1
CALL DEF_PORO(NM2,NNP2,NROT)
IF(NNP2.NE.0)THEN
  IF(NNP.NE.0)THEN

```

```

WRITE(6,*)' ERROR HIPOTESIS CASO A: HA ENCONTRADO'
WRITE(6,*)'     DOS NUEVOS POROS, Y NO UNO.'
WRITE(6,*)'     NP1,NP2,NNP1,NNP2'
WRITE(6,*)'     ',NP1,NP2,NNP1,NNP2
CALL STOPAR

```

```

ENDIF
NNP=NNP2
ENDIF
IOR=0
IF(NNP.EQ.0)THEN
CALL DEF_PORO(-NM1,NNP1,NROT)
NNP=NNP1
IF(NNP.EQ.0)THEN
CALL DEF_PORO(-NM2,NNP2,NROT)
NNP=NNP2
IF(NNP.EQ.0)THEN
WRITE(6,*)' CASO A. FALLO HIPOTESIS.STOP'
CALL STOPAR
ENDIF
ENDIF
ENDIF
IF(IAT.EQ.1)THEN
WRITE(6,*)' ATENCION: PORO DEFINIDO'
WRITE(6,*)'     INICIACION INVERSA:',NNP
ENDIF
IOR=1
ENDIF
CALL CH_HUERFA(IKPNZ,KPNZ)
CALL CH_HUERFA(1,NM1)
CALL CH_HUERFA(1,NM2)

```

```

RECALCULO DE LAS AREAS DE LOS POROS

```

```

CALL RECAL_PORO(NP1,AMAX(NP1),APOLI)
IF(ICAR1.GT.10)THEN
IF(IPOR(NP1).EQ.1)IPOR(NP1)=11
IF(IPOR(NP1).EQ.2)IPOR(NP1)=12
IF(IPOR(NP1).EQ.3)IPOR(NP1)=13
ENDIF
CALL RECAL_AIS(NP1,IPOR(NP1),AMAX(NP1))
IF(NP1.NE.NP2)THEN
CALL RECAL_PORO(NP2,AMAX(NP2),APOLI)
IF(ICAR2.GT.10)THEN
IF(IPOR(NP2).EQ.1)IPOR(NP2)=11
IF(IPOR(NP2).EQ.2)IPOR(NP2)=12
IF(IPOR(NP2).EQ.3)IPOR(NP2)=13
ENDIF
CALL RECAL_AIS(NP2,IPOR(NP2),AMAX(NP2))
ENDIF
CALL RECAL_PORO(NNP,AMAX(NNP),APOLI)
GO TO 900

```

```

ENDIF
ENDIF

```

```

C
*****
** CASO E **
*****

```

```

C
K=0
NPZ(1)=MN(NM1,3)
NPZ(2)=MN(NM1,4)

```

```

NPZ(3)=MN(NM2,3)
NPZ(4)=MN(NM2,4)
C
IF(NM1.EQ.NM2)THEN
  NPOR1=MN(NM1,3)
  NPOR2=MN(NM1,4)
  IF((IPOR(NPOR1).NE.3).AND.(IPOR(NPOR1).NE.13))GO TO 110
  IF((IPOR(NPOR2).NE.3).AND.(IPOR(NPOR2).NE.13))GO TO 110
  GO TO 800
110  WRITE(6,*)'  ERROR, UN SOLO MENISCO Y NO SON POROS ABIERTOS'
      GO TO 750
ENDIF
C
DO I=1,4
IF((IPOR(NPZ(I)).EQ.3).OR.(IPOR(NPZ(I)).EQ.13))THEN
  K=K+1
  NPZA(K)=NPZ(I)
ENDIF
ENDDO
IF(K.LE.1)THEN
  WRITE(6,*)'  ERROR:'
  GO TO 750
ENDIF
IF(K.EQ.2)THEN
  NPOR1=NPZA(1)
  NPOR2=NPZA(2)
  GO TO 800
ENDIF
120  J=K+1
      J=J-1
      DO KL=1,J-1
        IF(NPZA(KL).GT.NPZA(KL+1))THEN
          NTEM=NPZA(KL)
          NPZA(KL)=NPZA(KL+1) !ALGORITMO BURBUJA ORDEN.ACIMUTS
          NPZA(KL+1)=NTEM
        ENDIF
      ENDDO
      IF(J.GT.2)GO TO 120
C
IF((NPZA(1).EQ.NPZA(2)).OR.(NPZA(K).EQ.NPZA(K-1)))THEN
  IF((K.EQ.4).AND.(NPZA(2).NE.NPZA(3)))GO TO 700
  NPOR1=NPZA(1)
  NPOR2=NPZA(K)
  GO TO 800
ENDIF
C
700  WRITE(6,*)'  CASO NO CONTEMPLADO:'
750  WRITE(6,*)'  CH BOLA ABAN CONT. CASO E.NB,NM1,NM2:',NB,NM1,NM2
      WRITE(6,*)'  K, NPZ:',K,NPZ
      WRITE(6,*)'  IPOR:',(IPOR(NPZ(I)),I=1,4)
      WRITE(6,*)'  NPZA:',(NPZA(I),I=1,K)
      CALL STOPAR
C
800  IF(NPOR1.EQ.NPOR2)THEN
      WRITE(6,*)'  ERROR SON IGUALES NPOR1,2: ',NPOR1,NPOR2
      GO TO 750
ENDIF
C
CALL FUNDIR_POROS(NPOR1,NPOR2)
C

```

900 CONTINUE

C RETURN
END

C *****

SUBROUTINE CAL_COOR_MEN(NM)

* CALCULA LAS COORDENADAS DEL MENISCO NM **

INCLUDE 'COM.INC'
RAD=PI/180.

C I1=MN(NM,1)
I2=MN(NM,2)
RB1=TR(JT(I1))
RB2=TR(JT(I2))
XBB1=XB(I1)
YBB1=YB(I1)
XBB2=XB(I2)
YBB2=YB(I2)
D=SQRT((XBB1-XBB2)*(XBB1-XBB2)+(YBB1-YBB2)*(YBB1-YBB2))
D=D-RB1-RB2
DT=RB1+D/2.
XM(NM)=XBB1+(XBB2-XBB1)*DT/(D+RB1+RB2)
YM(NM)=YBB1+(YBB2-YBB1)*DT/(D+RB1+RB2)

C RETURN
END

C *****

SUBROUTINE DESARMA_PORO(NP,NROT) !P27

** PREPARA LAS VARIABLES RELATIVAS AL PORO NP PARA QUE PUEDAN **
** PASAR UNA REDEFINICION DE PORO SIN PROBLEMAS. **

INCLUDE 'COM.INC'

C DO I=1,ABS(IKPN(NP))
NM=KPN(NP,I)
IF(NM.GT.0)CALL DESARMA_MEN(NM,NP,NROT)
ENDDO

C IF((IPOR(NP).EQ.3).OR.(IPOR(NP).EQ.13))THEN
DO I=2,LICOP(1)+1
IF(LICOP(I).EQ.NP)GO TO 200
ENDDO
WRITE(6,*)' ERROR: NO ENCUENTRO PORO ',NP,' EN LICOP.STOP'
CALL STOPAR
200 DO J=I,LICOP(1)+1
LICOP(J)=LICOP(J+1)
ENDDO
LICOP(LICOP(1)+1)=0
LICOP(1)=LICOP(1)-1

```

ENDIF
IF((IPOR(NP).EQ.2).OR.(IPOR(NP).EQ.12))THEN
  DO I=2,LICOP(1)+1
  IF(LICOP(I).EQ.NP)GO TO 250
  ENDDO
  WRITE(6,*)' ERROR: NO ENCUENTRO PORO ',NP,' EN LICOP.STOP2'
  CALL STOPAR
250 DO J=I,LICOP(1)+1
  LICOP(J)=LICOP(J+1)
  ENDDO
  LICOP(LICOP(1)+1)=0
  LICOP(1)=LICOP(1)-1
ENDIF

```

```

C
IPOR(NP)=0
DO I=1,ABS(IKPN(NP))
KPN(NP,I)=0
ENDDO
IKPN(NP)=0

```

```

C
RETURN
END

```

```

*****
*****
SUBROUTINE DESARMA_MEN(NM,NP,NROT) !P27

```

```

*****
** PREPARA LAS VARIABLES RELATIVAS AL MENISCO NM DEL PORO NP PARA QUE **
** PUEDA PASAR UNA REDEFINICION DE PORO SIN PROBLEMAS. **
*****
INCLUDE 'COM.INC'

```

```

C
IF(NP.EQ.0)GO TO 100
IF((MN(NM,3).NE.NP).AND.(MN(NM,4).NE.NP))THEN
  IF(NROT.LT.0)THEN
    GO TO 400
  ELSE
    WRITE(6,*)' ERROR EN DESARMA MEN:'
    WRITE(6,*)' MENISCO ',NM,' NO PERTENECE PORO ',NP
    WRITE(6,*)' MN(3 0 4)= ',MN(NM,3),MN(NM,4),' ME PARO'
    CALL STOPAR
  ENDF
ENDIF

```

```

C
100 IF(MN(NM,4).EQ.-1)THEN
  DO I=2,LICOM(1)+1
  IF(LICOM(I).EQ.NM)GO TO 250
  ENDDO
  WRITE(6,*)' ERROR: NO ENCUENTRO MENISCO',NM,' EN LICOM.STOP'
  CALL STOPAR
250 DO J=I,LICOM(1)+1
  LICOM(J)=LICOM(J+1)
  ENDDO
  LICOM(LICOM(1)+1)=0
  LICOM(1)=LICOM(1)-1
  MN(NM,4)=0
ENDIF

```



```

      IF(NP.EQ.0)GO TO 900
C
      IF(MN(NM,3).EQ.NP)MN(NM,3)=MN(NM,4)
      MN(NM,4)=0
C
400   IF((IPOR(NP).EQ.3).OR.(IPOR(NP).EQ.13))THEN
      CALL DESARMA_MEN_CONT(NM)
      ENDIF
C
900   RETURN
      END

```

```

*****
*****

```

```

      SUBROUTINE DESARMA_MEN_CONT(NM)          !P27

```

```

*****
**          SACA AL MENISCO NM DE LA LISTA LICOM          **
*****

```

```

      INCLUDE 'COM.INC'

```

```

C
      DO I=2,LICOM(1)+1
      IF(LICOM(I).EQ.NM)GO TO 250
      ENDDO
      GO TO 300
250   DO J=I,LICOM(1)+1
      LICOM(J)=LICOM(J+1)
      ENDDO
      LICOM(LICOM(1)+1)=0
      LICOM(1)=LICOM(1)-1

```

```

C
300   CONTINUE
C
      RETURN
      END

```

```

*****
*****

```

```

      SUBROUTINE CH_HUERFA(IK,KMAT)

```

```

*****
**  COMPRUEBA SI DESPUES DE UNA REDEFINICION DE LOS MENISCOS DE  **
**  UN PORO, LAS POSICIONES 3 Y 4 DE MN(NM,3 O 4) VUELVEN A ESTAR  **
**  OCUPADAS, ES DECIR, QUE LOS MENISCOS ESTAN ASIGNADOS A POROS.  **
**  LOS NUMEROS DE MENISCOS A CONTROLAR ESTAN INCLUIDOS EN KMAT(IK) **
*****

```

```

      INCLUDE 'COM.INC'
C
      DIMENSION KMAT(ABS(IK))

```

```

C
      IF(IK.LT.0)THEN
      ICLAV=1
      IK=-IK
      ELSE
      ICLAV=0
      ENDIF

```

```

C
      IS=0

```

```

DO J=1,IK
I=KMAT(J)
IF(I.GT.0)THEN
  IF((MN(I,3).EQ.0).OR.(MN(I,4).EQ.0))THEN
    WRITE(6,*)'  MENISCO HUERFANO: ',I,MN(I,3),MN(I,4)
    IF(ICLAV.EQ.1)WRITE(6,*)'  SEGURAMENTE RECUPERABLE'
    IS=I
  ENDIF
ENDIF
ENDDO

```

```

C
IF(IS.NE.0)THEN
  IF(ICLAV.EQ.0)THEN
    WRITE(6,*)'  ME PARO.'
    CALL STOPAR
  ELSE
    IK=-IS
  ENDIF
ENDIF

```

```

C
RETURN
END

```

```

C
*****
*****

```

```

SUBROUTINE CH_BOLA_INGR_CONT(NB,NROT,D)

```

```

*****
**      CHEQUEA SI UNA BOLA NB CERCANA AL CONTORNO      **
**      INGRESARA EN EL A TRAVES DE ALGUN PORO        **
**      SI SE ACCEDE:  DESDE CH NUE CON      NROT VALE 0  **
**                   DESDE CH_BOLA_PORO    NROT VALE 10  **
**      SI INGRESA:   NROT=-1                **
*****
INCLUDE 'COM.INC'

```

```

C
INCID=NROT
CALL ACIM12(0.,0.,XB(LICOB(2)),YB(LICOB(2)),TETA2)
TETA2=2.*PI-TETA2
CALL ACIM12(0.,0.,XB(NB),YB(NB),TET)
TET=TET+TETA2
IF(TET.GE.(2.*PI))TET=TET-2.*PI
N=INT(FLOAT(LICOB(1))*TET/(2.*PI))
N=N+1
IF(N.EQ.1)N=2
CALL ACIM12(0.,0.,XB(LICOB(N)),YB(LICOB(N)),TETAN)
TETAN=TETAN+TETA2
IF(TETAN.GE.(2.*PI))TETAN=TETAN-2.*PI
INCR=1
ITOPE=LICOB(1)+1
IF(TETAN.GT.TET)THEN
  INCR=-1
  ITOPE=2
ENDIF

```

```

C
DO I=N+INCR,ITOPE,INCR
CALL ACIM12(0.,0.,XB(LICOB(I)),YB(LICOB(I)),TETAN)
TETAN=TETAN+TETA2
IF(TETAN.GT.(2.*PI))TETAN=TETAN-2.*PI

```

```

IF(INCR.EQ.1)THEN
  IF(TETAN.GE.TET)GO TO 200
  ELSE
    IF(TETAN.LE.TET)GO TO 200
  ENDIF
ENDDO
NBA=LICOB(1)+1
NBD=2
GO TO 300
200 IF(INCR.EQ.1)THEN
  NBA=I-1
  NBD=I
  ELSE
    NBA=I
    NBD=I+1
  ENDIF
300 N=NBA
NBA=LICOB(NBA)
NBD=LICOB(NBD)
C
X1=XB(NB)+XBI(NB)-(XB(NBA)+XBI(NBA))
Y1=YB(NB)+YBI(NB)-(YB(NBA)+YBI(NBA))
X2=XB(NBD)+XBI(NBD)-(XB(NBA)+XBI(NBA))
Y2=YB(NBD)+YBI(NBD)-(YB(NBA)+YBI(NBA))
PV12=X1*Y2-X2*Y1
IF(PV12.GT.0.)NROT=-1
IF(NROT.NE.-1)THEN
  GO TO 900
ENDIF
C
IF(INCID.EQ.10)GO TO 900
DO J=LICOB(1)+1,N+1,-1
  LICOB(J+1)=LICOB(J)
ENDDO
LICOB(N+1)=NB
LICOB(1)=LICOB(1)+1
IF(IMB(NB).EQ.0)THEN
  MB(NB,1)=-1
  GO TO 900
  ELSE
    DO J=IMB(NB),1,-1
      MB(NB,J+1)=MB(NB,J)
    ENDDO
    MB(NB,1)=-1
  ENDIF
900 IF(D.LT.RLICOB)RLICOB=D
CONTINUE
C
RETURN
END

```

```

C
*****
*****

```

SUBROUTINE CH_BOLA_SEG_CONT(NB,NBA,NBD,NSI)

```

*****
** CHEQUEA SI LA BOLA NB ACCEDE AL CONTORNO ENTRE LAS DOS DEL MISMO **
** NBA Y NBD, EN CUYO CASO : NSI=1 **
*****

```

```

C      INCLUDE 'COM.INC'
C      IF((NB.EQ.NBA).OR.(NB.EQ.NBD))THEN
          WRITE(6,*)' ERROR SEG_CONT. BOLAS COMUNES: ',NB,NBA,NBD
          CALL STOPAR
        ENDIF
C
C      X1=XB(NB)+XBI(NB)-(XB(NBA)+XBI(NBA))
        Y1=YB(NB)+YBI(NB)-(YB(NBA)+YBI(NBA))
        X2=XB(NBD)+XBI(NBD)-(XB(NBA)+XBI(NBA))
        Y2=YB(NBD)+YBI(NBD)-(YB(NBA)+YBI(NBA))
C
C      D1=SQRT(X1*X1+Y1*Y1)
        D2=SQRT(X2*X2+Y2*Y2)
        IF(D1.GT.D2)GO TO 900
        PV12=(X1*Y2-X2*Y1)/(D1*D2)
        IF(PV12.LE.0.)GO TO 900
        PV12=ASIN(ABS(PV12))
        IF(PV12.GT.(PI/2.))GO TO 900
C
C      NSI=1
        IF(MB(NB,1).NE.-1)THEN
            WRITE(6,*)' ERROR: NO SE ENCUENTRA EN LA LISTA'
            WRITE(6,*)' DEL CONTORNO LA BOLA ',NB
            CALL STOPAR
        ENDIF
C
C      900 RETURN
        END

```

```

C      *****
        *****

```

```

SUBROUTINE DEF_PORO(NM,NP,NROT)

```

```

*****
**      SUBROUTINA PRINCIPAL DE LA DEFINICION DE POROS          **
**      INTENTA DEFINIR UN PORO NP A PARTIR DE UN MENISCO NM,  **
**      SUPUESTAMENTE INICIADOR:                                **
**      SI NM<0 INICIACION INVERSA => IKPN(NP) SERA NEGATIVO   **
**      SI NP>0 EL FUTURO PORO CREADO HA DE TENER ESE NRO.     **
**      SI NP=0 EL FUTURO PORO CREADO TENDRA NUEVO NRO.(NP_EMP_LIS) **
**      SI SE CREA NUEVO PORO: SE DEVUELVE NP=NPORO           **
**      SI NO SE CREA NUEVO PORO: SE DEVUELVE NP=0             **
*****

```

```

INCLUDE 'COM.INC'

```

```

C      IZF=0
C
C      IF(NP.LT.0)THEN
          WRITE(6,*)' ERROR EN EL NRO. PORO: ',NP
          CALL STOPAR
        ENDIF
        IF(NM.EQ.0)THEN
            WRITE(6,*)' ERROR EN EL NRO. MENISCO: ',NM
            CALL STOPAR
        ENDIF
C
C      IOR=0
        IF(NM.LT.0)THEN

```

```

I=-NM
IOR=1
NBMIN=MN(I,2)
NBMAX=MN(I,1)
ELSE
I=NM
NBMIN=MN(I,1)
NBMAX=MN(I,2)
ENDIF

```

```

C
IF((MN(I,3).NE.0).AND.(MN(I,4).NE.0))THEN
NP=0
GO TO 910
ENDIF

```

```

C
DO J=1,IMB(NBMAX)+1
IF(MB(NBMAX,J).EQ.I)GO TO 310
ENDDO

```

```

310 IF(J.EQ.1)THEN
K=IMB(NBMAX)
ELSE
K=J-1
ENDIF

```

```

IF((K.EQ.1).AND.(MB(NBMAX,1).EQ.-1))THEN
I1=I
DO IK=2,LICOB(1)+1
IF(LICOB(IK).EQ.NBMAX)GO TO 375
ENDDO
375 IK=IK+1
IF(IK.EQ.(LICOB(1)+2))IK=2
315 IF(LICOB(IK).EQ.NBMIN)GO TO 300

```

```

C
I2=-LICOB(IK)
ELSE
I2=MB(NBMAX,K)
ENDIF

```

```

C
IF((MN(I,3).NE.0).AND.(MN(I,4).EQ.0))THEN
IKPNZ=ABS(IKPN(MN(I,3)))
DO L=1,IKPNZ
IF(KPN(MN(I,3),L).EQ.I)GO TO 330
ENDDO
330 IF(L.EQ.IKPNZ)L=0
IF(KPN(MN(I,3),L+1).EQ.I2)GO TO 300
IF(KPN(MN(I,3),L+1).EQ.I)THEN
L=L+1
IF(L.EQ.IKPNZ)L=0
IF(KPN(MN(I,3),L+1).EQ.I2)GO TO 300
ENDIF
ENDIF

```

```

C
320 IF(NP.EQ.0)THEN
CALL NP_EMP_LIS(NP,-1)
ENDIF
IPOR(NP)=1
KPN(NP,1)=I
IKPN(NP)=1
IF(MN(I,3).EQ.0)THEN
MN(I,3)=NP
ELSE

```

```

IF(MN(I,4).NE.0)THEN
  WRITE(6,*)' MENISCO DEMASIADO SOLICITADO, NRO: ',I
  WRITE(6,*)' POROS YA REGISTRADOS EN MN: ',MN(I,3),MN(I,4)
  WRITE(6,*)' NUEVO CANDIDATO: ',NP,' ME PARO'
  CALL STOPAR
ENDIF
IF(NP.GT.MN(I,3))THEN
  MN(I,4)=NP
ELSE
  MN(I,4)=MN(I,3)
  MN(I,3)=NP
ENDIF
ENDIF

```

C

```

IFL=0
IF(MB(NBMAY,1).EQ.-1)THEN
  IFL=1
  IF(MB(NBMIN,1).EQ.-1)THEN
    IPOR(NP)=2
    LICOP(1)=LICOP(1)+1
    LICOP(LICOP(1)+1)=NP
    LICOM(1)=LICOM(1)+1
    LICOM(LICOM(1)+1)=I
    IF(MN(I,4).NE.0)THEN
      IF(NROT.LT.0)THEN
        IF((MN(I,3).NE.NP).AND.(MN(I,4).NE.NP))THEN
          WRITE(6,*)' CUIDADO',MN(I,3),MN(I,4),' #',NP,' STOPO'
          CALL STOPAR
        ELSE
          MN(I,3)=NP
          MN(I,4)=-1
        ENDIF
      ELSE

```

C

```

          WRITE(6,*)' MENISCO DEMASIADO SOLICITADO, NRO: ',I
          WRITE(6,*)' POROS YA REGIS.EN MN:',MN(I,3),MN(I,4)
          WRITE(6,*)' NUEVO CANDIDATO: CONTORNO, ME PARO'
          CALL STOPAR
        ENDIF
      ENDIF
      MN(I,4)--1
    ENDIF
  ENDIF
  IF((K.EQ.1).AND.(MB(NBMAY,1).EQ.-1))GO TO 340

```

C

```

350 IKPN(NP)=IKPN(NP)+1
    KPN(NP,IKPN(NP))=I2
    IF(MN(I2,3).EQ.0)THEN
      MN(I2,3)=NP
    ELSE
      IF(MN(I2,4).NE.0)THEN
        WRITE(6,*)' MENISCO DEMASIADO SOLICITADO2, NRO: ',I2
        WRITE(6,*)' POROS YA REGIS.EN MN:',MN(I2,3),MN(I2,4)
        WRITE(6,*)' NUEVO CANDIDATO: ',NP,' ME PARO'
        CALL STOPAR
      ENDIF
      IF(NP.GT.MN(I2,3))THEN
        MN(I2,4)=NP
      ELSE
        MN(I2,4)=MN(I2,3)

```

```

        MN(I2,3)=NP
    ENDIF
ENDIF
C
I1=I2
IF(NBMAY.EQ.MN(I1,1))THEN
    NBMAY=MN(I1,2)
ELSE
    NBMAY=MN(I1,1)
ENDIF

```

```

C
IF(MB(NBMAY,1).EQ.-1)THEN
    IF(IFL.EQ.1)THEN
        IF(IPOR(NP).EQ.1)THEN
            IPOR(NP)=2
            LICOP(1)=LICOP(1)+1
            LICOP(LICOP(1)+1)=NP
        ENDIF
        LICOM(1)=LICOM(1)+1
        LICOM(LICOM(1)+1)=I1
        IF(MN(I1,4).NE.0)THEN

```

```

C
            IF(NROT.LT.0)THEN
                IF((MN(I1,3).NE.NP).AND.(MN(I1,4).NE.NP))THEN
                    WRITE(6,*)'CUIDADO2',MN(I1,3),MN(I1,4),' #',NP,'STOPO'
                    CALL STOPAR
                ELSE
                    MN(I1,3)=NP
                    MN(I1,4)=-1
                ENDIF
            ELSE
                WRITE(6,*)' MENISCO DEMASIADO SOLICITADO, NRO: ',I1
                WRITE(6,*)' POROS YA REGIS.EN MN:',MN(I1,3),MN(I1,4)
                WRITE(6,*)' NUEVO CANDIDATO: CONTORNO 2 ME PARO'
                CALL STOPAR
            ENDIF
        ENDIF
        MN(I1,4)=-1
    ELSE
        IFL=1

```

```

C
        IF((IPOR(NP).EQ.3).OR.(IPOR(NP).EQ.13))THEN
            LICOM(1)=LICOM(1)+1
            LICOM(LICOM(1)+1)=I1
        ENDIF
    ENDIF
ELSE
    IFL=0
    IF((IPOR(NP).EQ.3).OR.(IPOR(NP).EQ.13))THEN
        LICOM(1)=LICOM(1)+1
        LICOM(LICOM(1)+1)=I1
    ENDIF
ENDIF

```

```

C
DO J=1,IMB(NBMAY)+1
    IF(MB(NBMAY,J).EQ.I1)GO TO 360
ENDDO
360 IF(J.EQ.1)THEN
    K=IMB(NBMAY)
ELSE

```

```

      K=J-1
      ENDIF
      IF((K.EQ.1).AND.(MB(NBMAY,1).EQ.-1))GO TO 340
      I2=MB(NBMAY,K)
      IF(I2.NE.I)GO TO 350
      IF(KPN(NP,2).EQ.I1)GO TO 350
C
C
C
      UN PORO SE COMPLETA SI SE HALLA EL INICIADOR Y EL SIGUIENTE MENISCO
      EN LA RONDA ES EL QUE SIGUE AL INICIADOR EN KPN
      IF(NBMAY.EQ.MN(I2,1))THEN
        NB91=MN(I2,2)
      ELSE
        NB91=MN(I2,1)
      ENDIF
      DO J=1,IMB(NB91)+1
        IF(MB(NB91,J).EQ.I2)GO TO 391
      ENDDO
391  IF(J.EQ.1)THEN
      K=IMB(NB91)
      ELSE
      K=J-1
      ENDIF
      IF((K.EQ.1).AND.(MB(NB91,1).EQ.-1))GO TO 491
      I91=MB(NB91,K)
      IF(I91.EQ.KPN(NP,2))GO TO 491
C
      GO TO 350
C
491  GO TO 900
C
C
C
340  IZF=IZF+1
      IF(IZF.GE.2)THEN
        WRITE(6,*)'  HIPOTESIS NO CONTEMPLADA EN DEF PORO:'
        WRITE(6,*)'  GRUPO DE AISLADAS EN EL CONTORNO'
        WRITE(6,*)'  NP, IKPN, KPN:', NP, IKPN(NP), (KPN(NP,M), M=1, KPDIM)
        CALL STOPAR
      ENDIF
      IF(IPOR(NP).EQ.1)THEN
        IPOR(NP)=3
        LICOP(1)=LICOP(1)+1
        LICOP(LICOP(1)+1)=NP
      ENDIF
      IF(IPOR(NP).EQ.2)IPOR(NP)=3
C#
      DO IK=1, IKPN(NP)
      IK2=KPN(NP, IK)
      IF(MN(IK2, 4).NE.-1)THEN
        LICOM(1)=LICOM(1)+1
        LICOM(LICOM(1)+1)=IK2
      ENDIF
      ENDDO
C
      DO IK=2, LICOB(1)+1
      IF(LICOB(IK).EQ.NBMAY)GO TO 370
      ENDDO
370  IK=IK+1
      IF(IK.EQ.(LICOB(1)+2))IK=2

```



```

IKPN(NP)=IKPN(NP)+1
KPN(NP,IKPN(NP))=-LICOB(IK)
IF(MB(LICOB(IK),2).LE.0)THEN
  MB(LICOB(IK),2)=-NP
  IPOR(NP)=13
  GO TO 370
ENDIF

```

```

C
NBMAI=LICOB(IK)
J=IMB(NBMAI)+2
I1=0
GO TO 360

```

```

C
300 NP=0
GO TO 910

```

```

C
900 CONTINUE

```

```

C
IF(IOR.EQ.1)THEN
  IF(IAT.EQ.1)THEN
    IF(IPOR(NP).NE.3)THEN
      WRITE(6,*)' ATENCION: PORO CON INICIACION AL REVES:',NP
      WRITE(6,*)' PERO CON IPOR#3 :',IPOR(NP)
    ENDIF
  ENDIF
  IKPN(NP)=-IKPN(NP)
ENDIF

```

```

C#
910 RETURN
END

```

```

C
*****
*****

```

SUBROUTINE RECAL_PORO(NP,AREA,ASUM)

```

*****
** RECALCULA EL 'AREA' Y EL CENTRO DE GRAVEDAD DEL PORO NP **
** ASUM=APOLI= AREA POLIGONAL CENTROS BOLAS **
*****
INCLUDE 'COM.INC'

```

```

C
COMMON/RECAL/ INSEG,NSEG(5,2)

```

```

C
IF(NP.EQ.0)THEN
  WRITE(6,*)' ERROR NRO.PORO NULO EN RECAL_PORO.STOPO'
  CALL STOPAR
ENDIF

```

```

100 IF(IKPN(NP).LT.0)THEN
  IF(IAT.EQ.1)THEN
    IF(IPOR(NP).NE.3)THEN
      WRITE(6,*)' ATENCION: EN RECAL_PORO CON INIC.REV.NP=',NP
      WRITE(6,*)' IPOR#3 =',IPOR(NP)
    ENDIF
  ENDIF
  NBMIN=MN(KPN(NP,1),2) !INVERSION BOLAS INICIALES
  NBMAI=MN(KPN(NP,1),1)
ELSE
  NBMIN=MN(KPN(NP,1),1) !CASO NORMAL
  NBMAI=MN(KPN(NP,1),2)

```

ENDIF

C
XBU=XB(NBMAY)+XBI(NBMAY)
YBU=YB(NBMAY)+YBI(NBMAY)
X1=XBU
Y1=YBU
XSUM=0.
YSUM=0.
ASUM=0.
SSUM=0.
TSUM=0.
VSUM=0. !SUMA VOLUMEN SECTORES
NBU=NBMA
NBI=NBU
IMU=KPN(NP,1)
IM1=IMU
XB9=XB(NBMIN)+XBI(NBMIN)
YB9=YB(NBMIN)+YBI(NBMIN)
CALL ACIM12(XB9,YB9,XBU,YBU,ACU)
AC1=ACU

C
INSEG=0
DO I=2,ABS(IKPN(NP))
IM=KPN(NP,I)
IF(IM.LT.0) THEN
 XX=XB(-IM)+XBI(-IM)
 YY=YB(-IM)+YBI(-IM)
 INSEG=INSEG+1
 NSEG(INSEG,1)=NBMA
 NSEG(INSEG,2)=-IM
 NBMA=-IM
ELSE
 IF(NBMA.EQ.MN(IM,1)) THEN
 NBMA=MN(IM,2)
 ELSE
 NBMA=MN(IM,1)
 ENDIF
 XX=XB(NBMA)+XBI(NBMA)
 YY=YB(NBMA)+YBI(NBMA)
ENDIF
XSUM=XSUM+XX
YSUM=YSUM+YY
ASUM=ASUM+XBU*YY-YBU*XX
CALL ACIM12(XBU,YBU,XX,YY,ACN)
TE=ACU+PI-ACN
C
IF(IES.EQ.1) WRITE(6,*) ' NBU,TEinicial ',NBU,TE/rad
IF(TE.GT.(2.0*PI)) TE=TE-2.*PI
IF(TE.LE.0.00000001) THEN
 IF(IMB(NBU).EQ.1) TE=TE+2.*PI
 IF(TE.LT.0.) TE=TE+2.*PI
ENDIF
TSUM=TSUM+TE
CALL SECTOR EX SOLAPE(NBU,IMU,IM,TE,SSSS,VSSS)
SSUM=SSUM+SSSS
VSUM=VSUM+VSSS
XBU=XX
YBU=YY
NBU=NBMA
IMU=IM
ACU=ACN

ENDDO

C
XSUM=XSUM+X1
YSUM=YSUM+Y1
ASUM=ASUM+XBU*Y1-YBU*X1
TE=ACU+PI-AC1
IF(TE.GT.(2.0*PI))TE=TE-2.*PI
IF(TE.LE.0.00000001)THEN
 IF(IMB(NBU).EQ.1)TE=TE+2.*PI
 IF(TE.LT.0.)TE=TE+2.*PI
ENDIF
TSUM=TSUM+TE
CALL SECTOR_EX_SOLAPE(NBU,IMU,IM1,TE,SSSS,VSSS)
SSUM=SSUM+SSSS
VSUM=VSUM+VSSS

C
C
C
CALCULO SECTORES BOLAS FUERA DEL CONTORNO

IF((IPOR(NP).EQ.3).OR.(IPOR(NP).EQ.13))THEN
 IF(INSEG.EQ.0)THEN
 WRITE(6,*)' ATENCION_INSEG,NP:',INSEG,NP
 ENDIF
 NBMAI=NB1
 IF(MB(NBMAI,1).NE.-1)CALL SECTOR_EX_CONT(NBMAI,SSUM,VSUM)
 DO I=2,ABS(IKPN(NP))
 IM=KPN(NP,I)
 IF(IM.LT.0)THEN
 NBMAI=-IM
 ELSE
 IF(NBMAI.EQ.MN(IM,1))THEN
 NBMAI=MN(IM,2)
 ELSE
 NBMAI=MN(IM,1)
 ENDIF
 IF(MB(NBMAI,1).NE.-1)CALL SECTOR_EX_CONT(NBMAI,SSUM,VSUM)
 ENDIF
ENDIF
ENDDO
ENDIF

C
ASUM=ASUM/2.

C
1123 VMAX(NP)=ASUM*ESPZ-VSUM
IF((VMAX(NP).LE.0.).OR.(VSUM.LT.0.))THEN
 IF((IPOR(NP).EQ.3).OR.(IPOR(NP).EQ.13))THEN
 IF(VSUM.LT.0.)THEN
 VSUM=0.
 GO TO 1123
 ENDIF
 ENDIF

WRITE(6,*)' VPROB NP,VTOT,VSECT,VMAX',NP,ASUM*ESPZ,VSUM,VMAX(NP)
CALL STOPAR
ENDIF

C
1113 AREA=ASUM-SSUM
IF((ASUM.GT.0.).AND.(SSUM.GE.0.).AND.(AREA.GT.0.))THEN
 CONTINUE
ELSE
 IF((IPOR(NP).EQ.3).OR.(IPOR(NP).EQ.13))THEN
 IF(AREA.LE.0.)THEN
 ATOL=PI*TR(1)*TR(1)/1000.

```

IF (ABS (AREA) .LT. ATOL) THEN
  AREA=0.
  GO TO 93
ELSE
  WRITE (6,*) ' PROB AREA NP, POL, SEC, AREA, IPOR, ATOL. SIGO'
  WRITE (6,*) NP, ASUM, SSUM, AREA, IPOR (NP), ATOL
  AREA=0.
  GO TO 93
ENDIF
ENDIF
IF (SSUM.LT.0.) THEN
  SSUM=0.
  GO TO 1113
ENDIF
ENDIF

```

```

C
  WRITE (6,*) ' PROB AREA NP, POL, SEC, AREA', NP, ASUM, SSUM, AREA
  CALL STOPAR
ENDIF

```

```

C
93  FL=FLOAT (ABS (IKPN (NP)))
    TCIE=(FL-2.)*PI      !CIERRE DE POLIGONO CON N LADOS
    IF ((TSUM.GT. (TCIE+0.01)).OR. (TSUM.LT. (TCIE-0.01))) THEN
      RAD=PI/180.
      WRITE (6,*) ' PROB CIERRE, SUMA, TEOR, NL ', TSUM/RAD, TCIE/RAD, FL
      WRITE (6,*) ' NP, TIME', NP, TIME
      CALL STOPAR
    ENDIF

```

```

C
  XP (NP)=XSUM/FL
  YP (NP)=YSUM/FL

```

```

C
  RETURN
END

```

```

*****
*****
SUBROUTINE RECAL_AIS (NP, ICAR, AREA)

```

```

*****
**   RESTA LAS AREAS Y VOLUMENES DE LAS BOLAS AISLADAS EN LOS POROS   **
**   ICAR: ANTIGUO CARACTER DEL PORO. IPOR: NUEVO CARACTER           **
*****

```

```

  INCLUDE 'COM.INC'
  COMMON/RECAL/ INSEG, NSEG (5,2)

```

```

C
  IF (ICAR.LT.10) GO TO 900

```

```

C
  IF (IPOR (NP).EQ.1) IPOR (NP)=11
  IF (IPOR (NP).EQ.2) IPOR (NP)=12
  IF (IPOR (NP).EQ.3) IPOR (NP)=13
  ICAR=IPOR (NP)

```

```

  J=0
  DO I=1, NBAIS
  NB=LIAIS (I)
  IF (MB (NB,2).EQ.-NP) THEN
    J=J+1
    IF (MB (NB,1).NE.-1) THEN
      ASUM=AREA
    
```

SSUM=PI*(TR(JT(NB))**2.)

C

```
VSUM=PI*(TR(JT(NB))**3.)/0.75
IF(ICAR.EQ.13)CALL SECTOR_EX_CONT(NB,SSUM,VSUM)
VMAX(NP)=VMAX(NP)-VSUM
IF((VMAX(NP).LE.0.).OR.(VSUM.LE.0.))THEN
  WRITE(6,*)' VPROB RECAL AIS VSUM,VMAX',VSUM,VMAX(NP)
  WRITE(6,*)' NP,NB,ICAR',NP,NB,ICAR
  CALL STOPAR
ENDIF
```

C

```
AREA=ASUM-SSUM
IF((ASUM.GT.0.).AND.(SSUM.GT.0.).AND.(AREA.GT.0.))THEN
  CONTINUE
ELSE
  WRITE(6,*)' PROB RECAL AIS AREA,,B.AIS,RESTA',ASUM,SSUM,AREA
  WRITE(6,*)' NP,NB,ICAR',NP,NB,ICAR
  CALL STOPAR
ENDIF
```

C

```
ENDIF
ENDIF
ENDDO
IF(J.EQ.0)THEN
  WRITE(6,*)' ERROR: NO EXISTE AISLADA.NP ',NP
  CALL STOPAR
ENDIF
900 RETURN
END
```

C

SUBROUTINE SECTOR_EX_CONT(NB,SSUM,VSUM)

** CALCULA LA PORCION DE BOLA QUE CAE FUERA DEL CONTORNO **

```
INCLUDE 'COM.INC'
COMMON/RECAL/ INSEG,NSEG(5,2)
```

C

```
X=XB(NB)+XBI(NB)
Y=YB(NB)+YBI(NB)
DR=TR(JT(NB))
DO I=1,INSEG
  NA=NSEG(I,1)
  ND=NSEG(I,2)
  XA=XB(NA)+XBI(NA)
  YA=YB(NA)+YBI(NA)
  XD=XB(ND)+XBI(ND)
  YD=YB(ND)+YBI(ND)
  DL=SQRT((XD-XA)*(XD-XA)+(YD-YA)*(YD-YA))
  DN=SQRT((X-XD)*(X-XD)+(Y-YD)*(Y-YD))
  DM=SQRT((X-XA)*(X-XA)+(Y-YA)*(Y-YA))
  IF(DM.GE.DL)GO TO 200
  IF(DN.GE.DL)GO TO 200
  DALFA=ACOS((DN*DN+DL*DL-DM*DM)/(2.*DN*DL))
  DD=DN*SIN(DALFA)
  IF(DD.GE.DR)GO TO 200
  DTETA=ACOS(DD/DR)
```

```

SSUM=SSUM-DTETA*DR*DR+DR*DD*SIN(DTETA)
SRES=PI*DR*DR*DR*((2./3.)-COS(DTETA)+(COS(DTETA)**3.)/3.)
VSUM=VSUM-SRES

```

```

200 ENDDO

```

```

C
RETURN
END

```

```

C
*****
*****

```

```

SUBROUTINE SECTOR_EX_SOLAPE(NBU,IMU,IM,TE,SSSS,VSSS)

```

```

*****
** CALCULA EL SECTOR DE BOLA NBU INTERIOR A LA POLIGONAL DEL PORO **
** DESCONTANDO DEBIDAMENTE LOS SOLAPES IMU E IM **
*****
INCLUDE 'COM.INC'

```

```

C
IF((NBU.EQ.0).OR.(IMU.EQ.0).OR.(IM.EQ.0))THEN
WRITE(6,*)' ERROR EN SECTOR_EX_SOLAPE:NBU,IMU,IM:',NBU,IMU,IM
CALL STOPAR
ENDIF

```

```

C
TRBU=TR(JT(NBU))

```

```

C
C
CALCULO DEL SECTOR COMPLETO

```

```

SSSS=TE*0.5*TRBU*TRBU
VSSS=TE*TRBU*TRBU*TRBU/1.5

```

```

C
C
CALCULO DE LA PARTE CORRESPONDIENTE DE LOS DOS SOLAPES

```

```

SSSR=0.
VSSR=0.
NM=IMU
IPAS=1

```

```

100 IF(NM.LT.0)GO TO 800
IF(ICASO.EQ.2)THEN
NB1=MN(NM,1)
NB2=MN(NM,2)
RB1=TR(JT(NB1))
RB2=TR(JT(NB2))
CALL CH_BOLA_BOLA(NB1,NB2,D)
IF(D.GE.0.)THEN
YOCHO=0.
ELSE
GA=RB2/RB1
AL=D/RB2
X2=1.+GA+GA*AL
X8=(X2*X2+1.-GA*GA)/(2.*X2)
YOCHO=RB1*SQRT(1.-X8*X8)
ENDIF
ELSE
YOCHO=Y8(NM)
ENDIF

```

```

C
IF(YOCHO.EQ.0.)GO TO 800
TET=ASIN(YOCHO/TRBU)
CT=COS(TET)

```

```

SSSR=SSSR+TET*0.5*TRBU*TRBU-CT*TRBU*YOCHO*0.5
VSSR=VSSR+PI*0.5*TRBU*TRBU*TRBU*((2./3.)-CT+(CT*CT*CT/3.))
800 IF(IPAS.EQ.1)THEN
      IPAS=2
      NM=IM
      GO TO 100
ENDIF

```

```

C
SSSS=SSSS-SSSR
VSSS=VSSS-VSSR
IF(SSSS.LT.0.)SSSS=0.
IF(VSSS.LT.0.)VSSS=0.

```

```

C
900 RETURN
END

```

```

*****
*****
SUBROUTINE REORDENA_MB(NB)

```

```

*****
** REORDENA LOS MENISCOS DE LA BOLA NB (MATRIZ MB(NB,)) **
*****
INCLUDE 'COM.INC'

```

```

C
DIMENSION ACIM(MBDIM),IJ(MBDIM)

```

```

C
I=NB
IF(IMB(NB).EQ.0)THEN
  IF(MB(NB,2).GE.0)THEN
    WRITE(6,*)' LA BOLA ',NB,' ES AISLADA Y NO SE SABE PORO'
    CALL STOPAR
  ENDIF
  GO TO 900
ENDIF

```

```

L=0
IF(MB(I,1).EQ.-1)L=1
CALL ACIM12(0.,0.,XB(I),YB(I),ACIM0)
DO J=1+L,IMB(I)+L
  IJ(J)=MB(I,J)
  IF(IJ(J).EQ.0)THEN
    WRITE(6,*)' HAY UN CERO NO ESPERADO; BOLA ',NB
    CALL STOPAR
  ENDIF
  CALL ACIM12(XB(I),YB(I),XM(IJ(J)),YM(IJ(J)),ACIM(J))
  ACIM(J)=ACIM(J)-ACIM0
  IF(ACIM(J).LT.0.)ACIM(J)=ACIM(J)+2.*PI
ENDDO

```

```

J=IMB(NB)+1+L

```

```

120 J=J-1

```

```

DO K=1+L,J-1
  IF(ACIM(K).GT.ACIM(K+1))THEN
    TEM=ACIM(K)
    JTEM=IJ(K)
    ACIM(K)=ACIM(K+1)
    IJ(K)=IJ(K+1)
    ACIM(K+1)=TEM
    IJ(K+1)=JTEM
  ENDIF

```

```

ENDDO
IF(J.GT.(2+L))GO TO 120
DO K=1+L,IMB(I)+L
  MB(I,K)=IJ(K)
ENDDO

```

```

C
900 RETURN
END

```

```

C
*****
*****

```

```

SUBROUTINE ACIM12(X1,Y1,X2,Y2,TETA)

```

```

*****
**          HALLA EL ANGULO ANTIHORARIO ENTRE EL EJE XX+          **
**          Y LA ORIENTACION 1->2 ENTRE 0 Y 2PI                **
*****
INCLUDE 'PREC.INC'

```

```

C
PI=3.1415926535897932384
IF(Y1.EQ.Y2)THEN
  IF(X1.EQ.X2)THEN
    WRITE(6,*)' ERROR EN ACIM12: PUNTOS IGUALES',X1,Y1
    CALL STOPAR
  ENDIF
  TETA=0.
  IF(X2.LT.X1)TETA=PI
  GO TO 900
ENDIF
IF(X2.EQ.X1)THEN
  TETA=PI/2.
ELSE
  TETA=ATAN((Y2-Y1)/(X2-X1))
  IF(TETA.LT.0.)TETA=TETA+PI
ENDIF
IF(Y2.LT.Y1)TETA=TETA+PI

```

```

C
900 RETURN
END

```

```

C
*****
*****

```

```

SUBROUTINE NP_EMP_LIS(NP,IPON)

```

```

*****
**          GESTIONA LA LISTA DE NUMEROS DE POROS LIBRES          **
**          IPON:  +1 : SE GUARDA UN PORO.AUMENTA EMP LIS.DISMINUYE NTP **
**          -1 : SE RECUPERA .DISMINUYE EMP LIS. AUMENTA NTP **
*****
INCLUDE 'COM.INC'

```

```

C
IF(IPON.EQ.-1)GO TO 500
IF(IPON.NE.1)THEN
  WRITE(6,*)' ERROR IPON= ',IPON,' .ME PARO'
  WRITE(6,*)' NP= ',NP
  CALL STOPAR
ENDIF

```

```

C

```


SE GUARDA UN NP

C
C

```

IF((IPOR(NP).NE.0).OR.(APM(NP).NE.0.).OR.(WPM(NP).NE.0.))THEN
  WRITE(6,*)'  ERROR: EL PORO ',NP,' DEBE ESTAR VACIO'
  WRITE(6,*)'  Y DESARMADO.  ME PARO.  IPOR . APM . WPM'
  WRITE(6,*)'          ',IPOR(NP),APM(NP),WPM(NP)
  CALL STOPAR
ENDIF
IF(INPEL.GE.LEDIM)THEN
  WRITE(6,*)'  SUPERADA DIMENSION NPEL ',INPEL,' STOPO'
  CALL STOPAR
ENDIF

```

C

```

DO I=1,INPEL
IF(NP.GT.NPEL(I))GO TO 100
ENDDO
NPEL(INPEL+1)=NP
GO TO 200
100 DO J=INPEL,I,-1
    NPEL(J+1)=NPEL(J)
    ENDDO
200 NPEL(I)=NP
    INPEL=INPEL+1
    NTP=NTP-1

```

C

```
WRITE(11,*)' PORO DESOCUPADO: ',NP
```

C

C

C

```
SE ACERAN TODAS LAS VARIABLES
```

```

XP(NP)=0.
YP(NP)=0.
IKPN(NP)=0
DO I=1,KPDIM
KPN(NP,I)=0
ENDDO
AMAX(NP)=0.
VMAX(NP)=0.
APP(NP)=0.
WPP(NP)=0.
AHP(NP)=0.
DELFI(NP)=0.
VHP(NP)=0.

```

C

```
GO TO 900
```

C

C

C

```
SE RECUPERA UN NP
```

```

500 IF(INPEL.EQ.0)THEN
    NTP=NTP+1
    NP=NTP
    GO TO 800
ENDIF
NP=NPEL(INPEL)
NPEL(INPEL)=0
INPEL=INPEL-1
NTP=NTP+1
800 WRITE(11,*)' PORO RECUPERADO: ', ' ',NP
C
900 RETURN
END

```

```

C
*****
*****
SUBROUTINE NM_EMP_LIS(NM,IPON)
*****
**      GESTIONA LOS NUMEROS DE MENISCOS LIBRES      **
**      IPON INDICA SI SE GUARDA O SE RECUPERA:      **
**      +1 : SE GUARDA UN MENISCO.AUMENTA EMP LIS.DISMINUYE NTM      **
C      -1 : SE RECUPERA . DISMINUYE EMP LIS. AUMENTA NTM      **
*****
INCLUDE 'COM.INC'
C
IF(IPON.EQ.-1)GO TO 500
IF(IPON.NE.1)THEN
  WRITE(6,*)'  ERROR IPON= ',IPON,' .ME PARO'
  WRITE(6,*)'          NM= ',NM
  CALL STOPAR
ENDIF
C
C          SE GUARDA UN NM
C
50  IEX=0
CALL EX_LICOM(NM,IEX)
IF(IEX.EQ.1)GO TO 50
C
MN(NM,4)=0
MN(NM,3)=0
MN(NM,2)=0
MN(NM,1)=0
C
IF(INMEL.GE.LEDIM)THEN
  WRITE(6,*)'  SUPERADA DIMENSION NMEL ',INMEL,' STOPO'
  CALL STOPAR
ENDIF
C
DO I=1,INMEL
IF(NM.GT.NMEL(I))GO TO 100
ENDDO
NMEL(INMEL+1)=NM
GO TO 200
100 DO J=INMEL,I,-1
NMEL(J+1)=NMEL(J)
ENDDO
NMEL(I)=NM
200 INMEL=INMEL+1
NTM=NTM-1
C
C          SE ACERAN TODAS LAS VARIABLES
C
IF((V(NM).NE.0.).OR.(ADMM(NM).NE.0.))THEN
  WRITE(6,*)'  ERROR: EL MENISCO DEBERIA ESTAR VACIO'
  WRITE(6,*)'  ME PARO. NM,V,ADMM',NM,V(NM),ADMM(NM)
  CALL STOPAR
ENDIF
WRITE(11,*)' MEN. DESOCUPADO: ',',',',',',',NM
XM(NM)=0.
YM(NM)=0.
TETA(NM)=0.

```

```

T1(NM)=0.
R1(NM)=0.
Y8(NM)=0.
PWPA(NM)=0.
HKTE(NM)=0.
SARM(NM)=0.
SALM(NM)=0.
FN(NM)=0.
FT(NM)=0.
DELNMAX(NM)=0.
DELTAS(NM)=0.
FNW(NM)=0.
FNSOL(NM)=0.

```

C

```
GO TO 900
```

C

```
SE RECUPERA UN NM
```

C

```

500 IF(INMEL.EQ.0)THEN
      NTM=NTM+1
      NM=NTM
      GO TO 800
ENDIF

```

```

NM=NMEL(INMEL)
NMEL(INMEL)=0
INMEL=INMEL-1
NTM=NTM+1

```

C

```
800 WRITE(11,*)' MEN. RECUPERADO: ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' ', NM
```

C

```

900 RETURN
END

```

C

```

*****
*****

```

```
SUBROUTINE EX_LICOM(NM,IEX)
```

```

*****
**          SACA EL MENISCO NM DE LA LISTA DEL CONTORNO (LICOM) UNA VEZ          **
*****
INCLUDE 'COM.INC'

```

C

```

IEX=0
DO I=2,LICOM(1)+1
IF(LICOM(I).EQ.NM)GO TO 300
ENDDO
GO TO 900

```

300

```

IEX=1
DO J=I,LICOM(1)+1
LICOM(J)=LICOM(J+1)
ENDDO
LICOM(LICOM(1)+1)=0
LICOM(1)=LICOM(1)-1

```

900

```

RETURN
END

```

C

```

*****
*****

```

```
SUBROUTINE BAIS_LIS(NB,IPON)
```

```

*****
**      GESTIONA LA LISTA DE BOLAS AISLADAS      **
**      IPON INDICA SI SE INGRESA O SE RETIRA:    **
**      +1 : SE INGRESA. AUMENTA LIAIS. AUMENTA  **
**      -1 : SE RETIRA. DISMINUYE LIAIS. DISMINUYE **
**      NBAIS.                                     **
*****
INCLUDE 'COM.INC'

```

```

C
IF(IPON.EQ.-1)GO TO 500
IF(IPON.NE.1)THEN
  WRITE(6,*)'  ERROR IPON= ',IPON,' .ME PARO'
  WRITE(6,*)'          NB.AIS= ',NM
  CALL STOPAR
ENDIF

```

```

C
C
C
          SE INGRESA
IF(NBAIS.GE.AIDIM)THEN
  WRITE(6,*)'  SUPERADA DIMENSION LIAIS ',NBAIS,' STOPO'
  CALL STOPAR
ENDIF

```

```

C
IF((MB(NB,1).GT.0).OR.(MB(NB,2).GT.0).OR.(IMB(NB).NE.0))THEN
  WRITE(6,*)'  ERROR: LA BOLA ',NB,' NO ES AISLADA. ME PARO'
  WRITE(6,*)'  MB1= ',MB(NB,1),' MB2= ',MB(NB,2),' IMB ',IMB(NB)
  CALL STOPAR
ENDIF

```

```

C
NBAIS=NBAIS+1
LIAIS(NBAIS)=NB

```

```

C
GO TO 900
C
C
C
          SE RETIRA

```

```

500  DO I=1,NBAIS
      IF(LIAIS(I).EQ.NB)GO TO 200
      ENDDO
      WRITE(6,*)'  ERROR, NO ENCONTRE BOLA ',NB,' EN LIAIS.ME PARO'
      CALL STOPAR
200  DO J=I,NBAIS
      LIAIS(J)=LIAIS(J+1)
      ENDDO
      LIAIS(NBAIS)=0
      NBAIS=NBAIS-1
C
900  RETURN
      END

```

```

C
*****
*****

```

SUBROUTINE ROT_CONT(NM)

```

*****
**      LLEVA A CABO LOS CAMBIOS DE CONECTIVIDAD TRAS UNA      **
**      ROTURA CONT.-MENISCO POR "AGOTAMIENTO" DE AGUA        **
**      SE DEBE: INGRESAR EL MENISCO EN NMEL Y                **
**      COMUNICAR "FUNDIR" LOS POROS                           **
*****

```

```
INCLUDE 'COM.INC'  
DIMENSION KPNZ(KPDIM)
```

C

```
NB1=MN(NM,1)  
NB2=MN(NM,2)  
XBINC=XB(NB1)+XBI(NB1)-XB(NB2)-XBI(NB2)  
YBINC=YB(NB1)+YBI(NB1)-YB(NB2)-YBI(NB2)  
D=SQRT(XBINC*XBINC+YBINC*YBINC)  
D=D-TR(JT(NB1))-TR(JT(NB2))  
ALFA=D/TR(JT(NB2))
```

C

```
IF(IAT.EQ.1)THEN  
IF(V(NM).EQ.0.)THEN  
WRITE(6,*)' ATENCION.ROT_CONT: MENISCO YA ROTO',NM  
ENDIF  
ENDIF  
IF(ALFA.LE.0.)THEN  
WRITE(6,*)' ERROR.ROT_CONT: MEN.SOBRE.CONTAC.',NM,ALFA  
CALL STOPAR  
ENDIF
```

C

```
NP1=MN(NM,3)  
NP2=MN(NM,4)  
NB1=MN(NM,1)  
NB2=MN(NM,2)
```

C

C

C

```
SECCION DE CESION DE V(NM)&ADMM
```

```
NB=NB1  
IF(ICASO.NE.2)THEN  
NBC=NB2  
NMB1=0  
NMB2=0  
NMBC1=0  
NMBC2=0  
JB=0  
JBC=0  
IF(MB(NB,1).EQ.-1)JB=1  
IF(MB(NBC,1).EQ.-1)JBC=1
```

C

```
IF(IMB(NB).GT.1)THEN  
DO KI=1+JB,IMB(NB)+JB  
IF(MB(NB,KI).EQ.NM)GO TO 300  
ENDDO  
IF(KI.EQ.(1+JB))THEN  
NMB1=MB(NB,IMB(NB)+JB)  
ELSE  
NMB1=MB(NB,KI-1)  
ENDIF  
IF(KI.EQ.(IMB(NB)+JB))THEN  
NMB2=MB(NB,1+JB)  
ELSE  
NMB2=MB(NB,KI+1)  
ENDIF  
ENDIF
```

300

C

```
IF(IMB(NBC).GT.1)THEN  
DO KI=1+JBC,IMB(NBC)+JBC  
IF(MB(NBC,KI).EQ.NM)GO TO 320
```

```

320      ENDDO
        IF(KI.EQ.(1+JBC)) THEN
            NMBC1=MB(NBC,IMB(NBC)+JBC)
        ELSE
            NMBC1=MB(NBC,KI-1)
        ENDIF
        IF(KI.EQ.(IMB(NBC)+JBC)) THEN
            NMBC2=MB(NBC,1+JBC)
        ELSE
            NMBC2=MB(NBC,KI+1)
        ENDIF
    ENDIF
ENDIF

C      IV=0
      IF(NMB1.GT.0) IV=IV+1
      IF(NMB2.GT.0) IV=IV+1
      IF(NMBC1.GT.0) IV=IV+1
      IF(NMBC2.GT.0) IV=IV+1
      VCUAR=V(NM)/FLOAT(IV)
      ACUAR=ADMM(NM)/FLOAT(IV)

C
      IF(NMB1.GT.0) THEN
          V(NMB1)=V(NMB1)+VCUAR
          ADMM(NMB1)=ADMM(NMB1)+ACUAR
      ENDIF
      IF(NMB2.GT.0) THEN
          V(NMB2)=V(NMB2)+VCUAR
          ADMM(NMB2)=ADMM(NMB2)+ACUAR
      ENDIF
      IF(NMBC1.GT.0) THEN
          V(NMBC1)=V(NMBC1)+VCUAR
          ADMM(NMBC1)=ADMM(NMBC1)+ACUAR
      ENDIF
      IF(NMBC2.GT.0) THEN
          V(NMBC2)=V(NMBC2)+VCUAR
          ADMM(NMBC2)=ADMM(NMBC2)+ACUAR
      ENDIF
ENDIF

C
C      SECCION DE REORGANIZACION DE LA CONECTIVIDAD
C
      IF(NP2.EQ.-1) GO TO 600
      IF(NP1.EQ.NP2) GO TO 400

C
C      CASO MENISCO ENTRE DOS POROS
C
      V(NM)=0.
      ADMM(NM)=0.
      CALL EX_MB(NB1,NM)
      CALL EX_MB(NB2,NM)
      CALL EX_KPN(NP1,NM)
      CALL EX_KPN(NP2,NM)
      CALL NM_EMP_LIS(NM,+1)
      ICAR=0
      IF(IMB(NB1).EQ.0) THEN
          IF(MB(NB1,1).NE.-1) THEN
              WRITE(6,*)' ERROR: QUEDO AISL. Y DEBERIA SER DEL CONT'
              WRITE(6,*)' BOLA: ',NB1,' STOPO'
              CALL STOPAR
          ENDIF
      ENDIF

```

```

NB=NB1
ICAR=1
ENDIF
IF(IMB(NB2).EQ.0)THEN
IF(MB(NB2,1).NE.-1)THEN
WRITE(6,*)' ERROR: QUEDO AISL. Y DEBERIA SER DEL CONT'
WRITE(6,*)' BOLA: ',NB2,' STOPO'
CALL STOPAR
ENDIF
IF(ICAR.EQ.1)THEN
WRITE(6,*)' ERROR: LAS DOS BOLAS QUEDAN AISLADAS'
WRITE(6,*)' NBOLAS= ',NB1,NB2,' STOPO'
CALL STOPAR
ENDIF
NB=NB2
ICAR=1
ENDIF
IF(ICAR.EQ.1)THEN
CALL BAIS_LIS(NB,+1)
NP=NP2
IF(NP1.LT.NP2)NP=NP1
MB(NB,2)=-NP
IF((IPOR(NP).EQ.3).OR.(IPOR(NP).EQ.13))THEN
IPOR(NP)=13
ELSE
WRITE(6,*)' ERROR: AISLADA Y DEL CONTORNO. NO EN'
WRITE(6,*)' ESTE TIPO DE PORO.IPOR= ',IPOR(NP),' STOPO'
CALL STOPAR
ENDIF
ENDIF

```

C

```

CALL FUNDIR_POROS(NP1,NP2)
GO TO 900

```

C

```

CASO BOLA 1 SOLO CONTACTO

```

C

400

```

CONTINUE
NB=0
IF(IMB(NB1).EQ.1)THEN
NB=NB1
IF(IMB(NB2).EQ.1)THEN
WRITE(6,*)' ROT CONT',NM
WRITE(6,*)' ERROR LAS DOS QUEDAN AISLADAS! ',NB1,NB2
CALL STOPAR
ENDIF
ELSE
IF(IMB(NB2).NE.1)THEN
IF(ICASO.EQ.2)THEN
IF(V(NM).NE.2.)THEN
V(NM)=2.
ENDIF
GO TO 900
ELSE
WRITE(6,*)' ROT CONT',NM,TIME,IHER
WRITE(6,*)' ERROR: DEBIA QUEDAR UNA AISLADA',NB1,NB2
WRITE(6,*)' STOPO'
CALL STOPAR
ENDIF
ENDIF
NB=NB2

```

```

ENDIF
C
V(NM)=0.
ADMM(NM)=0.
CALL EX_MB(NB1,NM)
CALL EX_MB(NB2,NM)
CALL EX_KPN(NP1,NM)
CALL EX_KPN(NP1,NM)
CALL NM_EMP_LIS(NM,+1)
C
IKPNZ=ABS(IKPN(NP1))
DO I=1,IKPNZ
KPNZ(I)=KPN(NP1,I)
ENDDO
CALL DESARMA_PORO(NP1,NROT)
NPSUS=NP1
DO I=1,IKPNZ
IF(KPNZ(I).GT.0)THEN
NP1=NPSUS
CALL DEF_PORO(KPNZ(I),NP1,NROT)
IF(NP1.NE.0)GO TO 404
ENDIF
ENDDO
C
WRITE(6,*)' ERROR: EN ROT CONT NO REDEFINIDO PORO=',NPSUS
WRITE(6,*)' BOLA 1 SOLO CONT.NM,NB,NROT',NM,NB,NROT
CALL STOPAR
C
404 IF(IPOR(NP1).EQ.1)IPOR(NP1)=11
IF(IPOR(NP1).EQ.2)IPOR(NP1)=12
IF(IPOR(NP1).EQ.3)IPOR(NP1)=13
MB(NB,2)--NP1
IF(MB(NB,1).NE.0)THEN
WRITE(6,*)' ERROR, BOLA AIS. NO PUEDE TENER ',MB(NB,1)
WRITE(6,*)' (EN ESTE CASO)EN PRIMERA POSICION.NB= ',N
CALL STOPAR
ENDIF
CALL BAIS LIS(NB,+1)
CALL CH_HUERFA(IKPNZ,KPNZ)
CALL RECAL_PORO(NP1,AREA,APOLI)
CALL RECAL_AIS(NP1,IPOR(NP1),AREA)
AMAX(NP1)=AREA
GO TO 900
C
C
C
C
C
C
C
C
C
C
600 CASO MENISCO ENTRE PORO Y CONTORNO
MINI=KPN(NP1,1)
V(NM)=0.
ADMM(NM)=0.
CALL EX_MB(NB1,NM)
CALL EX_MB(NB2,NM)
IRECU=0
IF(MINI.EQ.NM)THEN
IF(IAT.EQ.1)THEN
WRITE(6,*)' ATENCION:ROT_CONT INICIADOR,NM,NP1',NM,NP1
ENDIF
IRECU=1
ENDIF
IF(IKPN(NP1).LE.0)IRECU=1
CALL EX_KPN(NP1,NM)

```



```

CALL NM EMP LIS(NM,+1)
IF((IPOR(NP1).EQ.1).OR.(IPOR(NP1).EQ.11))THEN
  WRITE(6,*)' ERROR: NO PUEDE SER ESTE CARACTER. STOPO'
  WRITE(6,*)' IPOR= ',IPOR(NP1),' NPORO= ',NP1
  CALL STOPAR
ENDIF
IF(IPOR(NP1).EQ.2)IPOR(NP1)=3
IF(IPOR(NP1).EQ.12)IPOR(NP1)=13

C
NBA=0
IF((IMB(NB1).EQ.0).AND.(IMB(NB2).EQ.0))THEN
  WRITE(6,*)' SITUACION ERRONEA ANTERIOR.AL ROMPER CONTAC.',NM
  WRITE(6,*)' LAS 2 BOLAS',NB1,NB2,' SON AISL.(ANTES CADENA)'
  CALL STOPAR
ENDIF
IF(IMB(NB1).EQ.0)NBA=NB1
IF(IMB(NB2).EQ.0)NBA=NB2
IF(NBA.NE.0)THEN
  CALL BAIS LIS(NBA,+1)
  IF(IPOR(NP1).EQ.3)IPOR(NP1)=13
ENDIF

C
ICAR=IPOR(NP1)
MINI=KPN(NP1,1)
IKPNZ=ABS(IKPN(NP1))
DO I=1,IKPNZ
  KPNZ(I)=KPN(NP1,I)
ENDDO
CALL DESARMA_PORO(NP1,NROT)
NPSUS=NP1
IF(MINI.LE.0)THEN
  NP1=0
ELSE
  CALL DEF_PORO(MINI,NP1,NROT)
ENDIF
IF(NP1.EQ.0)THEN
  IF(IRECU.EQ.1)THEN
    DO I=2,IKPNZ
      IF(KPNZ(I).GT.0)THEN
        NP1=NPSUS
        CALL DEF_PORO(KPNZ(I),NP1,NROT)
        IF(NP1.NE.0)GO TO 620
      ENDIF
    ENDDO
    NP1=NPSUS
    CALL DEF_PORO(-MINI,NP1,NROT)
  ENDIF
ENDIF

C
IF(NP1.EQ.0)THEN
  WRITE(6,*)' ERROR: EN ROT CONT NO REDEFINIDO PORO=',NPSUS
  WRITE(6,*)' MEN.ENTRE PORO Y CONT.NM,MINI,NROT',NM,MINI,NROT
  CALL STOPAR
ENDIF
620 CALL CH_HUERFA(IKPNZ,KPNZ)
CALL RECAL_PORO(NP1,AREA,APOLI)
CALL RECAL_AIS(NP1,ICAR,AREA)
IPOR(NP1)=ICAR
AMAX(NP1)=AREA

C

```

900 RETURN
END

C

SUBROUTINE EX_MB(NB,NM)

** SE ENCARGA DE SACAR EL MENISCO NM DE LA LISTA DE MENISCOS **
** QUE RODEAN A LA BOLA NB. **

INCLUDE 'COM.INC'

C
K=NB
INC=0
IF(MB(K,1).EQ.-1)INC=1
DO I=1,IMB(K)+INC
IF(MB(K,I).EQ.NM)GO TO 100
ENDDO
WRITE(6,*)' ERROR.NO ENCONTRE MEN= ',NM,' EN BOLA ',K
CALL STOPAR
100 DO J=I,IMB(K)+INC
MB(K,J)=MB(K,J+1)
ENDDO
MB(K,IMB(K)+INC)=0
IMB(K)=IMB(K)-1

C
RETURN
END

C

SUBROUTINE EX_KPN(NP,NM)

** SE ENCARGA DE SACAR EL MENISCO NM DE LA LISTA DE MENISCOS **
** QUE RODEAN AL PORO NP (KPN()) **

INCLUDE 'COM.INC'

C
DO I=1,ABS(IKPN(NP))
IF(KPN(NP,I).EQ.NM)GO TO 100
ENDDO
WRITE(6,*)' ERROR.NO ENCONTRE MEN= ',NM,' EN PORO ',NP
CALL STOPAR
100 DO J=I,ABS(IKPN(NP))
KPN(NP,J)=KPN(NP,J+1)
ENDDO
KPN(NP,ABS(IKPN(NP)))=0
IF(IKPN(NP).GT.0)THEN
IKPN(NP)=IKPN(NP)-1
ELSE
IKPN(NP)=IKPN(NP)+1
ENDIF

C
RETURN
END

C

SUBROUTINE FUNDIR_POROS(NP1, NP2)

```
*****
**      LLEVA A CABO LOS CAMBIOS DE CONECTIVIDAD POR FUSION      **
**      DE DOS POROS DEBIDO A LA ROTURA DEL CONTACTO QUE LOS SEPARABA **
*****
      INCLUDE 'COM.INC'
      DIMENSION KPNZ(KPDIM)

C
      IKPNZ=ABS(IKPN(NP1))
      DO I=1, IKPNZ
      KPNZ(I)=KPN(NP1, I)
      ENDDO

C
      IKPNY=IKPNZ+ABS(IKPN(NP2))
      IF(IKPNY.GT.KPDIM) THEN
      WRITE(6,*)'  ERROR: SE SUPERA DIMENSION KPDIM ', KPDIM
      WRITE(6,*)'  EN LA SUBROUTINA FUNDIR POROS = ', IKPNY
      WRITE(6,*)'NP1, NP2, IKPN1, IKPN2=' , NP1, NP2, IKPN(NP1), IKPN(NP2) !CA4
      CALL STOPAR
      ENDIF
      DO I=IKPNZ+1, IKPNY
      KPNZ(I)=KPN(NP2, I- IKPNZ)
      ENDDO
      IKPNZ=IKPNY
      !CA4

C
      IF(NP1.EQ.NP2) THEN
      WRITE(6,*)'  ERROR, LOS DOS POROS SON IGUALES ', NP1
      CALL STOPAR
      ENDIF
      IF(NP1.LT.NP2) THEN
      NP=NP1
      NPN=NP2
      ELSE
      NP=NP2
      NPN=NP1
      ENDIF
      MINI=KPN(NP, 1)

C
      VMAXS=VMAX(NP)+VMAX(NPN)
      AMAXS=AMAX(NP)+AMAX(NPN)
      XPS=(XP(NP)+XP(NPN))/2.
      YPS=(YP(NP)+YP(NPN))/2.

C
      SAPM=APM(NP)+APM(NPN)
      SWPM=WPM(NP)+WPM(NPN)
      APM(NPN)=0.
      WPM(NPN)=0.

C
      ICAR=IPOR(NP)
      ICARN=IPOR(NPN)
      IC=0
      IF(ICAR.GT.10) IC=1
      IF(ICARN.GT.10) THEN
      IC=1
      CALL CAMB_BAIS_POROS(NPN, NP)
      ENDIF
```

```
CALL DESARMA_PORO(NP,NROT)
CALL DESARMA_PORO(NPN,NROT)
```

C

```
NPSUS=NP
IF(MINI.LE.0)THEN
  NP=0
  GO TO 288
```

```
ENDIF
CALL DEF_PORO(MINI, NP, NROT)
```

288

```
IF(NP.EQ.0)THEN
  IF(IAT.EQ.1)THEN
    WRITE(6,*)'ATENC:FUNDIR P,NO REDEFINIDO PORO A LA 1A',NP1,NP2
    WRITE(6,*)'INDICATIVO:ROTO INICIADOR O INICIACION NEGATIVA'
    WRITE(6,*)'MINI=',MINI,' ; SE INTENTA CON LOS OTROS'
  ENDIF
  DO I=1,IKPNZ
    IF(KPNZ(I).GT.0)THEN
      NP=NPSUS
      CALL DEF_PORO(KPNZ(I),NP,NROT)
      IF(NP.NE.0)GO TO 620
    ENDIF
  ENDDO
  IF(MINI.GT.0)THEN
    NP=NPSUS
    CALL DEF_PORO(-MINI, NP, NROT)
  ENDIF
ENDIF
```

C

```
IF(NP.EQ.0)THEN
  WRITE(6,*)' ERROR:FUNDIR.NO REDEF.PORO DE NINGUNA FORMA'
  WRITE(6,*)' NPOROS:',NPSUS,NPN,' MINI',MINI
  CALL STOPAR
ENDIF
```

C

620

```
IF(IC.EQ.1)THEN
  IF(IPOR(NP).EQ.1)IPOR(NP)=11
  IF(IPOR(NP).EQ.2)IPOR(NP)=12
  IF(IPOR(NP).EQ.3)IPOR(NP)=13
ENDIF
CALL CH_HUERFA(IKPNZ,KPNZ)
CALL NP_EMP_LIS(NPN,+1)
```

C

```
IF(ICASO.NE.2)THEN
  APM(NP)=SAPM
  WPM(NP)=SWPM
ENDIF
```

C

```
AMAX(NP)=AMAXS
VMAX(NP)=VMAXS
XP(NP)=XPS
YP(NP)=YPS
```

C

```
900 RETURN
END
```

C

```
*****
*****
```

```
SUBROUTINE CAMB_BAIS_POROS(NPN,NP)
```

```

*****
**      CAMBIA LAS BOLAS AISLADAS DEL PORO NPN AL NP      **
*****
      INCLUDE 'COM.INC'

C
      J=0
      DO I=1,NBAIS
      NB=LIAIS(I)
      IF(MB(NB,2).EQ.-NPN)THEN
        J=J+1
        MB(NB,2)=-NP
      ENDIF
      ENDDO

C
      IF(J.EQ.0)THEN
        WRITE(6,*)'  ERROR NO SE ENCONTRO LA BOLA AISLADA '
        WRITE(6,*)'  CAMB_BAIS_POROS=',NPN,NP
        CALL STOPAR
      ENDIF
900  RETURN
      END

```

```

C
*****
*****

```

SUBROUTINE CH_CAL_PREESCRITURA

```

*****
**      CHEQUEOS Y CALCULOS PREVIOS A LA ESCRITURA      **
*****
      INCLUDE 'COM.INC'

```

```

C
      SWM=0.
      SAM=0.
      SWP=0.
      SAP=0.
      VHUE=0.
      DELME=0.

```

```

C
C      CHEQUEOS NUEVOS CONTACTOS TODAS LAS BOLAS
C

```

```

      DO NB=1,NTB
      CALL CH_NUE_CON(NB)
      ENDDO

```

```

C
C      CALCULO DE LA ENERGIA CINETICA TOTAL EN ECIN
C

```

```

      CALL ECIN

```

```

C
C      CONTROL MENISCOS HUERFANOS
C      CHEQUEO DE SI HAY AGOTAMIENTO EN ALGUN MENISCO
C

```

```

      NMTOT=NTM+INMEL

```

```

C
      IF(ICASO.NE.2)THEN
      DO NM=1,NMTOT
        IF(V(NM).GT.0.)THEN
          CALL VOLMEN(NM)
          IF(R1(NM).LE.0.)CALL ROT_CONT(NM)
        ENDIF
      ENDIF

```

```

ENDDO
ELSE
DO NM=1,NMTOT
  IF(V(NM).GT.0.)THEN
    CALL CH_BOLA_BOLA(MN(NM,1),MN(NM,2),D)
    IF(D.GT.0.)CALL ROT_CONT(NM)
  ENDIF
ENDDO
ENDIF

```

C

```

DO NM=1,NMTOT
IF(V(NM).NE.0.)THEN
  SWM=SWM+V(NM)
  SAM=SAM+ADMM(NM)
  IF(ADMM(NM).LT.0.)THEN
    WRITE(6,*)' ATENC.CH_CAL_PREESC.:NM,ADMM<0',NM,ADMM(NM)
  ENDIF
  IF(V(NM).GT.0.)THEN
    CALL CH_HUERFA(1,NM)
  ELSE
    WRITE(6,*)' ATENC.CH_CAL_PREESCRITURA: V.MEN<0',NM,V(NM)
  ENDIF
ENDIF
ENDDO

```

C
C
C

```

CONTROL SUMA AREA POLIGONAL POROS = AREA POLIGONAL CONTORNO

SPOLI=0.
NPTOT=NTP+INPEL
DO NP=1,NPTOT
  IF(IPOR(NP).NE.0)THEN
    CALL RECAL_PORO(NP,AREA,APOLI)
    CALL RECAL_AIS(NP,IPOR(NP),AREA)
    SPOLI=SPOLI+APOLI
    SWP=SWP+WPM(NP)
    SAP=SAP+APM(NP)
    IF((APM(NP).LT.0.).OR.(WPM(NP).LT.0.))THEN
      WRITE(6,*)' ATENC.CH_CAL_P:NP,APM,WPM=',NP,APM(NP),WPM(NP)
    ENDIF
    VHUE=VHUE+VMAX(NP)
    DELME=DELME+DELFI(NP)
  ENDIF
ENDDO

```

C

```

ASUM=0.
J=LICOB(2)
XBU=XB(J)+XBI(J)
YBU=YB(J)+YBI(J)
X1=XBU
Y1=YBU
DO I=3,LICOB(1)+1
  J=LICOB(I)
  XX=XB(J)+XBI(J)
  YY=YB(J)+YBI(J)
  ASUM=ASUM+XBU*YY-YBU*XX
  XBU=XX
  YBU=YY
ENDDO
ASUM=ASUM+XBU*Y1-YBU*X1
ASUM=ASUM/2.

```

```

C      ATOL=PI*TR(1)*TR(1)/100.
      IF(ABS(ASUM-SPOLI).GT.ATOL)THEN
        WRITE(6,*)' AREAS POROS # AREA CONTORNO. ME PARO'
        WRITE(6,*)SPOLI,ASUM
        CALL STOPAR
      ENDIF

C      CALCULO DE N , Sr , W3
C
C      ATOT=ASUM
      VTOT=ATOT*ESPZ
      DELME=DELME/FLOAT(NTP)
      VWFIL=SABOL*DELME

C      ENEPO=VHUE/VTOT
      IF(ICASO.EQ.2)THEN
        GSATU=1.
      ELSE
        GSATU=(SWM+VWFIL)/VHUE
      ENDIF
      WHUME=ENEPO*GSATU/(DEN*(1.-ENEPO))

C      RETURN
      END

C
*****
*****
      SUBROUTINE CH_CONT_CORR(NP,NB,IRESP,IPOS,ILIS,LIS)
*****
*****
**      CONTROLA SI EL NUEVO CONTACTO QUE SE PRETENDE CREAR ENTRE      **
**      LAS BOLAS (NB) Y (POSICION IPOS DE LIS), ES:                    **
**              INTERIOR, IRESP=1                                       **
**              O EXTERIOR, IRESP=0, AL PORO NP.                         **
*****
      INCLUDE 'COM.INC'

C      DIMENSION LIS(KPDIM,3),NPOS(3)

C      NB2=LIS(IPOS,1)
      IF(NB2.EQ.NB)THEN
        IRESP=0
        GO TO 900
      ENDIF
      IF(IMB(NB).LE.1)THEN
        IF(MB(NB,1).NE.-1)THEN
          IRESP=1
          GO TO 900
        ENDIF
      IF(IMB(NB).EQ.0)THEN
        IRESP=1
        GO TO 900
      ENDIF
      ENDIF
      IF(IMB(NB2).LE.1)THEN
        IF(MB(NB2,1).NE.-1)THEN
          IRESP=1
          GO TO 900
        ENDIF
      ENDIF

```

```

        ENDIF
        IF(IMB(NB2).EQ.0)THEN
            IRESP=1
            GO TO 900
        ENDIF
    ENDIF

```

C

```

        INPOS=0
        DO I=1,ILIS
            IF(LIS(I,1).EQ.NB)THEN
                INPOS=INPOS+1
                NPOS(INPOS)=I
            ENDIF
        ENDDO
        IF((INPOS.GT.3).OR.(INPOS.EQ.0))THEN
            WRITE(6,*)' ERROR: INPOS,NPOS ',INPOS,NPOS
            GO TO 800
        ENDIF
        IF(INPOS.EQ.2)GO TO 150
        IF(INPOS.EQ.3)GO TO 175
    
```

C

```

        LNB1=NPOS(1)
        LNB2=NPOS(1)
        GO TO 200
    
```

C

```

150    LDIF=NPOS(2)-NPOS(1)
        LRES=ILIS-LDIF
        IF(LDIF.LT.LRES)THEN
            LNB1=NPOS(1)
            LNB2=NPOS(2)
        ELSE
            LNB1=NPOS(2)
            LNB2=NPOS(1)
        ENDIF
        GO TO 200
    
```

C

```

175    LDIF1=NPOS(2)-NPOS(1)
        LDIF2=NPOS(3)-NPOS(2)
        LRES=ILIS-LDIF1-LDIF2
        IF((LRES.GT.LDIF1).AND.(LRES.GT.LDIF2))THEN
            LNB1=NPOS(1)
            LNB2=NPOS(3)
            GO TO 200
        ENDIF
        IF((LDIF1.GT.LDIF2).AND.(LDIF1.GT.LRES))THEN
            LNB1=NPOS(2)
            LNB2=NPOS(1)
            GO TO 200
        ENDIF
        IF((LDIF2.GT.LDIF1).AND.(LRES.LE.LDIF2))THEN
            LNB1=NPOS(3)
            LNB2=NPOS(2)
            GO TO 200
        ENDIF
        WRITE(6,*)' DECISION INCIERTA:'
        WRITE(6,*)' SUBR.CH CONT CORR: NP,NB,NB2, LIS'
        WRITE(6,*)' ',NP,NB,NB2,' ',(LIS(I,1),I=1,ILIS)
        CALL STOPAR
    
```

C

```

200    LNBA=LNB1-1
    
```



```

IF(LNBA.EQ.0)LNBA=ILIS
NBA=LIS(LNBA,1)
LNBD=LNBA+1
IF(LNBD.GT.ILIS)LNBD=1
NBD=LIS(LNBD,1)
IF(NBA.EQ.NBD)THEN
WRITE(6,*)'ATENCION CH CONT CORR:COINCIDEN NBA,NBD',NBA,NBD
WRITE(6,*)'      NB,NB2,NB,NB2,'  ACEPTADO.SE CONTINUA'
IRESP=1
GO TO 900
ENDIF
805 IF((NBA.EQ.NB).OR.(NBD.EQ.NB))THEN
WRITE(6,*)'  COINCIDEN: NBA,NBD',NBA,NBD
GO TO 800
ENDIF
IF((NB2.EQ.NBA).OR.(NB2.EQ.NBD))THEN
IRESP=1
GO TO 900
ENDIF
C
CALL ACIM12(XB(NB),YB(NB),XB(NBD)+XBI(NBD),YB(NBD)+YBI(NBD),TT)
CALL ACIM12(XB(NB),YB(NB),XB(NBA)+XBI(NBA),YB(NBA)+YBI(NBA),T9)
TT=TT-T9
IF(TT.LT.0.)TT=TT+2.*PI
CALL ACIM12(XB(NB),YB(NB),XB(NB2)+XBI(NB2),YB(NB2)+YBI(NB2),TG)
TG=TG-T9
IF(TG.LT.0.)TG=TG+2.*PI
C
IF(TG.GT.TT)THEN
IRESP=1          !CORRECTO
ELSE
IRESP=0
ENDIF
C
900 CONTINUE
C
RETURN
END
C
*****
*****
SUBROUTINE STOPAR
*****
** EN CASO DE DETECCION DE ERROR HACE LAS OPERACIONES ADECUADAS **
** PARA CONCLUIR EN CONDICIONES DE POSIBLE DEBUG POSTERIOR **
** INTERRUPCION CONTROLADA **
*****
INCLUDE 'COM.INC'
C
WRITE(6,*)' FINAL ANOMALO. ESC.RES_NUEVO. TIME,IHER',TIME,IHER
C
OPEN(UNIT=3,FILE='BAL9VAR.RES',STATUS='NEW')
CLOSE (3)
C
CALL ESCRES
STOP
900 RETURN
END

```

C

SUBROUTINE ECIN

** CALCULA LA ENERGIA CINETICA TOTAL **

 INCLUDE 'COM.INC'

C
 ECINL=0.
 ECINT=0.

C
 DO NB=1,NTB
 RB=TR(JT(NB))
 BMASA=PI*RB*RB*RB*DEN/0.75
 HI=0.4*BMASA*RB*RB
 ECINL=ECINL+BMASA*(XBV(NB)*XBV(NB)+YBV(NB)*YBV(NB))
 ECINT=ECINT+HI*TBV(NB)*TBV(NB)
 ENDDO

C
 ECINL=ECINL/(2.*9.8E+05)
 ECINT=ECINT/(2.*9.8E+05)

C
 RETURN
 END

PROGRAMA HERCU

Módulo de cálculo de fuerzas y movimientos

Módulo

```

*****
*****
**
**
**          PROGRAMA  HERCU.FOR
**
** SEGMENTO DE PROGRAMA QUE CALCULA LAS FUERZAS Y LOS DESPLAZAMIENTOS
**          DE LAS BOLAS (MODULO MECANICO)
**
*****
*****

```

SUBROUTINE HERCU

```

*****
*          SUBROUTINA PRINCIPAL DEL SEGMENTO
*****

```

INCLUDE 'COM.INC'

```

C
*****
* SECCION DE CALCULO DE LAS FUERZAS DEBIDAS AL AGUA (PRESION DE AGUA
* Y TENSION SUPERFICIAL), PARA TODOS LOS MENISCOS
*****

```

```

C
      NB=IFIX(RAN(IRAN)*NTB)
      IZDE=2*IFIX(2.*RAN(IRAN))-1

```

```

C
      DO 200 NYB=1,NTB
      NB=NB+IZDE
      IF(NB.GT.NTB)NB=1
      IF(NB.LT.1)NB=NTB

```

```

C
      IF(NB.EQ.IFIJ)THEN
      XBV(IFIJ)=0.
      YBV(IFIJ)=0.
      TBV(IFIJ)=0.
      GO TO 200

```

ENDIF

```

C
      FM=0.
      FX=0.
      FY=0.
      CALL FZ 1PESO(NB,BMASA,FXI,FYI)
      FX=FX+FXI
      FY=FY+FYI

```

```

C
      INM=0
      IF(MB(NB,1).EQ.-1)THEN
      INM=1
      CALL FZ 5CONT(NB,FXI,FYI)
      FX=FX+FXI
      FY=FY+FYI
      ENDIF

```

```

C
      IF(IMB(NB).EQ.0)GO TO 150

```

```

C
      DO I=1+INM,IMB(NB)+INM
      NM=MB(NB,I)
      CALL FZ 4SOLAPE(NB,NM,FXI,FYI,FMI)
      FX=FX+FXI

```

```
FY=FY+FYI
FM=FM+FMI
ENDDO
```

```
C
C 150 CALL EMOTION(NB, BMASA, FX, FY, FM)
C
C 200 CONTINUE
C
C CALL INCR_CCM
C
C RETURN
C END
```

```
*****
*****
```

```
SUBROUTINE FZ_5CONT(NB, FXI, FYI)
```

```
*****
* SUBROUTINA DE CALCULO DE LA FUERZA SOBRE LA BOLA NB POR Sij EN EL *
* CONTORNO *
*****
```

```
INCLUDE 'COM.INC'
```

```
C
DO I=2, LICOB(1)+1
IF(NB.EQ.LICOB(I))GO TO 200
ENDDO
WRITE(6,*)' ERROR: NO ENCONTRADA EN CONTORNO BOLA', NB
CALL STOPAR
200 IF(I.EQ.2)THEN
NBA=LICOB(LICOB(1)+1)
NBD=LICOB(3)
GO TO 300
ENDIF
IF(I.EQ.(LICOB(1)+1))THEN
NBA=LICOB(LICOB(1))
NBD=LICOB(2)
GO TO 300
ENDIF
NBA=LICOB(I-1)
NBD=LICOB(I+1)
300 FXI=0.
FYI=0.
I=NBA
J=NB
IF(ICASO.EQ.2)THEN
P0=PWCOP
ELSE
P0=PGCOP
ENDIF
400 XINC=XB(J)+XBI(J)-XB(I)-XBI(I)
YINC=YB(J)+YBI(J)-YB(I)-YBI(I)
DTOT=SQRT(XINC*XINC+YINC*YINC)
DNET=DTOT-TR(JT(I))-TR(JT(J))
DPON=(TR(JT(NB))+DNET/2.)/DTOT
FSX=ESPZ*((SIG11-P0)*(-YINC)+SIG12*XINC)
FSY=ESPZ*(SIG21*(-YINC)+(SIG22-P0)*XINC)
FXI=FXI+FSX*DPON
FYI=FYI+FSY*DPON
```

```

IF(J.EQ.NB)THEN
  I=NB
  J=NBD
  GO TO 400
ENDIF

```

```

RETURN
END

```

```

*****
*****

```

```

SUBROUTINE EMOTION(NB,BMASA,FX,FY,FM)

```

```

*****
*   SUBROUTINA DE CALCULO DE LA RESULTANTE, DE LA ACELERACION, DE LA   *
*   VELOCIDAD Y DEL DESPLAZAMIENTO DE LA BOLA NB                       *
*****

```

```

INCLUDE 'COM.INC'

```

```

DIMENSION MBZ(MBDIM)

```

```

AX=((FX-CAMO*XBV(NB))/BMASA)*9.8E+05
AY=((FY-CAMO*YBV(NB))/BMASA)*9.8E+05
HI=0.4*BMASA*TR(JT(NB))*TR(JT(NB))
AT=((FM-TAMO*TBV(NB))/HI)*9.8E+05

```

```

*****
*   INCREMENTOS DE LAS VELOCIDADES Y CONTROL DE LAS MISMAS           *
*****

```

```

XBVFT=XBV(NB)+AX*TINC
YBVFT=YBV(NB)+AY*TINC
TBVFT=TBV(NB)+AT*TINC

```

```

XESC=XBV(NB)*XBVFT+YBV(NB)*YBVFT
IF(XESC.GE.0.)GO TO 98

```

```

XBVM=SQRT(XBV(NB)*XBV(NB)+YBV(NB)*YBV(NB))
XBVFM=SQRT(XBVFT*XBVFT+YBVFT*YBVFT)
IF(XBVFM.GT.(0.5*XBVM))THEN
  XRAT=0.5*XBVM/XBVFM
  XBVFT=XBVFT*XRAT
  YBVFT=YBVFT*XRAT
ENDIF

```

```

98  XESC=TBV(NB)*TBVFT
    IF(XESC.GE.0.)GO TO 198
    XRAT=ABS(0.5*TBV(NB)/TBVFT)
    IF(XRAT.LT.1.)TBVFT=TBVFT*XRAT

```

```

198 IF((ABS(XBVFT).LE.1000.).AND.(ABS(YBVFT).LE.1000.))GO TO 298
    XRAT=1000./ABS(XBVFT)
    YRAT=1000./ABS(YBVFT)
    IF(YRAT.LT.XRAT)XRAT=YRAT
    XBVFT=XBVFT*XRAT
    YBVFT=YBVFT*XRAT

```

```

298 IF(ABS(TBVFT).GT.34907.)TBVFT=34907.*TBVFT/ABS(TBVFT)

```

```

C      XBV(NB)=XBVFT
      YBV(NB)=YBVFT
      TBV(NB)=TBVFT

C
*****
*                                DESPLAZAMIENTOS                                *
*****

C      XBI(NB)=XBI(NB)+XBV(NB)*TINC
      YBI(NB)=YBI(NB)+YBV(NB)*TINC
      TBI(NB)=TBI(NB)+TBV(NB)*TINC

C
*****
*      CHEQUEO DE POSIBLES VARIACIONES DE CONEXION POR MOVIMIENTOS      *
*****

C      IF(ICASO.NE.2)THEN
      IF((ABS(XBI(NB)).GE.XUMB).OR.(ABS(YBI(NB)).GE.XUMB))THEN

C          IF(IMB(NB).EQ.0)GO TO 700

C          IMBZ=IMB(NB)
          DO I=1,IMBZ+1
              MBZ(I)=MB(NB,I)
          ENDDO

C          DO I=1,IMBZ+1
              NM=MBZ(I)
              IF(NM.GT.0)THEN
                  CALL VOLMEN(NM)
                  IF(R1(NM).LE.0.)THEN
                      CALL ROT_CONT(NM)
                  ENDIF
              ENDIF
          ENDDO

C          CALL CH_NUE_CON(NB)
      ELSE
          DO I=1,IKLIS(NB)
              CALL CH_BOLA_BOLA(NB,KLIS(NB,I),D)
              IF(D.LE.0.)THEN
                  CALL CH_NUE_CON(NB)
                  GO TO 200
              ENDIF
          ENDDO
      ENDIF

C      200 CONTINUE

C      ELSE

C      IF((ABS(XBI(NB)).GE.XUMB).OR.(ABS(YBI(NB)).GE.XUMB))THEN
          CALL CH_NUE_CON(NB)
      ELS
          DO I=1,IKLIS(NB)
              CALL CH_BOLA_BOLA(NB,KLIS(NB,I),D)
              IF(D.LE.0.)THEN
                  CALL CH_NUE_CON(NB)
                  GO TO 250
              ENDIF
          ENDDO
      ENDIF

```

```

                ENDIF
            ENDDO
        ENDIF
C
250   IF(IMB(NB).EQ.0)GO TO 900
C
        IMBZ=IMB(NB)
        DO I=1,IMBZ+1
        MBZ(I)=MB(NB,I)
        ENDDO
C
        DO I=1,IMBZ+1
        NM=MBZ(I)
        IF(NM.GT.0)THEN
            IF(MN(NM,1).EQ.NB)THEN
                NB1=MN(NM,2)
            ELSE
                NB1=MN(NM,1)
            ENDIF
C
            CALL CH_BOLA_BOLA(NB,NB1,D)
            IF(D.GT.0.)THEN
                CALL ROT_CONT(NM)
            ENDIF
        ENDIF
        ENDDO
    ENDIF
C
900   RETURN
        END

```

```

*****
*****

```

SUBROUTINE FZ_1PESO(NB,BMASA,FXI,FYI)

```

*****
* SUBROUTINA DE CALCULO DE LA FUERZA DEBIDA A PESO PROPIO DE LA BOLA NB *
*****

```

INCLUDE 'COM.INC'

```

C
        RB=TR(JT(NB))
        BMASA=4.*PI*RB*RB*RB*DEN/3.
C
        IF(ICASO.EQ.2)THEN
            BMASA2=BMASA*(DEN-1.)/DEN
        ELSE
            BMASA2=BMASA
        ENDIF
C
        FXI=BMASA2*GX/9.8E+05
        FYI=BMASA2*GY/9.8E+05
C
        RETURN
        END

```

```

*****
*****

```


SUBROUTINE FZ_4SOLAPE(NB,NM,FXI,FYI,FMI)

 * SUBROUTINA DE CALCULO DE LA FUERZA NORMAL Y TANGENCIAL SOBRE LA BOLA *
 * NB POR EL CONTACTO NM, DEBIDAS A SOLAPE *

INCLUDE 'COM.INC'

C IF(MN(NM,1).EQ.NB)THEN
 NBI=MN(NM,2)
 ELSE
 NBI=MN(NM,1)
 ENDIF

C XINC=XB(NBI)+XBI(NBI)-XB(NB)-XBI(NB)
 YINC=YB(NBI)+YBI(NBI)-YB(NB)-YBI(NB)
 RB0=TR(JT(NB))
 RB1=TR(JT(NBI))
 D=SQRT(XINC*XINC+YINC*YINC)
 SOLAP=-(D-RB0-RB1)

C XE=XINC/D
 YE=YINC/D
 XT=YE
 YT=-XE

C XRV=XBV(NB)-XBV(NBI)-(TBV(NB)*RB0+TBV(NBI)*RB1)*XT
 YRV=YBV(NB)-YBV(NBI)-(TBV(NB)*RB0+TBV(NBI)*RB1)*YT

C ENEPU=XRV*XE+YRV*YE
 ESEPU=XRV*XT+YRV*YT
 IF(IAT.EQ.1)THEN
 IF(ABS(ENEPU).GT.100.)THEN
 WRITE(6,*)' ATENC:NPU,SPU,NB,NM,TIME:',ENEPU,ESEPU,NB,NM,TIME
 ENDIF
 ENDIF

C IF(SOLAP.LE.0.)THEN
 DELNMAX(NM)=0.
 DELTAS(NM)=0.
 FNSOL(NM)=0.
 FTSOL=0.
 GO TO 200
 ENDIF

C IF(IAT.EQ.1)THEN
 IF((SOLAP.GT.(0.1*RB0)).OR.(SOLAP.GT.(0.1*RB1)))THEN
 WRITE(6,*)' ATENCION: SOLAP(NM) > 10% RB0 O RB1 ; TIME'
 WRITE(6,*)' ',SOLAP,NM,RB0,RB1,TIME
 ENDIF
 ENDIF

C *****
 * CALCULO DE LA FUERZA NORMAL *

C IF(SOLAP.GE.DELNMAX(NM))THEN
 FNSOL(NM)=SOLKN*SOLAP
 DELNMAX(NM)=SOLAP

```

ELSE
  FNSOL(NM)=SOLKN*DELNMAX(NM)-SOLKD*(DELNMAX(NM)-SOLAP)
  IF(FNSOL(NM).LT.0.)FNSOL(NM)=0.
ENDIF

```

```

C
*****
*          CALCULO DE LA FUERZA TANGENCIAL          *
*****

```

```

C
  SINC=ESEPU*TINC
  FTMAX=FNSOL(NM)*SOLMU
  DELTAS(NM)=DELTAS(NM)+SINC
  FTSOL=DELTAS(NM)*SOLKS

```

```

C
  IF(ABS(FTSOL).GT.FTMAX)THEN
    FTSOL=FTMAX*FTSOL/ABS(FTSOL)
    DELTAS(NM)=FTSOL/SOLKS
  ENDIF

```

```

C
*****
*          CALCULO DE LAS FUERZAS AMORTIGUADORAS    *
*****

```

```

C
  200  FNAMO=SOLNN*ENEPU
      FTAMO=SOLNS*ESEPU

```

```

C
*****
*          SUMA DE LAS FUERZAS NORMALES Y TANGENCIALES  *
*****

```

```

C
  CALL FZ_23AGUA(NM)

```

```

C
  IF(ICASO.EQ.2)THEN
    IF(V(NM).EQ.2.)THEN
      IF(SOLAP.LT.0.)THEN
        FNSOL(NM)=SOLKN*SOLAP
        IF(FNAMO.GT.0.)THEN
          FNAMO=0.
        ELSE
          FNAMO=10.*FNAMO
        ENDIF
      ELSE
        V(NM)=3.
      ENDIF
    ENDIF
  ENDIF

```

```

C
  FN(NM)=FNW(NM)+FNSOL(NM)+FNAMO
  FT(NM)=FTSOL+FTAMO

```

```

C
  FXI=-FN(NM)*XE-FT(NM)*XT
  FYI=-FN(NM)*YE-FT(NM)*YT
  FMI=FT(NM)*RBO

```

```

C
  RETURN
END

```

```

*****
*****

```

SUBROUTINE FZ_23AGUA(NM)

 * SUBROUTINA DE CALCULO DE LA FUERZA NORMAL EN EL CONTACTO NM DEBIDA AL *
 * AGUA *

INCLUDE 'COM.INC'

IF(ICASO.EQ.2)GO TO 400

A1=PI*R1(NM)*R1(NM)

IF(Y8(NM).EQ.0.)THEN

A8=0.

ELSE

A8=PI*Y8(NM)*Y8(NM)

NP1=MN(NM,3)

NP2=MN(NM,4)

IF(NP2.NE.-1)THEN

PM=(APP(NP1)+WPP(NP1)+APP(NP2)+WPP(NP2))/2.

ELSE

PM=APP(NP1)+WPP(NP1)

ENDIF

ENDIF

FNW(NM)=PWPA(NM)*(A1-A8)-PM*A8

FNW(NM)=FNW(NM)-SIGMA*2.*PI*R1(NM)

GO TO 900

400 CONTINUE
 FNW(NM)=0.
 GO TO 900

410 CONTINUE

 * CASO INUNDADO *

NB1=MN(NM,1)

NB2=MN(NM,2)

RB1=TR(JT(NB1))

RB2=TR(JT(NB2))

CALL CH_BOLA_BOLA(NB1,NB2,D)

IF(D.GT.0.)THEN

FNW(NM)=0.

GO TO 900

ENDIF

GA=RB2/RB1

AL=D/RB2

X2=1.+GA+GA*AL

X8=(X2*X2+1.-GA*GA)/(2.*X2)

YOCHO=SQRT(1.-X8*X8)

YOCHO=YOCHO*RB1

A8=PI*YOCHO*YOCHO

FNW(NM)=-A8*PWCOM

900 RETURN
 END

SUBROUTINE INCR_CCM

* SUBROUTINA DE INCREMENTO DE LAS CONDICIONES DE CONTORNO (TENSIONES DE *
* CONTORNO Y GRAVEDAD *

INCLUDE 'COM.INC'

C
SIG11=SIG11+VSIG11*TINC
SIG12=SIG12+VSIG12*TINC
SIG21=SIG21+VSIG21*TINC
SIG22=SIG22+VSIG22*TINC

C
GX=GX+VGX*TINC
GY=GY+VGY*TINC

C
RETURN
END

SUBROUTINE INCR_CCF

* SUBROUTINA DE INCREMENTO DE LAS CONDICIONES DE CONTORNO (PRESIONES *
* IMPUESTAS EN LOS MENISCOS Y EN LOS POROS DEL CONTORNO) *

INCLUDE 'COM.INC'

C
PWCOM=PWCOM+VPWCOM*TINC
PGCOP=PGCOP+VPGCOP*TINC

C
RETURN
END

C

PROGRAMA LECES

Módulo de lectura y escritura de datos


```

C      STOP
255  CONTINUE
      CLOSE (1)
C
*****
*   LECTURA DE LAS VARIABLES INICIALES O PROCEDENTES DE OTRO ENSAYO   *
*   (ARCHIVO BAL9VAR.DAT)                                             *
*****
C
      GO TO 98
11  WRITE(6,*)'  ERROR EN FILE BAL9VAR.DAT'
      STOP
98  OPEN(UNIT=2,FILE='BAL9VAR.DAT',STATUS='OLD',ERR=11)
C
      RAD=PI/180.
      ICON=1
C
      CALL LECTCONT(ICON,2)
      READ(2,*)TINCF,TINCM,IRATIO
      CALL LECTCONT(ICON,2)
      READ(2,*)TINI,TIME,TFIN
      CALL LECTCONT(ICON,2)
      READ(2,*)TFAC,ICASO,IWRITE,ICICLE
      CALL LECTCONT(ICON,2)
      READ(2,*)NTB,NTM,NTP,NTTIP,NBAIS
      CALL LECTCONT(ICON,2)
      READ(2,*)XUMB,INPEL,INMEL
      CALL LECTCONT(ICON,2)
      READ(2,*)ESPZ,ATOT,VTOT,VHUE,VBOLAS
      CALL LECTCONT(ICON,2)
      READ(2,*)ENEPO,GSATU,WHUME,SABOL,VWFIL
C
      NMTOT=NTM+INMEL
      NPTOT=NTP+INPEL
C
      CALL LECTCONT(ICON,2)
      READ(2,*)GX,GY,VGX,VGY
      CALL LECTCONT(ICON,2)
      READ(2,*)PGCOP,PWCOM,VPGCOP,VPWCOM
      CALL LECTCONT(ICON,2)
      READ(2,*)SIG11,SIG22,SIG12,SIG21
      CALL LECTCONT(ICON,2)
      READ(2,*)VSIG11,VSIG22,VSIG12,VSIG21
C
      CALL LECTCONT(ICON,2)
      READ(2,*)(XB(I),I=1,NTB)
      CALL LECTCONT(ICON,2)
      READ(2,*)(YB(I),I=1,NTB)
      CALL LECTCONT(ICON,2)
      READ(2,*)(TB(J),J=1,NTB)
      DO 10 NB=1,NTB
      TB(NB)=TB(NB)*RAD
10  CONTINUE
      CALL LECTCONT(ICON,2)
      READ(2,*)(JT(I),I=1,NTB)
      CALL LECTCONT(ICON,2)
      READ(2,*)(XBV(I),I=1,NTB)
      CALL LECTCONT(ICON,2)
      READ(2,*)(YBV(I),I=1,NTB)

```

```

CALL LECTCONT(ICON,2)
READ(2,*)(TBV(J),J=1,NTB)
DO 20 NB=1,NTB
TBV(NB)=TBV(NB)*RAD
20 CONTINUE
CALL LECTCONT(ICON,2)
READ(2,*)ECINL,ECINT
CALL LECTCONT(ICON,2)
READ(2,*)(IMB(I),I=1,NTB)
CALL LECTCONT(ICON,2)
DO 30 NB=1,NTB
  I=1
  IF(IMB(NB).EQ.0)I=2
READ(2,*)(MB(NB,J),J=1,IMB(NB)+I)
30 CONTINUE
CALL LECTCONT(ICON,2)
READ(2,*)(TR(I),I=1,NTTIP)

```

C

```

CALL LECTCONT(ICON,2)
READ(2,*)(XM(I),I=1,NMTOT)
CALL LECTCONT(ICON,2)
READ(2,*)(YM(I),I=1,NMTOT)
CALL LECTCONT(ICON,2)
DO 60 NM=1,NMTOT
READ(2,*)(MN(NM,J),J=1,4)
60 CONTINUE
CALL LECTCONT(ICON,2)
READ(2,*)(V(I),I=1,NMTOT)
CALL LECTCONT(ICON,2)
READ(2,*)(TETA(J),J=1,NMTOT)
DO 65 J=1,NMTOT
  TETA(J)=TETA(J)*RAD
65 CONTINUE
CALL LECTCONT(ICON,2)
READ(2,*)(ADMM(I),I=1,NMTOT)
CALL LECTCONT(ICON,2)
READ(2,*)(PWPA(I),I=1,NMTOT)
CALL LECTCONT(ICON,2)
READ(2,*)(FN(I),I=1,NMTOT)
CALL LECTCONT(ICON,2)
READ(2,*)(FT(I),I=1,NMTOT)

```

C

```

CALL LECTCONT(ICON,2)
READ(2,*)(FNSOL(I),I=1,NMTOT)
CALL LECTCONT(ICON,2)
READ(2,*)(FNW(I),I=1,NMTOT)
CALL LECTCONT(ICON,2)
READ(2,*)(DELNMAX(I),I=1,NMTOT)
CALL LECTCONT(ICON,2)
READ(2,*)(DELTAS(I),I=1,NMTOT)

```

C

```

CALL LECTCONT(ICON,2)
READ(2,*)(XP(I),I=1,NPTOT)
CALL LECTCONT(ICON,2)
READ(2,*)(YP(I),I=1,NPTOT)
CALL LECTCONT(ICON,2)
READ(2,*)(IPOR(I),I=1,NPTOT)
CALL LECTCONT(ICON,2)
READ(2,*)(IKPN(I),I=1,NPTOT)
CALL LECTCONT(ICON,2)

```



```

DO 70 I=1,NPTOT
  READ(2,*)(KPN(I,J),J=1,ABS(IKPN(I)))
70 CONTINUE
  CALL LECTCONT(ICON,2)
  READ(2,*)(AMAX(I),I=1,NPTOT)
  CALL LECTCONT(ICON,2)
  READ(2,*)(VMAX(I),I=1,NPTOT)
  CALL LECTCONT(ICON,2)
  READ(2,*)(APP(I),I=1,NPTOT)
  CALL LECTCONT(ICON,2)
  READ(2,*)(WPP(I),I=1,NPTOT)

```

```

C
  CALL LECTCONT(ICON,2)
  READ(2,*)RLICOB
  CALL LECTCONT(ICON,2)
  READ(2,*)LICOB(1)
  READ(2,*)(LICOB(I),I=2,LICOB(1)+1)
  CALL LECTCONT(ICON,2)
  READ(2,*)LICOM(1)
  READ(2,*)(LICOM(I),I=2,LICOM(1)+1)
  CALL LECTCONT(ICON,2)
  READ(2,*)LICOP(1)
  READ(2,*)(LICOP(I),I=2,LICOP(1)+1)

```

```

C
  CALL LECTCONT(ICON,2)
  READ(2,*)RIAAI,RINAI,RIAWI,RINWI
  CALL LECTCONT(ICON,2)
  READ(2,*)RIAWF,RINWF,RIAAF,RIAFD
  CALL LECTCONT(ICON,2)
  READ(2,*)RIAAFE,RINAFE,RIAAC,RINAC
  CALL LECTCONT(ICON,2)
  READ(2,*)RIAWCD,RINWCD,RIAWCE,RINWCE
  CALL LECTCONT(ICON,2)
  READ(2,*)SWM0,SWP0,SAP0,SAM0
  CALL LECTCONT(ICON,2)
  READ(2,*)SWM,SWP,SAP,SAM
  CALL LECTCONT(ICON,2)

```

```

C
  READ(2,*)(LIAIS(I),I=1,NBAIS+1)
  CALL LECTCONT(ICON,2)
  READ(2,*)(NPEL(I),I=1,INPEL+1)
  CALL LECTCONT(ICON,2)
  READ(2,*)(NMEL(I),I=1,INMEL+1)

```

```

C
  CALL LECTCONT(ICON,2)
  READ(2,*)IULT0

```

```

C
  CALL LECTCONT(ICON,2)
  CLOSE (2)

```

```

C
  RETURN
  END

```

```

*****
*****

```

SUBROUTINE LECTCONT(JCON,NUN)

```

*****
* SUBROUTINA DE CONTROL DE LECTURA DEL MODULO JCON DENTRO DEL ARCHIVO *

```

*

INCLUDE 'PREC.INC'

C

```

READ(NUN,*)LCON
IF(LCON.NE.JCON)THEN
  WRITE(6,*)' ERROR LECT UNIDAD ',NUN,' MODULO ',JCON-1
ENDIF
JCON=JCON+1
RETURN
END
  
```

SUBROUTINE ESCRES

* SUBROUTINA DE ESCRITURA DE VARIABLES ACTUALIZADAS *

INCLUDE 'COM.INC'

C

```

GO TO 99
4 WRITE(6,*)' ERROR AL INTENTAR ESCRIBIR EN BAL9VAR.RES'
STOP
99 OPEN(UNIT=3,FILE='BAL9VAR.RES',STATUS='UNKNOWN',ERR=4)
  
```

C

```

RAD=PI/180.
ICON=1
  
```

C

```

CALL ESCCONT(ICON,3,' TINCF,TINCM,IRATIO')
WRITE(3,*)TINCF,TINCM,IRATIO
CALL ESCCONT(ICON,3,' TINI,TIME,TFIN')
WRITE(3,*)TINI,TIME,TFIN
CALL ESCCONT(ICON,3,' TFAC,ICASO,IWRITE,ICICLE')
WRITE(3,*)TFAC,ICASO,IWRITE,ICICLE
CALL ESCCONT(ICON,3,' NTB,NTM,NTP,NTTIP,NBAIS')
WRITE(3,*)NTB,NTM,NTP,NTTIP,NBAIS
CALL ESCCONT(ICON,3,' XUMB,INPEL,INMEL')
WRITE(3,*)XUMB,INPEL,INMEL
  
```

C

```

CALL ESCCONT(ICON,3,' ESPZ,ATOT,VTOT,VHUE,VBOLAS')
WRITE(3,*)ESPZ,ATOT,VTOT,VHUE,VBOLAS
CALL ESCCONT(ICON,3,' ENEPO,GSATU,WHUME,SABOL,VWFIL')
WRITE(3,*)ENEPO,GSATU,WHUME,SABOL,VWFIL
  
```

C

```

NMTOT=NTM+INMEL
NPTOT=NTP+INPEL
  
```

C

```

CALL ESCCONT(ICON,3,' GX,GY,VGX,VGY')
WRITE(3,*)GX,GY,VGX,VGY
CALL ESCCONT(ICON,3,' PGCOP,PWCOM,VPGCOP,VPWCOM')
WRITE(3,*)PGCOP,PWCOM,VPGCOP,VPWCOM
CALL ESCCONT(ICON,3,' SIG11,22,12,21')
WRITE(3,*)SIG11,SIG22,SIG12,SIG21
CALL ESCCONT(ICON,3,' VSIG11,22,12,21')
WRITE(3,*)VSIG11,VSIG22,VSIG12,VSIG21
  
```

C

 * ESCRITURA DE LAS COORDENADAS DE LAS BOLAS INCREMENTADAS *

C

```

CALL ESCCONT(ICON,3,' BOLAS  XB')
WRITE(3,*)(XB(I)+XBI(I),I=1,NTB)
CALL ESCCONT(ICON,3,' YB')
WRITE(3,*)(YB(I)+YBI(I),I=1,NTB)
CALL ESCCONT(ICON,3,' TB(DEG.)')
WRITE(3,*)((TB(I)+TBI(I))/RAD,I=1,NTB)
CALL ESCCONT(ICON,3,' JT')
WRITE(3,*)(JT(I),I=1,NTB)
CALL ESCCONT(ICON,3,' XBV')
WRITE(3,*)(XBV(I),I=1,NTB)
CALL ESCCONT(ICON,3,' YBV')
WRITE(3,*)(YBV(I),I=1,NTB)
CALL ESCCONT(ICON,3,' TBV(DEG./S)')
WRITE(3,*)(TBV(J)/RAD,J=1,NTB)
CALL ESCCONT(ICON,3,' ECINL,ECINT')
WRITE(3,*)ECINL,ECINT
CALL ESCCONT(ICON,3,' IMB')
WRITE(3,*)(IMB(I),I=1,NTB)
CALL ESCCONT(ICON,3,' MB')
DO 30 NB=1,NTB
  I=1
  IF(IMB(NB).EQ.0)I=2
  WRITE(3,*)(MB(NB,J),J=1,IMB(NB)+I)
30 CONTINUE
CALL ESCCONT(ICON,3,' R...')
WRITE(3,*)(TR(I),I=1,NTTIP)

```

C

```

CALL ESCCONT(ICON,3,' MENISCOS  XM')
WRITE(3,*)(XM(I),I=1,NMTOT)
CALL ESCCONT(ICON,3,' YM')
WRITE(3,*)(YM(I),I=1,NMTOT)
CALL ESCCONT(ICON,3,' MN')
DO 60 NM=1,NMTOT
  WRITE(3,*)(MN(NM,J),J=1,4)
60 CONTINUE
CALL ESCCONT(ICON,3,' V')
WRITE(3,*)(V(I),I=1,NMTOT)
CALL ESCCONT(ICON,3,' TETA(DEG.)')
WRITE(3,*)(TETA(J)/RAD,J=1,NMTOT)
CALL ESCCONT(ICON,3,' ADMM')
WRITE(3,*)(ADMM(I),I=1,NMTOT)
CALL ESCCONT(ICON,3,' PWPA')
WRITE(3,*)(PWPA(I),I=1,NMTOT)
CALL ESCCONT(ICON,3,' FN')
WRITE(3,*)(FN(I),I=1,NMTOT)
CALL ESCCONT(ICON,3,' FT')
WRITE(3,*)(FT(I),I=1,NMTOT)

```

C

```

CALL ESCCONT(ICON,3,' FNSOL')
WRITE(3,*)(FNSOL(I),I=1,NMTOT)
CALL ESCCONT(ICON,3,' FNW')
WRITE(3,*)(FNW(I),I=1,NMTOT)
CALL ESCCONT(ICON,3,' DELNMAX')
WRITE(3,*)(DELNMAX(I),I=1,NMTOT)
CALL ESCCONT(ICON,3,' DELTAS')
WRITE(3,*)(DELTAS(I),I=1,NMTOT)

```

```

C
CALL ESCCONT(ICON,3,' POROS  XP')
WRITE(3,*)(XP(I),I=1,NPTOT)
CALL ESCCONT(ICON,3,' YP')
WRITE(3,*)(YP(I),I=1,NPTOT)
CALL ESCCONT(ICON,3,' IPOR')
WRITE(3,*)(IPOR(I),I=1,NPTOT)
CALL ESCCONT(ICON,3,' IKPN')
WRITE(3,*)(IKPN(I),I=1,NPTOT)
CALL ESCCONT(ICON,3,' KPN')
DO 70 I=1,NPTOT
  WRITE(3,*)(KPN(I,J),J=1,ABS(IKPN(I)))
70 CONTINUE
CALL ESCCONT(ICON,3,' AMAX')
WRITE(3,*)(AMAX(I),I=1,NPTOT)
CALL ESCCONT(ICON,3,' VMAX')
WRITE(3,*)(VMAX(I),I=1,NPTOT)
CALL ESCCONT(ICON,3,' APP')
WRITE(3,*)(APP(I),I=1,NPTOT)
CALL ESCCONT(ICON,3,' WPP')
WRITE(3,*)(WPP(I),I=1,NPTOT)

C
CALL ESCCONT(ICON,3,' RLICOB')
WRITE(3,*)RLICOB
CALL ESCCONT(ICON,3,' CONTORNO LICOB')
WRITE(3,*)LICOB(1)
WRITE(3,*)(LICOB(I),I=2,LICOB(1)+1)
CALL ESCCONT(ICON,3,' LICOM')
WRITE(3,*)LICOM(1)
WRITE(3,*)(LICOM(I),I=2,LICOM(1)+1)
CALL ESCCONT(ICON,3,' LICOP')
WRITE(3,*)LICOP(1)
WRITE(3,*)(LICOP(I),I=2,LICOP(1)+1)

C
CALL ESCCONT(ICON,3,' VARIABLES GRIFO')
WRITE(3,*)RIAAI,RINAI,RIAWI,RINWI
CALL ESCCONT(ICON,3,' ')
WRITE(3,*)RIAWF,RINWF,RIAADF,RINADF
CALL ESCCONT(ICON,3,' ')
WRITE(3,*)RIAAFE,RINAFE,RIAAC,RINAC
CALL ESCCONT(ICON,3,' ')
WRITE(3,*)RIAWCD,RINWCD,RIAWCE,RINWCE
CALL ESCCONT(ICON,3,' SUMA MASAS INICIALES ')
WRITE(3,*)SWM0,SWP0,SAP0,SAM0
CALL ESCCONT(ICON,3,' SUMA MASAS SWM,SWP,SAP,SAM')
WRITE(3,*)SWM,SWP,SAP,SAM

C
CALL ESCCONT(ICON,3,' LISTA B.AIS')
WRITE(3,*)(LIAIS(I),I=1,NBAIS+1)
CALL ESCCONT(ICON,3,' LISTA NP EMP')
WRITE(3,*)(NPEL(I),I=1,INPEL+1)
CALL ESCCONT(ICON,3,' LISTA NM EMP')
WRITE(3,*)(NMEL(I),I=1,INMEL+1)

C41
CALL ESCCONT(ICON,3,' IULT0')
WRITE(3,*)IULT0

C41
CALL ESCCONT(ICON,3,' ')
CLOSE (3)

```

RETURN
END

SUBROUTINE ESCCONT(JCON,NUN,A)

* SUBROUTINA DE ESCRITURA DE LOS ENTEROS DE CONTROL DE LECTURA Y DE *
* ESCRITURA *

INCLUDE 'PREC.INC'

C

CHARACTER*(*) A
WRITE(NUN,*)JCON,' @ ',A
JCON=JCON+1
RETURN
END

SUBROUTINE ESCSELECT(LESCB,LESCM,LESCP)

* SUBROUTINA DE ESCRITURA DE VARIABLES DE ESCRITURA INCREMENTAL *

INCLUDE 'COM.INC'

C

DIMENSION LESCB(10),LESCM(10),LESCP(10)

C

GO TO 10
4 WRITE(6,*)' ERROR AL INTENTAR ESCRIBIR EN BAL9SEL.RES'
STOP
10 OPEN(UNIT=4,FILE='BAL9SEL.RES',STATUS='OLD',ACCESS='APPEND',
1 ERR=4)
RAD=PI/180.
GO TO 500
510 WRITE(4,*)'
WRITE(4,*)' TIME= ',TIME,' NRO.ULTIMO CICLO= ',ICICLE
WRITE(4,*)' TINCF= ',TINCF,' TINCM= ',TINCM
WRITE(4,*)'
DO I=1,10
IF(LESCB(I).EQ.0)GO TO 100
J=LESCB(I)
WRITE(4,*)' BOLA= ',J,' X,Y,T//XV,YV,TV'
WRITE(4,*)XB(J)+XBI(J),YB(J)+YBI(J),(TB(J)+TBI(J))/RAD
WRITE(4,*)XBV(J),YBV(J),TBV(J)/RAD
ENDDO
100 DO I=1,10
IF(LESCM(I).EQ.0)GO TO 200
J=LESCM(I)
WRITE(4,*)' MENISCO= ',J,' X,Y,T/V,PWPA,ADMM/FN,T,SOL/FW,DELN,S'
WRITE(4,*)XM(J),YM(J),TETA(J)/RAD
WRITE(4,*)V(J),PWPA(J),ADMM(J)
WRITE(4,*)FN(J),FT(J),FNSOL(J)
WRITE(4,*)FNW(J),DELNMAX(J),DELTAS(J)

```

ENDDO
200 DO I=1,10
    IF(LESCP(I).EQ.0)GO TO 300
    J=LESCP(I)
    WRITE(4,*)'      PORO= ',J,' X,Y,AMAX//VHP,DELFI,APP,WPP'
    WRITE(4,*)XP(J),YP(J),AMAX(J)
    WRITE(4,*)VHP(J),DELFI(J),APP(J),WPP(J)
ENDDO

```

```

300 CONTINUE
WRITE(4,*)'      RIAAI      RINAI      RIAWI      RINWI'
WRITE(4,*)'      ',RIAAI,RINAI,RIAWI,RINWI
WRITE(4,*)'      RIAWF      RINWF      RIAAFD      RINAFD'
WRITE(4,*)'      ',RIAWF,RINWF,RIAAFD,RINAFD
WRITE(4,*)'      RIAAFE      RINAFE      RIAAC      RINAC'
WRITE(4,*)'      ',RIAAFE,RINAFE,RIAAC,RINAC
WRITE(4,*)'      RIAWCD      RINWCD      RIAWCE      RINWCE'
WRITE(4,*)'      ',RIAWCD,RINWCD,RIAWCE,RINWCE

```

```

C
WRITE(4,*)'      SWM      SWM0      SAM      SAM0'
WRITE(4,*)'      ',SWM,SWM0,SAM,SAM0
WRITE(4,*)'      SWP      SWP0      SAP      SAP0'
WRITE(4,*)'      ',SWP,SWP0,SAP,SAP0
WRITE(4,*)'      SW      SW0      SA      SA0'
WRITE(4,*)'      ',SWM+SWP,SWM0+SWP0,SAM+SAP,SAM0+SAP0

```

```

C
WRITE(4,*)'      ECINL,ECINT',ECINL,ECINT

```

```

C
500 WRITE(4,*)TIME,ICICLE,ECINL,ECINT,NTM,NTP,INMEL,INPEL,NBAIS,
    .      ENEPO,GSATU

```

```

C
XMAX=0.
XMIN=0.
YMAX=0.
YMIN=0.

```

```

C
DO I=2,LICOB(1)+1
    IF(XB(LICOB(I)).GT.XMAX)XMAX=XB(LICOB(I))
    IF(XB(LICOB(I)).LT.XMIN)XMIN=XB(LICOB(I))
    IF(YB(LICOB(I)).GT.YMAX)YMAX=YB(LICOB(I))
    IF(YB(LICOB(I)).LT.YMIN)YMIN=YB(LICOB(I))
ENDDO
XMAX=XMAX-XMIN
YMAX=YMAX-YMIN
WRITE(4,*)XMAX,YMAX

```

```

C
CLOSE(4)
RETURN
END

```

```

*****
*****

```

PROGRAMA DIBU

**Post-proceso: Dibujo de resultados
en el plano del modelo y gráficas**

```
50  RAD=PI/180.
    WRITE(6,*)' SE QUIERE INVESTIGAR ALGUNA VARIABLE(NO=0)?'
    READ(5,*)I
    IF(I.EQ.0)GO TO 400
450  WRITE(6,*)'  FIN; PASAMOS A STOP END  (-1)'
    WRITE(6,*)'  FIN; PASAMOS A DIBUJO    (0)'
    WRITE(6,*)'  VARIABLES CONSTANTES    (1)'
    WRITE(6,*)'  VALORES GENERALES (TPO...) (2)'
    WRITE(6,*)'  BOLA                     (3)'
    WRITE(6,*)'  MENISCO                  (4)'
    WRITE(6,*)'  PORO                     (5)'
    WRITE(6,*)'  CONTORNO O LISTAS        (6)'
    WRITE(6,*)'  VARIABLES GLOBALES      (7)'
    WRITE(6,*)'  SUMA DE MASAS           (8)?'
    READ(5,*)I
    IF(I.EQ.-1)GO TO 1000
    IF(I.EQ.0)GO TO 400
    IF(I.EQ.1)THEN
        WRITE(6,*)'  SIGMA= ',SIGMA
        WRITE(6,*)'  HENRY= ',HENRY
        WRITE(6,*)'  BETA= ',BETA
        WRITE(6,*)'  CVAP= ',CVAP
        WRITE(6,*)'  CFILM= ',CFILM
        WRITE(6,*)'  VISCO= ',VISCO
        WRITE(6,*)'  DEAD= ',DEAD
        WRITE(6,*)'  VISCA= ',VISCA
        WRITE(6,*)'  PI= ',PI
        WRITE(6,*)'  FPOISE= ',FPOISE
        WRITE(6,*)'  RUNIV= ',RUNIV
        WRITE(6,*)'  ABST= ',ABST
        WRITE(6,*)'  DEWP= ',DEWP
        GO TO 450
    ENDIF
    IF(I.EQ.2)THEN
        WRITE(6,*)'  TINC= ',TINC
        WRITE(6,*)'  TINI= ',TINI
        WRITE(6,*)'  TIME= ',TIME
        WRITE(6,*)'  TFIN= ',TFIN
        WRITE(6,*)'  TFAC= ',TFAC
        WRITE(6,*)'  IWRITE= ',IWRITE
        WRITE(6,*)'  ICICLE= ',ICICLE
        WRITE(6,*)'  NTB= ',NTB
        WRITE(6,*)'  NTM= ',NTM,' INMEL=' ,INMEL
        WRITE(6,*)'  NTP= ',NTP,' INPEL=' ,INPEL
        WRITE(6,*)'  NTTIP= ',NTTIP
        WRITE(6,*)'  NBAIS= ',NBAIS
        GO TO 450
    ENDIF
    IF(I.EQ.3)THEN
        WRITE(6,*)'  CUAL BOLA?'
        READ(5,*)NB
        WRITE(6,*)'  XB= ',XB(NB)
        WRITE(6,*)'  YB= ',YB(NB)
        WRITE(6,*)'  TB(DEG.)= ',TB(NB)/RAD
        WRITE(6,*)'  JT= ',JT(NB)
        WRITE(6,*)'  XBV= ',XBV(NB)
        WRITE(6,*)'  YBV= ',YBV(NB)
        WRITE(6,*)'  TBV(DEG/S)= ',TBV(NB)/RAD
        WRITE(6,*)'  IMB= ',IMB(NB)
```

```

WRITE(6,*)' MB= ',(MB(NB,J),J=1,IMB(NB)+2)
WRITE(6,*)' RADIO= ',TR(JT(NB))
GO TO 450
ENDIF
IF(I.EQ.4)THEN
WRITE(6,*)' CUAL MENISCO?'
READ(5,*)NM
WRITE(6,*)' XM= ',XM(NM)
WRITE(6,*)' YM= ',YM(NM)
WRITE(6,*)' MN= ',(MN(NM,J),J=1,4)
WRITE(6,*)' V= ',V(NM)
WRITE(6,*)' TETA( DEG)= ',TETA(NM)/RAD
WRITE(6,*)' ADMM= ',ADMM(NM)
WRITE(6,*)' PWPA= ',PWPA(NM)
WRITE(6,*)' FN= ',FN(NM)
WRITE(6,*)' FT= ',FT(NM)
GO TO 450
ENDIF
IF(I.EQ.5)THEN
WRITE(6,*)' CUAL PORO?'
READ(5,*)NP
WRITE(6,*)' XP= ',XP(NP)
WRITE(6,*)' YP= ',YP(NP)
WRITE(6,*)' IPOR= ',IPOR(NP)
WRITE(6,*)' IKPN= ',IKPN(NP)
WRITE(6,*)' KPN= ',(KPN(NP,J),J=1,ABS(IKPN(NP))) IC#
WRITE(6,*)' AMAX= ',AMAX(NP)
WRITE(6,*)' VMAX= ',VMAX(NP)
WRITE(6,*)' APP= ',APP(NP)
WRITE(6,*)' WPP= ',WPP(NP)
GO TO 450
ENDIF
IF(I.EQ.6)THEN
WRITE(6,*)' LISTA CONTORNO BOLAS (1)'
WRITE(6,*)' " " MENISCOS (2)'
WRITE(6,*)' " " POROS (3)'
WRITE(6,*)' " " NPEL (4)'
WRITE(6,*)' " " NMEL (5)'
WRITE(6,*)' " " BAIS (6)?'
READ(5,*)J
IF(J.EQ.1)THEN
WRITE(6,*)' NRO. ',LICOB(1)
WRITE(6,*)(LICOB(K),K=2,LICOB(1)+1)
ENDIF
IF(J.EQ.2)THEN
WRITE(6,*)' NRO. ',LICOM(1)
WRITE(6,*)(LICOM(K),K=2,LICOM(1)+1)
ENDIF
IF(J.EQ.3)THEN
WRITE(6,*)' NRO. ',LICOP(1)
WRITE(6,*)(LICOP(K),K=2,LICOP(1)+1)
ENDIF
IF(J.EQ.4)THEN
WRITE(6,*)' NRO. ',INPEL
WRITE(6,*)(INPEL(K),K=1,INPEL)
ENDIF
IF(J.EQ.5)THEN
WRITE(6,*)' NRO. ',INMEL
WRITE(6,*)(INMEL(K),K=1,INMEL)
ENDIF
ENDIF

```

```

IF(J.EQ.6)THEN
  WRITE(6,*)' NRO. ',NBAIS
  WRITE(6,*)(LIAIS(K),K=1,NBAIS)
ENDIF
GO TO 450
ENDIF
IF(I.EQ.7)THEN
  WRITE(6,*)' RIAAI RINAI RIAWI RINWI'
  WRITE(6,*)RIAAI,RINAI,RIAWI,RINWI
  WRITE(6,*)' RIAWF RINWF RIAAFD RINAFD'
  WRITE(6,*)RIAWF,RINWF,RIAFD,RINAFD
  WRITE(6,*)' RIAAFE RINAFE RIAAC RINAC'
  WRITE(6,*)RIAAFE,RINAFE,RIAAC,RINAC
  WRITE(6,*)' RIAWCD RINWCD RIAWCE RINWCE'
  WRITE(6,*)RIAWCD,RINWCD,RIAWCE,RINWCE
  GO TO 450
ENDIF
IF(I.EQ.8)THEN
  WRITE(6,*)' SUMA MASAS INICIALES SWM0,SWP0,SAP0,SAM0'
  WRITE(6,*)SWM0,SWP0,SAP0,SAM0
  GO TO 450
ENDIF
GO TO 450

```

```

C
*****
** ELECCION DE LAS OPCIONES DE DIBUJO (INTERACTIVA O POR ARCHIVO) **
*****

```

```

400 IF(IUO.EQ.5)WRITE(6,*)' PARA PANTALLA(5,7) O PLOTTER(1)?'
    READ(IUO,*)IDEV
    IF(IDEV.EQ.1)GO TO 414
    IF(IUO.EQ.5)WRITE(6,*)' NOMBRE ARCHIV.DIBUJO-RESULTADO?'
    IF(IUO.EQ.5)WRITE(6,*)' UN ESPACIO: DIRECTO'
    READ(IUO,'(A)')A15

```

```

C
                                OPCION ESCALA

```

```

414 XMAX=XB(1)
    XMIN=XB(1)
    YMAX=YB(1)
    YMIN=YB(1)

```

```

D
WRITE(6,*)'NTB ,X Y(1) ',NTB,XMAX,YMAX
DO I=1,NTB
IF(XB(I).GT.XMAX)XMAX=XB(I)
IF(XB(I).LT.XMIN)XMIN=XB(I)
IF(YB(I).GT.YMAX)YMAX=YB(I)
IF(YB(I).LT.YMIN)YMIN=YB(I)
ENDDO

```

```
!c2
```

```

WRITE(6,*)' X,Y MAX ',XMAX,YMAX
WRITE(6,*)' X,Y MIN ',XMIN,YMIN
IF(IUO.EQ.5)WRITE(6,*)'ESC. PREFIJADA(SOFT.ZOOM)(1),LIBRE(0)?'
READ(IUO,*)MES
IF(MES.EQ.1)THEN

```

```

C2>
IF(IUO.EQ.5)WRITE(6,*)' CUADRADO SIMETRICO (SI=1)?'
READ(IUO,*)XMIN
IF(XMIN.EQ.1.)THEN
  IF(IUO.EQ.5)WRITE(6,*)' VALOR SEMIALA?'
  READ(IUO,*)XMAX
  XMAX=ABS(XMAX)
  XMIN=-XMAX
  YMAX=XMAX
  YMIN=XMIN

```

```
GO TO 113
ENDIF
```

C2<

```
IF(IUO.EQ.5)WRITE(6,*)' XMIN ?'
READ(IUO,*)XMIN
IF(IUO.EQ.5)WRITE(6,*)' XMAX ?'
READ(IUO,*)XMAX
IF(IUO.EQ.5)WRITE(6,*)' YMIN ?'
READ(IUO,*)YMIN
IF(IUO.EQ.5)WRITE(6,*)' YMAX ?'
READ(IUO,*)YMAX
```

```
ELSE
IF(ABS(XMIN).GT.XMAX)XMAX=ABS(XMIN)
IF(ABS(YMIN).GT.YMAX)YMAX=ABS(YMIN)
IF(YMAX.GT.XMAX)XMAX=YMAX
XMAX=(XMAX+TR(1))*1.05
XMIN=-XMAX
YMAX=XMAX
YMIN=-YMAX
```

```
ENDIF
```

113 WRITE(6,*)'XMIN,XMAX,YMIN,YMAX'

```
WRITE(6,*)XMIN,XMAX,YMIN,YMAX
```

C

```
MBO=0
MBN=0
MBR=0
MME=0
MMN=0
MPB=0
MPM=0
MPN=0
MCO=0
MVL=0
MFU=0
```

C

```
MH1=0
MH2=0
MH3=0
MH4=0
MR1=0
MR2=0
MR3=0
```

C

```
WRITE(6,*)' DIBUJOS-PLANO DEL MODELO (=1)'
```

```
WRITE(6,*)' O GRAFICAS-HISTOGRAMAS (=2)?'
```

```
READ(IUO,*)IDH
```

C

```
IF(IDH.EQ.1)THEN
IF(IUO.EQ.5)WRITE(6,*)'DIB.BOLAS (SI=1,NO=0,ALGUNAS=-1)?'
READ(IUO,*)MBO
IF(IUO.EQ.5)WRITE(6,*)'DIBUJO NUMERO EN BOLAS (SI=1)?'
READ(IUO,*)MBN
IF(IUO.EQ.5)WRITE(6,*)'DIBUJO RADIO EN BOLAS (SI=1)?'
READ(IUO,*)MBR
IF(IUO.EQ.5)WRITE(6,*)'DIB.MENISCOS (SI=1,NO=0,ALG=-1,CONT=-2)?'
READ(IUO,*)MME
IF(IUO.EQ.5)WRITE(6,*)'DIBUJO NUMERO MENISCOS (SI=1)?'
READ(IUO,*)MMN
IF(IUO.EQ.5)WRITE(6,*)'DIB.POR/POLI.BOLA(S=1,N=0,AL=-1,CON=-2)?'
READ(IUO,*)MPB
```

```

IF(IUO.EQ.5)WRITE(6,*)'DIB.POR/POLI.MENI(S=1,N=0,AL=-1,CON=-2)?'
READ(IUO,*)MPM
IF(IUO.EQ.5)WRITE(6,*)'DIB.MARK+NRO.CENT.PORO(SI=1,NO=0,AL=-1)?'
READ(IUO,*)MPN
IF(IUO.EQ.5)WRITE(6,*)'DIBUJO CONTORNO/BOLAS(SI=1)?'
READ(IUO,*)MCO
IF(IUO.EQ.5)WRITE(6,*)'DIBUJO VELOCIDADES LINEALES (SI=1)?'
READ(IUO,*)MVL
IF(IUO.EQ.5)WRITE(6,*)'DIBUJO FUERZAS(NO=0,TOTALES=1,AMOR.=2)?'
READ(IUO,*)MFU
ELSE
WRITE(6,*)' HISTOGRAMA ANGUL. FUERZA-NORMAL CONTAC./FI ROZ.(1)'
WRITE(6,*)' HISTOGRAMA MODULOS FUERZAS CONTAC./MAXIMA (2)'
WRITE(6,*)' HISTOGRAMA POLAR CONTACTOS (CON INTERNOS) (3)'
WRITE(6,*)' HISTOGRAMA POROSIMETRIA SEGUN VOLUM.POROS (4)'
WRITE(6,*)' HISTOGRAMA POROSIMETRIA SEGUN AREAS.POROS (5)'
WRITE(6,*)' GRAFICA RADIAL SUCCION VS. RADIO (6)'
WRITE(6,*)' POLIGONO SUMA FUERZAS TOTALES CONTACTOS 1 BOLA (7)'
WRITE(6,*)' ESCANDALLO O DETALLE FUERZAS EN UN CONTACTO ? (8)'
READ(IUO,*)I
IF(I.EQ.1)MH1=1
IF(I.EQ.2)MH2=1
IF(I.EQ.3)MH3=1
IF(I.EQ.4)MH4=1
IF(I.EQ.5)MH4=2
IF(I.EQ.6)MR1=1
IF(I.EQ.7)MR2=1
IF(I.EQ.8)MR3=1
ENDIF
C
IF(MPN.EQ.0)THEN
MPNM=0
MPNB=0
ELSE
IF(MPB.EQ.1)THEN
MPNM=0
MPNB=1
ELSE
MPNM=1
MPNB=0
IF(((MPB.EQ.-1).OR.(MPB.EQ.-2)).AND.(MPM.NE.1))THEN
MPNM=0
MPNB=1
ENDIF
ENDIF
ENDIF
C
IF(IUO.EQ.5)WRITE(6,*)' TODO CORRECTO(99) ?'
READ(IUO,*)ICON
IF(IUO.EQ.5)THEN
IF(ICON.NE.99)GO TO 50
ELSE
IF(ICON.NE.99)THEN
WRITE(6,*)' ERROR LECTURA OPCIONES ',ICON
STOP
ELSE
CLOSE(3)
ENDIF
ENDIF
C

```

```

IF(IDEV.NE.1)THEN
  XSPAN=(XMAX-XMIN)/3071.
  YSPAN=(YMAX-YMIN)/3071.
  IF(YSPAN.GT.XSPAN)XSPAN=YSPAN
ELSE
  WRITE(6,*)' ANCHO PLOT (CM.)?'
  READ(5,*)AN
  XSPAN=(XMAX-XMIN)/AN
  YSPAN=(YMAX-YMIN)/AN
  IF(YSPAN.GT.XSPAN)XSPAN=YSPAN
ENDIF

```

```

C
IF(MVL.EQ.1)THEN
  EMVL=0.
  DO I=1,NTB
    VL=SQRT(XBV(I)*XBV(I)+YBV(I)*YBV(I))
    IF(VL.GT.EMVL)EMVL=VL
  ENDDO
  WRITE(6,*)' VELOCIDAD LINEAL MAXIMA=',EMVL
  WRITE(6,*)' '

```

```

C
  WRITE(6,*)' ESCALA VELOCIDADES BASICA:'
  WRITE(6,*)' 50 cm./s. = 2.5e-03 cm. modelo'
  WRITE(6,*)' '
  WRITE(6,*)' AMPLIFICACION (10...1....0.1p.e.)?'
  READ(5,*)emvl
ELSE
  EMVL=0.
ENDIF

```

```

C
*****
** SECCION DE EJECUCION DE LOS GRAFICOS **
*****
EMFU=0.
IF(MFU.NE.0)CALL CAL_EMFU(MFU,EMFU,FUMAX,FURAD)

```

```

C
700 CALL DIB$INITT(IDEV,2,A15)
  IF(IDEV.NE.1)THEN
    CALL DIB$TWINDO(-1,1024,4095,0,3071)
  ELSE
    CALL DIB$TWINDO(-1,0,AN,0,AN)
  ENDIF
  CALL DIB$DWINDO(-1,XMIN,XMAX,YMIN,YMAX)
  CALL DIB$SELECT_WINDO(-1)

```

```

C
  IF(IDEV.NE.1)THEN
    CALL DIB$ERASE
    CALL DIB$CLEARDIALOG
    CALL DIB$SGOPEN(10)
  ENDIF

```

```

C
  CALL RECUADRO(XMIN,XMAX,YMIN,YMAX,TIME,NTB,IDEV,EMVL,
    MFU,EMFU,FUMAX,FURAD,IDH)

```

```

C
  IF(MH1.EQ.1)THEN
    CALL DHIST_F_ANG(IDEV)
  ENDIF
  IF(MH2.EQ.1)THEN
    CALL DHIST_F_MOD(IDEV)
  ENDIF

```

```

IF(MH3.EQ.1)THEN
  CALL DHIST_POLAR(IDEV)
ENDIF
IF((MH4.EQ.1).OR.(MH4.EQ.2))THEN
  CALL DHIST_POROSIM(XMIN,XMAX,YMIN,YMAX,IDEV,MH4)
ENDIF
IF(MR1.EQ.1)THEN
  CALL DRADIAL_SUCC(XMIN,XMAX,YMIN,YMAX,IDEV)
ENDIF
IF(MR2.EQ.1)THEN
  CALL DFUERZA_BOLA(IDEV)
ENDIF
IF(MR3.EQ.1)THEN
  CALL DFUERZA_CONT(IDEV)
ENDIF

```

C

```

IF(MVL.EQ.1)THEN
  CALL DVELO_LIN(XSPAN,IDEV,I,emv1)
ENDIF

```

C

```

IF(MFU.GT.0)THEN
  CALL DFUERZA_GLOBAL(MFU,EMFU,FUMAX,IDEV)
ENDIF

```

C

```

IF(MBO.EQ.1)THEN
  DO I=1,NTB
    CALL DBOLAS(MBN,MBR,XSPAN,IDEV,I)
  ENDDO
ENDIF
455 IF(MBO.EQ.-1)THEN
  WRITE(6,*)' DIB.CUAL BOLA (FIN=0)?'
  CALL DIB$ANMODE
  READ(5,*)I
  IF(I.GT.0)THEN
    CALL DBOLAS(MBN,MBR,XSPAN,IDEV,I)
    GO TO 455
  ENDIF
ENDIF

```

C

```

IF((MME.EQ.1).OR.(MMN.EQ.1))THEN
  NMTOT=NTM+INMEL
  DO I=1,NMTOT
    IF(V(I).NE.0.)THEN
      CALL DMENISCOS(MMN,XSPAN,IDEV,I)
    ENDIF
  ENDDO
ENDIF
IF(MME.EQ.-2)THEN
  DO I=2,LICOM(1)+1
    NM=LICOM(I)
    CALL DMENISCOS(MMN,XSPAN,IDEV,NM)
  ENDDO
ENDIF
460 IF(MME.EQ.-1)THEN
  WRITE(6,*)' DIB.CUAL MENISCO (FIN=0)?'
  CALL DIB$ANMODE
  READ(5,*)I
  IF(I.GT.0)THEN
    CALL DMENISCOS(MMN,XSPAN,IDEV,I)
    GO TO 460
  ENDIF
ENDIF

```

```
ENDIF
ENDIF
```

C

```
IF(MPB.EQ.1)THEN
  NPTOT=NTP+INPEL
  DO I=1,NPTOT
    IF(IPOR(I).NE.0)THEN
      CALL DPOROS_BOLA(XSPAN,IDEV,I,MPNB)
    ENDIF
  ENDDO
ENDIF
```

465

```
IF(MPB.EQ.-1)THEN
  WRITE(6,*)' DIB.CUAL PORO_BOLA (FIN=0)?'
  CALL DIB$ANMODE
  READ(5,*)I
  IF(I.GT.0)THEN
    CALL DPOROS_BOLA(XSPAN,IDEV,I,MPNB)
    GO TO 465
  ENDIF
ENDIF
```

```
ENDIF
IF(MPB.EQ.-2)THEN
  DO I=2,LICOP(1)+1
    NP=LICOP(I)
    CALL DPOROS_BOLA(XSPAN,IDEV,NP,MPNB)
  ENDDO
ENDIF
```

C

```
IF(MPM.EQ.1)THEN
  NPTOT=NTP+INPEL
  DO I=1,NPTOT
    IF(IPOR(I).NE.0)THEN
      CALL DPOROS_MENISCO(XSPAN,IDEV,I,MPNM)
    ENDIF
  ENDDO
ENDIF
```

470

```
IF(MPM.EQ.-1)THEN
  WRITE(6,*)' DIB.CUAL PORO_MEN (FIN=0)?'
  CALL DIB$ANMODE
  READ(5,*)I
  IF(I.GT.0)THEN
    CALL DPOROS_MENISCO(XSPAN,IDEV,I,MPNM)
    GO TO 470
  ENDIF
ENDIF
```

```
ENDIF
IF(MPM.EQ.-2)THEN
  DO I=2,LICOP(1)+1
    NP=LICOP(I)
    CALL DPOROS_MENISCO(XSPAN,IDEV,NP,MPNM)
  ENDDO
ENDIF
```

C

```
IF((MPB.NE.1).AND.(MPM.NE.1))THEN
  IF(MPN.EQ.1)THEN
    NPTOT=NTP+INPEL
    DO I=1,NPTOT
      IF(IPOR(I).NE.0)THEN
        CALL DPOROS_NRO(XSPAN,IDEV,I)
      ENDIF
    ENDDO
  ENDIF
ENDIF
```



```

ENDIF
IF(MPN.EQ.-1)THEN
475  WRITE(6,*)' DIB.CUAL PORO_NUM. (FIN=0)?'
      CALL DIB$ANMODE
      READ(5,*)I
      IF(I.GT.0)THEN
        CALL DPOROS_NRO(XSPAN,IDEV,I)
        GO TO 475
      ENDIF
ENDIF
C
IF(MCO.EQ.1)CALL DCONTORNO
C
IF(IDEV.NE.1)THEN
  CALL DIB$SGCLOSE
  CALL DIB$MOVEA(XMIN,YMIN)
500  WRITE(6,*)'HARDZOOM'
      WRITE(6,*)'
      WRITE(6,*)'Y FIN(0)'
      WRITE(6,*)'N.OPC(1)'
      WRITE(6,*)'RESTI(2)'
      WRITE(6,*)'HARDC(3)'
      WRITE(6,*)' ? '
      READ(5,*)MZO
      IF(MZO.EQ.0)THEN
        CALL DIB$SGDELETE(10)
        GO TO 900
      ENDIF
      IF(MZO.EQ.1)THEN
        CALL DIB$SGDELETE(10)
        GO TO 50
      ENDIF
      IF(MZO.EQ.2)THEN
        CALL DIB$SGDELETE(10)
        GO TO 700
      ENDIF
      IF(MZO.EQ.3)THEN
        CALL DIB$CLEARDIALOG
        CALL DIB$HARDCOPY(0)
        GO TO 500
      ENDIF
ELSE
  WRITE(6,*)'Y FIN(0)'
  WRITE(6,*)'N.OPC(1)?'
  READ(5,*)MZO
  WRITE(6,*)' FINAL EN (0,0)(=0) (0,AN+2)(=1)?'
  READ(5,*)I
  IF(I.EQ.1)THEN
    AF=AN+2
  ELSE
    AF=0
  ENDIF
  CALL DIB$LINEINDEX(1)
  CALL DIB$GTINDEX(1)
  CALL DIB$FINITT(0,AF)
  IF(MZO.EQ.1)GO TO 50
  GO TO 1000
ENDIF
900  CALL DIB$CLEARDIALOG
      CALL DIB$FINITT(0,0)

```

```
1000 CALL DIB$INITT(7,2,' ')
      CALL DIB$SGDELETE(10)
      CALL DIB$FINITT(0,0)
```

```
C
      STOP
      END
```

```
C
*****
*****
```

```
      SUBROUTINE RECUADRO(XMIN,XMAX,YMIN,YMAX,TIME,NTB,IDEV,EMVL,
      MFU,EMFU,FUMAX,FURAD,IDH)
```

```
*****
** DIBUJA RECUADRO DEL PLOT, COORDENADAS EXTREMOS, NRO. BOLAS Y TIME **
*****
      INCLUDE 'PREC.INC'
```

```
C
      CHARACTER*11 A11
      CHARACTER*15 A15
      CALL DIB$GTINDEX(2)      !SI 1:NEGRO 2:ROJO 3:AZUL
      CALL DIB$LINEINDEX(1)
      CALL DIB$LINestyle('h')
      IF(IDEV.EQ.1)THEN
        CALL DIB$GTSIZE(0.3,0.15,0.075)
      ELSE
        CALL DIB$GTSIZE(40,30,20)
      ENDIF
      YMA1=YMAX
      CALL DIB$MOVEA(XMIN,YMIN)
      CALL DIB$DRAWA(XMIN,YMA1)
      CALL DIB$DRAWA(XMAX,YMA1)
      CALL DIB$DRAWA(XMAX,YMIN)
      CALL DIB$DRAWA(XMIN,YMIN)
```

```
C
      XC=(XMAX+XMIN)/2.
      YC=(YMAX+YMIN)/2.
      XU=(XMAX-XMIN)/2.
      YU=(YMAX-YMIN)/2.
```

```
C
      IF(IDH.EQ.2)GO TO 100
      CALL DIB$MOVEA(XC-XU*.99,YC-YU*.93)
      A11=' '
      ENCODE(11,'(E11.4)',A11)XMIN
      CALL DIB$GTEXT(A11)
      A11=' '
      ENCODE(11,'(E11.4)',A11)YMIN
      CALL DIB$MOVEA(XC-XU*.99,YC-YU*.98)
      CALL DIB$GTEXT(A11)
      CALL DIB$MOVEA(XC+XU*.5,YC+YU*.95)
      A11=' '
      ENCODE(11,'(E11.4)',A11)XMAX
      CALL DIB$GTEXT(A11)
      A11=' '
      ENCODE(11,'(E11.4)',A11)YMA1
      CALL DIB$MOVEA(XC+XU*.5,YC+YU*.9)
      CALL DIB$GTEXT(A11)
```

```
C
100  A11=' '
      CALL DIB$MOVEA(XC+XU*.5,YC-YU*.93)
```

```
A11='
ENCODE(5,'(I5)',A11)NTB
CALL DIB$GTEXT(A11)
CALL DIB$MOVEA(XC+XU*.3,YC-YU*.98)
A15='
ENCODE(15,'(E15.8)',A15)TIME
CALL DIB$GTEXT(A15)
```

C

```
IF(EMVL.NE.0.)THEN
CALL DIB$MOVEA(XC-XU*.99,YC+YU*.95)
A11='
PEPE=50./emvl
ENCODE(7,'(F7.2)',A11)PEPE
CALL DIB$GTEXT(A11)
CALL DIB$MOVEA(XC-XU*.99,YC+YU*.90)
CALL DIB$DRAWA(XC-XU*.99+2.5E-03,YC+YU*.90)
ENDIF
```

C

```
IF(MFU.NE.0.)THEN
CALL DIB$MOVEA(XC-XU*.99,YC+YU*.95)
A11='
FESP=0.5*FURAD/EMFU
ENCODE(15,'(E15.8)',A15)FESP
CALL DIB$GTEXT(A15)
CALL DIB$MOVEA(XC-XU*.99,YC+YU*.90)
CALL DIB$DRAWR(2.*FURAD,0.)
CALL DIB$DRAWR(0.,-FURAD/2.)
CALL DIB$DRAWR(-2.*FURAD,0.)
CALL DIB$DRAWR(0.,FURAD/2.)
CALL DIB$MOVEA(XC-XU*.99,YC+YU*.85)
IF(MFU.EQ.1)CALL DIB$GTEXT('F.TOTAL.')
IF(MFU.EQ.2)CALL DIB$GTEXT('F.AMORT.')
ENDIF
```

C

```
RETURN
END
```

C

```
*****
*****
```

```
SUBROUTINE DRADIAL_SUCC(XMIN,XMAX,YMIN,YMAX,IDEV)
```

```
*****
** SUBROUTINA PARA GRAFICO SUCCION VS. DISTANCIA RADIAL AL CENTRO **
*****
```

```
INCLUDE 'COM.INC'
```

C

```
CHARACTER*5 A5
CHARACTER*11 A11
CHARACTER*15 A15
CALL DIB$GTINDEX(2)
CALL DIB$LINEINDEX(1)
CALL DIB$LINestyle('h')
CALL DIB$MARKERTYPE(1)
IF(IDEV.EQ.1)THEN
CALL DIB$GTsize(0.3,0.15,0.075)
ELSE
CALL DIB$GTsize(40,30,20)
ENDIF
YMA1=YMAX
```

```

C
DMAX=0.
PMAX=0.
  NMTOT=NTM+INMEL
  DO I=1,NMTOT
  IF(V(I).NE.0.)THEN
  D=SQRT(XM(I)*XM(I)+YM(I)*YM(I))
  IF(D.GT.DMAX)DMAX=D
  IF(-PWPA(I).GT.PMAX)PMAX=-PWPA(I)
  ENDIF
  ENDDO

```

```

C
PMAX1=100.
IF(PMAX.LT.10.)PMAX1=10.
IF(PMAX.LT.2.)PMAX1=2.
PMAX=PMAX1

```

```

C
XC=(XMAX+XMIN)/2.      !CENTRO
YC=(YMAX+YMIN)/2.
XU=(XMAX-XMIN)/2.      !SEMI LADO
YU=(YMAX-YMIN)/2.

```

```

C
X0=XC                  !ORIGEN GRAFICO
Y0=YC-0.5*YU

```

```

C
CALL DIB$MOVEA(X0+XU*.6,Y0-YU*.05)
A11='
ENCODE(11,'(E11.4)',A11)DMAX
CALL DIB$GTEXT(A11)
CALL DIB$MOVEA(X0+DMAX,Y0+YU/100.)
CALL DIB$DRAWA(X0+DMAX,Y0-YU/100.)
CALL DIB$DRAWA(X0+DMAX,Y0)
CALL DIB$DRAWA(X0,Y0)
CALL DIB$MOVEA(X0,Y0-YU*.05)
CALL DIB$GTEXT('0.')
CALL DIB$MOVEA(X0+0.2*DMAX,Y0-YU*.15)
CALL DIB$GTEXT('DIST. RADIAL')
CALL DIB$MOVEA(X0-0.1*DMAX,Y0)
CALL DIB$GTEXT('0.')
CALL DIB$MOVEA(X0,Y0)
CALL DIB$DRAWA(X0,Y0+YU)
CALL DIB$DRAWA(X0-XU/100.,Y0+YU)
CALL DIB$DRAWA(X0+XU/100.,Y0+YU)
CALL DIB$MOVEA(X0-0.2*DMAX,Y0+YU)
A5='
ENCODE(5,'(F5.0)',A5)PMAX
CALL DIB$GTEXT(A5)
CALL DIB$MOVEA(X0-0.4*DMAX,Y0+0.5*YU)
CALL DIB$GTEXT('SUCCION')

```

```

C
IF(IDEV.EQ.1)THEN
  CALL DIB$GTSIZE(0.03,0.015,0.0075)
  ELSE
  CALL DIB$GTSIZE(4,3,2)
  ENDIF

```

```

C
WRITE(6,*)' GRAF.SUCC.VS.D.RADIAL:'
WRITE(6,*)' ** COLOR ?'
WRITE(6,*)' (MARKA PLOTER:'
WRITE(6,*)'      1:AZUL'

```

```

WRITE(6,*)'      2:NEGRO)'
READ(5,*)ICOL
WRITE(6,*)' **  MARKA(=-IMARK(0-10) O'
WRITE(6,*)'      PUNTOS(=NRO.REPETIC.)?'
READ(5,*)IMARK
CALL DIB$GTINDEX(ICOL)
CALL DIB$LINEINDEX(ICOL)
IF(IMARK.LE.0)CALL DIB$MARKERTYPE(-IMARK)

```

C

```

      NMTOT=NTM+INMEL
DO I=1,NMTOT
IF(V(I).NE.0.)THEN
X1=X0+SQRT(XM(I)*XM(I)+YM(I)*YM(I))
Y1=Y0-PWPA(I)*YU/PMAX
IF(IMARK.LE.0)THEN
CALL DIB$MARKA(X1,Y1)
ELSE
DO J=1,IMARK
CALL DIB$POINTA(X1,Y1)
ENDDO
ENDIF
ENDIF
ENDDO

```

C

```

RETURN
END

```

C

```

*****
*****

```

```

SUBROUTINE DHIST_POROSIM(XMIN,XMAX,YMIN,YMAX,IDEV,MH4)

```

```

*****
**      GRAFICO-HISTOGRAMA POROSIMETRIA:FRECUENCIA VS.VMAX(MH4=1'      **
**                                     O' VS.AMAX(MH4=2)      **
*****

```

```

INCLUDE 'COM.INC'

```

C

```

DIMENSION VLIM(51),NLIM(50),DEQ(2000)

```

C

```

CHARACTER*5 A5
CHARACTER*11 A11
CHARACTER*15 A15
CALL DIB$GTINDEX(2)
CALL DIB$LINEINDEX(1)
CALL DIB$LINESTYLE('h')
CALL DIB$MARKERTYPE(1)
IF(IDEV.EQ.1)THEN
CALL DIB$GTSIZE(0.3,0.15,0.075)
ELSE
CALL DIB$GTSIZE(40,30,20)
ENDIF
YMA1=YMAX

```

C

```

113 WRITE(6,*)'GRAFICO-HISTOGRAMA POROSIMETRIA:'
WRITE(6,*)' EJES:'
WRITE(6,*)' POROSIMETRIA:EJE X:DIAMETRO EQUIVALENTE ,De'
WRITE(6,*)'      EJE Y:%VOL.POROS CON D<De      (=1)'
WRITE(6,*)' HISTOGRAMA: EJE X:BARRAS POR TAMA/O MAX. POROS'
WRITE(6,*)'      EJE Y:FRECUENCIAS EN NUMERO      (=0)?'

```

```
READ(5,*)IEJE
IF(IEJE.EQ.1)THEN
  GO TO 400
ENDIF
```

HISTOGRAMA

```
IF(MH4.EQ.1)THEN
  DMAX=VMAX(1)
  DMIN=DMAX
  NPTOT=NTP+INPEL
  DO I=1,NPTOT
    IF(IPOR(I).NE.0)THEN
      IF(VMAX(I).GT.DMAX)DMAX=VMAX(I)
      IF(VMAX(I).LT.DMIN)DMIN=VMAX(I)
    ENDIF
  ENDDO
ELSE
  DMAX=AMAX(1)
  DMIN=DMAX
  NPTOT=NTP+INPEL
  DO I=1,NPTOT
    IF(IPOR(I).NE.0)THEN
      IF(AMAX(I).GT.DMAX)DMAX=AMAX(I)
      IF(AMAX(I).LT.DMIN)DMIN=AMAX(I)
    ENDIF
  ENDDO
ENDIF
WRITE(6,*)'GRAFICO-HISTOGRAMA AMAX O VAMX:'
WRITE(6,*)' TAMA/O MINIMO Y MAXIMO: ',DMIN,DMAX
WRITE(6,*)' ESCALADO:'
WRITE(6,*)'   POR DEFAULT(DMIN-DMAX/10 BARRAS)(=1)'
WRITE(6,*)'   O ESPECIFICADO                (=0)?'
READ(5,*)IESC
IF(IESC.EQ.0)THEN
  WRITE(6,*)' TAM.MIN, TAM.MAX., NRO.BARRAS(<=50)?'
  READ(5,*)DMIN,DMAX,NBAR
ELSE
  NBAR=10
ENDIF
```

```
VINC=(DMAX-DMIN)/FLOAT(NBAR)
DO I=1,NBAR
  VLIM(I)=DMIN+VINC*FLOAT(I-1)
  NLIM(I)=0
ENDDO
VLIM(NBAR+1)=DMAX
IINF=0
ISUP=0
```

```
NPTOT=NTP+INPEL
DO I=1,NPTOT
  IF(IPOR(I).NE.0)THEN
    IF(MH4.EQ.1)THEN
      VALOR=VMAX(I)
    ELSE
      VALOR=AMAX(I)
    ENDIF
    IF(VALOR.GT.DMAX)THEN
      ISUP=ISUP+1
      GO TO 300
    ENDIF
```

```

DO J=NBAR,1,-1
IF (VALOR.GE.VLIM(J))GO TO 200
ENDDO
IINF=IINF+1
GO TO 300
200 NLIM(J)=NLIM(J)+1
ENDIF
300 ENDDO
NSUM=0
DO J=1,NBAR
NSUM=NSUM+NLIM(J)
ENDDO
NSUM=NSUM+IINF+ISUP
IF (NSUM.NE.NTP)THEN
WRITE(6,*)' PROBLEMAS DHIST_POROSIM',NLIM,IINF,ISUP,NTP
STOP
ENDIF

```

C

```

XC=(XMAX+XMIN)/2.      !CENTRO
YC=(YMAX+YMIN)/2.
XU=(XMAX-XMIN)/2.      !SEMI LADO
YU=(YMAX-YMIN)/2.

```

C

```

X0=XC-0.5*XU          !ORIGEN GRAFICO
Y0=YC-0.5*YU

```

C

```

CALL DIB$MOVEA(X0+XU*.8,Y0-YU*.05)
A11='
ENCODE(11,'(E11.4)',A11)DMAX
CALL DIB$GTEXT(A11)
CALL DIB$MOVEA(X0-XU*0.2,Y0-YU*.05)
A11='
ENCODE(11,'(E11.4)',A11)DMIN
CALL DIB$GTEXT(A11)
CALL DIB$MOVEA(X0+0.2*XU,Y0-YU*0.15)
IF (MH4.EQ.1)THEN
CALL DIB$GTEXT('VMAX POROS')
ELSE
CALL DIB$GTEXT('AMAX POROS')
ENDIF
CALL DIB$MOVEA(X0+0.2*XU,Y0-YU*0.25)
CALL DIB$GTEXT('NRO.BARRAS=')
CALL DIB$MOVEA(X0+0.7*XU,Y0-YU*0.25)
A5='
ENCODE(5,'(I5)',A5)NBAR
CALL DIB$GTEXT(A5)
CALL DIB$MOVEA(X0-0.1*XU,Y0)
CALL DIB$GTEXT('0.')
CALL DIB$MOVEA(X0-0.4*XU,Y0+0.5*YU)
CALL DIB$GTEXT('FRECUENCIAS')
CALL DIB$MOVEA(X0-0.4*XU,Y0+0.4*YU)
CALL DIB$GTEXT('SOBRE')
CALL DIB$MOVEA(X0-0.2*XU,Y0+0.4*YU)
A5='
ENCODE(5,'(I5)',A5)NTP
CALL DIB$GTEXT(A5)
CALL DIB$MOVEA(X0-0.1*XU,Y0+YU)
CALL DIB$GTEXT('1.')
CALL DIB$MOVEA(X0,Y0+YU)
CALL DIB$DRAWA(X0,Y0)

```

```

CALL DIB$DRAWA(X0+XU,Y0)
CALL DIB$DRAWA(X0+XU,Y0+YU)
CALL DIB$DRAWA(X0,Y0+YU)

```

C

```

CALL DIB$LINEINDEX(3)
XFAC=XU/(DMAX-DMIN)
YFAC=YU/FLOAT(NTP)
CALL DIB$MOVEA(X0,Y0)
IF(IINF.NE.0)THEN
CALL DIB$DRAWA(X0-VINC*XFAC,Y0)
CALL DIB$DRAWA(X0-VINC*XFAC,Y0+FLOAT(IINF)*YFAC)
CALL DIB$DRAWA(X0,Y0+FLOAT(IINF)*YFAC)
ENDIF
DO I=1,NBAR
CALL DIB$DRAWA(X0+(VLIM(I)-DMIN)*XFAC,Y0+FLOAT(NLIM(I))*YFAC)
CALL DIB$DRAWA(X0+(VLIM(I+1)-DMIN)*XFAC,Y0+FLOAT(NLIM(I))*YFAC)
ENDDO
IF(ISUP.NE.0)THEN
CALL DIB$DRAWA(X0+XU,Y0+FLOAT(ISUP)*YFAC)
CALL DIB$DRAWA(X0+XU+VINC*XFAC,Y0+FLOAT(ISUP)*YFAC)
CALL DIB$DRAWA(X0+XU+VINC*XFAC,Y0)
ENDIF
GO TO 900

```

C

```

400 CONTINUE                                !POROSIMETRIA
I=0
SUM=0.
NPTOT=NTP+INPEL
DO NP=1,NPTOT
IF(IPOR(NP).NE.0)THEN
I=I+1
IF(MH4.EQ.1)THEN
DEQ(I)=(6.*VMAX(NP)/PI)**(0.333333)
SUM=SUM+VMAX(NP)
ELSE
DEQ(I)=SQRT(4.*AMAX(NP)/PI)
SUM=SUM+AMAX(NP)
ENDIF
ENDIF
ENDDO
IF(I.NE.NTP)WRITE(6,*)' ERROR HIST.POROSIM,I,NP:',I,NP
ALGORIT.BURBUJA.ORDEN DEQ( )

```

C

```

J=NTP+1
120 J=J-1
DO K=1,J-1
IF(DEQ(K).GT.DEQ(K+1))THEN
TEM=DEQ(K)
DEQ(K)=DEQ(K+1)
DEQ(K+1)=TEM
ENDIF
ENDDO
IF(J.GT.2)GO TO 120

```

C

```

WRITE(6,*)'GRAFICO-POROSIMETRIA AMAX O VMAX:'
WRITE(6,*)' DIAMETRO EQ. MINIMO Y MAXIMO: ',DEQ(1),DEQ(NTP)
WRITE(6,*)' ESCALADO:'
WRITE(6,*)' POR DEFAULT(DMIN A DMAX) (=1)'
WRITE(6,*)' O ESPECIFICADO (=0)?'
READ(5,*)IESC
IF(IESC.EQ.0)THEN

```



```

WRITE(6,*)' DMIN, DMAX ?'
READ(5,*)DMIN,DMAX
ELSE
  DMIN=DEQ(1)
  DMAX=DEQ(NTP)
ENDIF

C
  IF(MH4.EQ.1)THEN
    POT=3.
    CTE=PI/6.
  ELSE
    POT=2.
    CTE=PI/4.
  ENDIF
SUM0=SUM

C
XC=(XMAX+XMIN)/2.      !CENTRO
YC=(YMAX+YMIN)/2.
XU=(XMAX-XMIN)/2.      !SEMI LADO
YU=(YMAX-YMIN)/2.

C
X0=XC-0.5*XU          !ORIGEN GRAFICO
Y0=YC-0.5*YU

C
CALL DIB$MOVEA(X0+XU*.8,Y0-YU*.05)
A11='
ENCODE(11,'(E11.4)',A11)DMAX
CALL DIB$GTEXT(A11)
CALL DIB$MOVEA(X0-XU*0.2,Y0-YU*.05)
A11='
ENCODE(11,'(E11.4)',A11)DMIN
CALL DIB$GTEXT(A11)
CALL DIB$MOVEA(X0+0.2*XU,Y0-YU*0.15)
IF(MH4.EQ.1)THEN
  CALL DIB$GTEXT('D_EQ_POROS(VMAX)')
ELSE
  CALL DIB$GTEXT('D_EQ_POROS(AMAX)')
ENDIF
CALL DIB$MOVEA(X0+0.2*XU,Y0-YU*0.25)
CALL DIB$GTEXT('NRO.POROS=')
CALL DIB$MOVEA(X0+0.7*XU,Y0-YU*0.25)
A5='
ENCODE(5,'(I5)',A5)NTP
CALL DIB$GTEXT(A5)
CALL DIB$MOVEA(X0-0.1*XU,Y0)
CALL DIB$GTEXT('0.')
CALL DIB$MOVEA(X0-0.4*XU,Y0+0.5*YU)
CALL DIB$GTEXT('V o A/TOT')
CALL DIB$MOVEA(X0-0.4*XU,Y0+0.4*YU)
CALL DIB$GTEXT('CON D>D EQ')
C
CALL DIB$MOVEA(X0-0.2*XU,Y0+0.4*YU)
CALL DIB$MOVEA(X0-0.1*XU,Y0+YU)
CALL DIB$GTEXT('1.')
CALL DIB$MOVEA(X0,Y0+YU)
CALL DIB$DRAWA(X0,Y0)
CALL DIB$DRAWA(X0+XU,Y0)
CALL DIB$DRAWA(X0+XU,Y0+YU)
CALL DIB$DRAWA(X0,Y0+YU)

C
CALL DIB$LINEINDEX(3)

```

```
XFAC=XU/(DMAX-DMIN)
YFAC=YU/SUM0
```

```
C
CALL DIB$MOVEA(X0,Y0+SUM*YFAC)
C
IF(IINF.NE.0)THEN
C
CALL DIB$DRAWA(X0-VINC*XFAC,Y0)
C
CALL DIB$DRAWA(X0-VINC*XFAC,Y0+FLOAT(IINF)*YFAC)
C
CALL DIB$DRAWA(X0,Y0+FLOAT(IINF)*YFAC)
C
ENDIF
DO I=1,NTP
CALL DIB$DRAWA(X0+(DEQ(I)-DMIN)*XFAC,Y0+SUM*YFAC)
SUM=SUM-CTE*(DEQ(I)**POT)
CALL DIB$DRAWA(X0+(DEQ(I)-DMIN)*XFAC,Y0+SUM*YFAC)
ENDDO
C
IF(ISUP.NE.0)THEN
C
CALL DIB$DRAWA(X0+XU,Y0+FLOAT(ISUP)*YFAC)
C
CALL DIB$DRAWA(X0+XU+VINC*XFAC,Y0+FLOAT(ISUP)*YFAC)
C
CALL DIB$DRAWA(X0+XU+VINC*XFAC,Y0)
C
ENDIF
C
900 RETURN
END
```

```
C
*****
*****
```

```
SUBROUTINE DBOLAS(MBN,MBR,XSPAN,IDEV,I)
```

```
*****
** QUE DIBUJA LAS PARTICULAS, CON EL NUMERO Y EL RADIO SI PROCEDE **
*****
INCLUDE 'COM.INC'
```

```
C
CALL DIB$GTINDEX(1)
CALL DIB$LINestyle('h')
CALL DIB$LINEINDEX(1)
C
XB1=XB(I)
YB1=YB(I)
RB1=TR(JT(I))
CALL CIR(I,XB1,YB1,RB1,XSPAN,IDEV,MBN)
IF(MBR.EQ.1)THEN
CALL DIB$MOVEA(XB1,YB1)
CALL DIB$DRAWA(XB1+RB1*COS(TB(I)),YB1+RB1*SIN(TB(I)))
ENDIF
C
RETURN
END
```

```
C
*****
*****
```

```
SUBROUTINE DVELO_LIN(XSPAN,IDEV,I,emv1)
```

```
*****
** DIBUJA LAS VELOCIDADES DE LAS PARTICULAS **
*****
INCLUDE 'COM.INC'
```

```
C
CALL DIB$GTINDEX(3)
```

```
CALL DIB$LINestyle('h')
CALL DIB$LINEINDEX(3)
```

C

```
DO I=1,NTB
XB1=XB(I)
YB1=YB(I)
XB2=XB(I)+XBV(I)*5.E-05*emvl
YB2=YB(I)+YBV(I)*5.E-05*emvl
CALL DIB$MOVEA(XB1,YB1)
CALL DIB$DRAWA(XB2,YB2)
ENDDO
```

!cl

C

```
RETURN
END
```

C

```
*****
*****
```

```
SUBROUTINE CIR(I,X,Y,R,XSPAN,IDEV,NUMSI)
```

```
*****
** DIBUJA UN CIRCULO RADIO R EN X,Y;PUNTO CENTRAL; NUMERO SI PROCEDE **
*****
```

```
INCLUDE 'PREC.INC'
CHARACTER*5 A5
```

C

```
CALL DIB$POINTA(X,Y)
```

C

```
IF(NUMSI.EQ.0)GO TO 500
```

C

```
J=IFIX(LOG10(FLOAT(I)))+1
IF(IDEV.EQ.1)THEN
S2=(.7-FLOAT(J)*.1)*R/XSPAN
S1=.75*S2
S3=.25*S2
CALL DIB$GTSIZE(S1,S2,S3)
ELSE
IS2=INT((.7-FLOAT(J)*.1)*R/XSPAN)
IS1=INT(0.75*FLOAT(IS2))
IS3=INT(0.25*FLOAT(IS2))
CALL DIB$GTSIZE(IS1,IS2,IS3)
ENDIF
CALL DIB$MOVEA(X-R*(FLOAT(J)*.1+.3),Y+0.15*R)
IF(J.EQ.1)ENCODE(J,10,A1)I
A5='
ENCODE(J,10,A5)I
CALL DIB$GTEXT(A5)
FORMAT(I<J>)
```

C

10

C

500

C

```
PI=3.141593
DO J=1,36
TE=2.*PI*FLOAT(J)/36.
CALL DIB$DRAWA(X+R*COS(TE),Y+R*SIN(TE))
ENDDO
```

C

```
RETURN
END
```

C

SUBROUTINE DMENISCOS(MMN,XSPAN,IDEV,I)

** DIBUJA LOS MENISCOS (2 ARCOS DE CIRCULO)EN EL CONTACTO **
** ENTRE BOLAS Y COLOCA EL NUMERO SI PROCEDE **

INCLUDE 'COM.INC'

C CHARACTER*5 A5
C
CALL DIB\$GTINDEX(3)
CALL DIB\$LINEINDEX(3)
CALL DIB\$LINESTYLE('h')
IF(IDEV.EQ.1)THEN
CALL DIB\$GTSIZE(0.3,0.15,0.075)
ELSE
CALL DIB\$GTSIZE(40,30,20)
ENDIF

C IF(ICASO.EQ.2)GO TO 100
C

I1=MN(I,1)
I2=MN(I,2)
XB1=XB(I1)
YB1=YB(I1)
RB1=TR(JT(I1))
XB2=XB(I2)
YB2=YB(I2)
RB2=TR(JT(I2))
GA=RB2/RB1
D=SQRT((XB1-XB2)**2.+(YB1-YB2)**2.)-RB1-RB2
AL=D/RB2
X2=1.+GA+GA*AL
Z1=1.-GA
TE=TETA(I)
Y3=(X2*X2-Z1*Z1)*SIN(TE)/(2.*(Z1+X2*COS(TE)))
X3=X2-Y3/TAN(TE)
R2S=SQRT(X3*X3+Y3*Y3)-1.
R2S=R2S*RB1
T1S=ATAN(Y3/X3)
T3=PI-T1S-TE
CALL ACIM12(XB2,YB2,XB1,YB1,TACIM)
TACIM1=TACIM+TE
IF(TACIM1.GT.(2.*PI))TACIM1=TACIM1-2.*PI
CALL DIB\$MOVEA(XB2+RB2*COS(TACIM1),YB2+RB2*SIN(TACIM1))
X3=XB2+(RB2+R2S)*COS(TACIM1)
Y3=YB2+(RB2+R2S)*SIN(TACIM1)
TE3=TACIM1-PI
DO J=1,10
TE3=TE3+T3/10.
CALL DIB\$DRAWA(X3+R2S*COS(TE3),Y3+R2S*SIN(TE3))
ENDDO

C
TACIM2=TACIM-TE
IF(TACIM2.LT.0.)TACIM2=TACIM2+2.*PI
CALL DIB\$MOVEA(XB2+RB2*COS(TACIM2),YB2+RB2*SIN(TACIM2))
X3=XB2+(RB2+R2S)*COS(TACIM2)

```

Y3=YB2+(RB2+R2S)*SIN(TACIM2)
TE3=TACIM2-PI
DO J=1,10
TE3=TE3-T3/10.
CALL DIB$DRAWA(X3+R2S*COS(TE3),Y3+R2S*SIN(TE3))
ENDDO

```

```

C
100 IF(MMN.EQ.0)GO TO 500
    A5='
    J=IFIX(LOG10(FLOAT(I)))+1
    CALL DIB$MOVEA(XM(I),YM(I))
    ENCODE(J,10,A5)I
    CALL DIB$GTEXT(A5)
10  FORMAT(I<J>)
C
500 RETURN
    END

```

```

C
*****
*****

```

```

SUBROUTINE DPOROS_BOLA(XSPAN,IDEV,NP,MPNB)

```

```

*****
**      DIBUJA LOS POROS CON UNA POLIGONAL SIGUIENDO LOS      **
**      CENTROS DE LAS BOLAS CIRCUNDANTES AL PORO           **
*****
INCLUDE 'COM.INC'

```

```

C
CALL DIB$GTINDEX(2)
CALL DIB$LINEINDEX(2)
CALL DIB$LINESTYLE('h')
C
IF(IKPN(NP).LT.0)THEN
    NBMAI=MN(KPN(NP),1)
ELSE
    NBMAI=MN(KPN(NP),2)
ENDIF
NB1=NBMAI
CALL DIB$MOVEA(XB(NBMAI),YB(NBMAI))
DO I=2,ABS(IKPN(NP))
IM=KPN(NP,I)
IF(IM.LT.0)THEN
    XX=XB(-IM)
    YY=YB(-IM)
    NBMAI=-IM
    CALL DIB$LINESTYLE('a')
    CALL DIB$DRAWA(XX,YY)
    CALL DIB$LINESTYLE('h')
ELSE
    IF(NBMAI.EQ.MN(IM,1))THEN
        NBMAI=MN(IM,2)
    ELSE
        NBMAI=MN(IM,1)
    ENDIF
    XX=XB(NBMAI)
    YY=YB(NBMAI)
    CALL DIB$DRAWA(XX,YY)
ENDIF
ENDDO

```

```
CALL DIB$DRAWA(XB(NB1),YB(NB1))
```

```
C
IF(MPNB.EQ.1)CALL DPOROS_NRO(XSPAN,IDEV,NP)
RETURN
END
```

```
C
*****
*****
```

```
SUBROUTINE DPOROS_MENISCO(XSPAN,IDEV,NP,MPNM)
```

```
*****
**      QUE DIBUJA LOS POROS CON UNA POLIGONAL SIGUIENDO LOS      **
**      MENISCOS QUE CIRCUNDAN AL PORO                          **
*****
INCLUDE 'COM.INC'
```

```
C
CALL DIB$GTINDEX(3)
CALL DIB$LINEINDEX(3)
CALL DIB$LINESTYLE('h')
```

```
C
IF(IKPN(NP).LT.0)THEN
  NBMAY=MN(KPN(NP,1),1)
ELSE
  NBMAY=MN(KPN(NP,1),2)
ENDIF
NM1=KPN(NP,1)
NMMAY=NM1
CALL DIB$MOVEA(XM(NM1),YM(NM1))
IFL=0
DO I=2,ABS(IKPN(NP))
  IM=KPN(NP,I)
  IF(IM.LT.0)THEN
    IF(IFL.EQ.0)THEN
      IFL=1
      CALL DIB$LINESTYLE('f')
      XX=XM(NMMAY)+3.*(XB(NBMAY)-XM(NMMAY))
      YY=YM(NMMAY)+3.*(YB(NBMAY)-YM(NMMAY))
      CALL DIB$DRAWA(XX,YY)
    ENDIF
    NBMAY=-IM
  ELSE
    NMMAY=IM
    IF(IFL.EQ.0)THEN
      CALL DIB$DRAWA(XM(NMMAY),YM(NMMAY))
    ELSE
      IFL=0
      XX=XM(NMMAY)+3.*(XB(NBMAY)-XM(NMMAY))
      YY=YM(NMMAY)+3.*(YB(NBMAY)-YM(NMMAY))
      CALL DIB$MOVEA(XX,YY)
      CALL DIB$DRAWA(XM(NMMAY),YM(NMMAY))
      CALL DIB$LINESTYLE('h')
    ENDIF
  ENDIF
  IF(NBMAY.EQ.MN(IM,1))THEN
    NBMAY=MN(IM,2)
  ELSE
    NBMAY=MN(IM,1)
  ENDIF
ENDIF
ENDIF
ENDDO
```

```

IF(IFL.EQ.0)THEN
  CALL DIB$DRAWA(XM(NM1),YM(NM1))
ELSE
  XX=XM(NM1)+3.*(XB(NBMAY)-XM(NM1))
  YY=YM(NM1)+3.*(YB(NBMAY)-YM(NM1))
  CALL DIB$MOVEA(XX,YY)
  CALL DIB$DRAWA(XM(NM1),YM(NM1))
  CALL DIB$LINESTYLE('h')
ENDIF
C
IF(MPNM.EQ.1)CALL DPOROS_NRO(XSPAN,IDEV,NP)
RETURN
END

```

```

C
*****
*****

```

```

SUBROUTINE DPOROS_NRO(XSPAN,IDEV,I)

```

```

*****
**      DIBUJA UNA MARCA Y EL NUMERO EN EL "CENTRO" DEL PORO      **
*****

```

```

  INCLUDE 'COM.INC'

```

```

C
  CHARACTER*5 A5
  CALL DIB$GTINDEX(2)
  CALL DIB$LINEINDEX(2)
  CALL DIB$LINESTYLE('h')
  CALL DIB$MARKERTYPE(2)

```

```

C
  IF(IDEV.EQ.1)THEN
    CALL DIB$GTSIZE(0.3,0.15,0.075)
  ELSE
    CALL DIB$GTSIZE(40,30,20)
  ENDIF

```

```

C
  XX=XP(I)
  YY=YP(I)
  CALL DIB$POINTA(XX,YY)
  CALL DIB$MARKA(XX,YY)

```

```

C
  IF(IDEV.EQ.1)THEN
    CALL DIB$MOVREL(0.05,0.1)
  ELSE
    CALL DIB$MOVREL(10,10)
  ENDIF

```

```

C
C
  CALL DIB$MOVEA(XP(I),YP(I))
  J=IFIX(LOG10(FLOAT(I)))+1
  A5='      '
  ENCODE(J,10,A5)I
  CALL DIB$GTEXT(A5)
10  FORMAT(I<J>)

```

```

C
  RETURN
END

```

```

C
*****
*****

```

SUBROUTINE DCONTORNO

```
*****
**      DIBUJA UNA POLIGONAL PASANDO POR LAS BOLAS DEL CONTORNO      **
*****
      INCLUDE 'COM.INC'
```

```
C
      CALL DIB$GTINDEX(2)
      CALL DIB$LINEINDEX(2)
      CALL DIB$LINESTYLE('a')
```

```
C
      NB1=LICOB(2)
      CALL DIB$MOVEA(XB(NB1),YB(NB1))
      DO I=3,LICOB(1)+1
      NBI=LICOB(I)
      CALL DIB$DRAWA(XB(NBI),YB(NBI))
      ENDDO
      CALL DIB$DRAWA(XB(NB1),YB(NB1))
      RETURN
      END
```

```
C
*****
*****
```

SUBROUTINE ACIM12(X1,Y1,X2,Y2,TETA)

```
*****
**      HALLA EL ANGULO ANTIHORARIO ENTRE EL EJE XX+ Y      **
**      LA ORIENTACION 1->2      ENTRE 0 Y 2PI      **
*****
      INCLUDE 'PREC.INC'
```

```
C
      PI=3.14159265
      IF(Y1.EQ.Y2)THEN
        IF(X1.EQ.X2)THEN
          WRITE(6,*)' ERROR EN ACIM12: PUNTOS IGUALES',X1,Y1
          STOP
        ENDIF
        TETA=0.
        IF(X2.LT.X1)TETA=PI
        GO TO 900
      ENDIF
      IF(X2.EQ.X1)THEN
        TETA=PI/2.
      ELSE
        TETA=ATAN((Y2-Y1)/(X2-X1))
        IF(TETA.LT.0.)TETA=TETA+PI
      ENDIF
      IF(Y2.LT.Y1)TETA=TETA+PI
```

```
C
900  RETURN
      END
```

```
C
*****
*****
```

SUBROUTINE CAL_EMFU(MFU,EMFU,FUMAX,FURAD)

```
*****
**      CALCULA LA ESCALA PARA LA SUBRUTINA DIBUJO FUERZAS      **
*****
```

INCLUDE 'COM.INC'

C

```
FUMAX=0.
NMTOT=NTM+INMEL
DO NM=1,NMTOT
IF(V(NM).NE.0.)THEN
  CALL CAL_FUERZA(NM,MFU,FNZ,FTZ,FMOD)
  IF(FMOD.GT.FUMAX)FUMAX=FMOD
ENDIF
ENDDO
```

C

```
FURAD=100.
DO I=1,NTTIP
IF(TR(I).LT.FURAD)FURAD=TR(I)
ENDDO
```

C

```
IF(MFU.EQ.1)WRITE(6,*)' FUERZA TOTAL:'
IF(MFU.EQ.2)WRITE(6,*)' FUERZA AMORT:'
WRITE(6,*)'      MODULO MAXIMO      =',FUMAX
WRITE(6,*)'      SEMI-RADIO MENOR=',FURAD/2.
WRITE(6,*)' ESCALADO DEFAULT(MAX=SEMI-RADIO)(=0)'
WRITE(6,*)' O ESCALADO ESPECIFICADO      (=1)?'
READ(5,*)I
IF(I.EQ.0)THEN
  EMFU=0.5*FURAD/FUMAX
ELSE
  WRITE(6,*)' FUERZA EN UN SEMI-RADIO MENOR?'
  READ(5,*)FESP
  EMFU=0.5*FURAD/FESP
ENDIF
```

C

```
RETURN
END
```

C

SUBROUTINE CAL_FUERZA(NM,M,FNZ,FTZ,FMOD)

```
**      QUE CALCULA COMPONENTES DE LA FUERZA EN EL CONTACTO Y MODULO      **
**      M=1      :      FUERZA TOTAL      **
**      M=2      :      FUERZA AMORTIGUAMIENTO CONTACTO      **
**      M=3      :      FUERZA SOLAPE      **
```

INCLUDE 'COM.INC'

C

```
IF(M.EQ.1)THEN
  FNZ=FN(NM)
  FTZ=FT(NM)
  GO TO 900
ENDIF
FTSOL=DELTAS(NM)*SOLKS
IF(M.EQ.3)THEN
  FNZ=FNSOL(NM)
  FTZ=FTSOL
  GO TO 900
ENDIF
IF(M.NE.2)THEN
```

```

WRITE(6,*)' ERROR CAL_FUERZA.M=',M
STOP
ENDIF
FNZ=FN(NM)-FNW(NM)-FNSOL(NM)
FTZ=FT(NM)-FTSOL
C
900 FMOD=SQRT(FNZ*FNZ+FTZ*FTZ)
RETURN
END

```

```

C
*****
*****

```

```

SUBROUTINE DFUERZA_GLOBAL(MFU,EMFU,FUMAX,IDEV)

```

```

*****
** QUE DIBUJA LAS FUERZAS EN LOS CONTACTOS **
** DE ACUERDO A LA ESCALA EMFU **
** MFU=1 : FUERZAS TOTALES **
** MFU=2 : FUERZAS AMORTIGUADORAS **
*****
INCLUDE 'COM.INC'

```

```

C
WRITE(6,*)' DFUERZA_GLOBAL:'
WRITE(6,*)' DIBUJAMOS TODAS(=0)'
WRITE(6,*)' O LAS > X*FUMAX(=X)'
WRITE(6,*)' (X=0.1, P.EJEM.) ?'
READ(5,*)XFRAC
IF(IDEV.NE.1)THEN
WRITE(6,*)' LLENADO PANELES?'
WRITE(6,*)' (NO=0, SI=1)'
READ(5,*)NPAN
ELSE
NPAN=0
ENDIF

```

```

C
NMTOT=NTM+INMEL
DO NM=1,NMTOT
IF(V(NM).NE.0.)THEN
CALL CAL_FUERZA(NM,MFU,FNZ,FTZ,FMOD)
IF(FMOD.GE.(XFRAC*FUMAX))THEN
NB1=MN(NM,1)
NB2=MN(NM,2)
RB1=TR(JT(NB1))
RB2=TR(JT(NB2))
CALL ACIM12(XB(NB1),YB(NB1),XB(NB2),YB(NB2),B12)
IF(FNZ.EQ.0.)THEN
IF(FTZ.EQ.0.)GO TO 500
WRITE(6,*)' MEN CON FNZ=0,FTZ#0 :',NM
GO TO 500
ENDIF
BF=ATAN(FTZ/FNZ)
BD=B12-BF
IF(BD.LT.0.)BD=BD+2.*PI
IF(BD.GE.(2.*PI))BD=BD-2.*PI
X3=XM(NM)-RB1*COS(BD)
Y3=YM(NM)-RB1*SIN(BD)
X4=X3+0.5*FMOD*EMFU*SIN(BD)
Y4=Y3-0.5*FMOD*EMFU*COS(BD)
X5=X3-0.5*FMOD*EMFU*SIN(BD)

```

```

Y5=Y3+0.5*FMOD*EMFU*COS(BD)
X6=X5+(RB1+RB2)*COS(BD)
Y6=Y5+(RB1+RB2)*SIN(BD)
X7=X4+(RB1+RB2)*COS(BD)
Y7=Y4+(RB1+RB2)*SIN(BD)
IF(FNZ.GE.0.)THEN
  CALL DIB$LINESTYLE('h')
  CALL DIB$LINEINDEX(2)
  IF(NPAN.EQ.1)CALL DIB$FILLPATTERN(-2)
ELSE
  CALL DIB$LINESTYLE('a')
  CALL DIB$LINEINDEX(3)
  IF(NPAN.EQ.1)CALL DIB$FILLPATTERN(-3)
ENDIF
CALL DIB$MOVEA(X4,Y4)
IF(NPAN.EQ.1)CALL DIB$BEGPAN(X4,Y4,0)
CALL DIB$DRAWA(X5,Y5)
CALL DIB$DRAWA(X6,Y6)
CALL DIB$DRAWA(X7,Y7)
CALL DIB$DRAWA(X4,Y4)
IF(NPAN.EQ.1)CALL DIB$ENDPANEL

```

ENDIF

ENDIF

500 ENDDO

C

RETURN

END

C

SUBROUTINE DHIST_F_ANG(IDEV)

 INCLUDE 'COM.INC'

C

```

CALL DIB$GTINDEX(2)
CALL DIB$LINEINDEX(2)
CALL DIB$LINESTYLE('a')

```

C

RETURN
 END

C

SUBROUTINE DHIST_F_MOD(IDEV)

 INCLUDE 'COM.INC'

C

```

CALL DIB$GTINDEX(2)
CALL DIB$LINEINDEX(2)
CALL DIB$LINESTYLE('a')

```

C

RETURN
 END

C

SUBROUTINE DHIST_POLAR(IDEV)

```
*****  
INCLUDE 'COM.INC'  
C  
CALL DIB$GTINDEX(2)  
CALL DIB$LINEINDEX(2)  
CALL DIB$LINESTYLE('a')  
C  
RETURN  
END
```

SUBROUTINE DFUERZA_BOLA(IDEV)

```
*****  
INCLUDE 'COM.INC'  
C  
CALL DIB$GTINDEX(2)  
CALL DIB$LINEINDEX(2)  
CALL DIB$LINESTYLE('a')  
C  
RETURN  
END
```

SUBROUTINE DFUERZA_CONT(IDEV)

```
*****  
INCLUDE 'COM.INC'  
C  
CALL DIB$GTINDEX(2)  
CALL DIB$LINEINDEX(2)  
CALL DIB$LINESTYLE('a')  
C  
RETURN  
END
```