



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

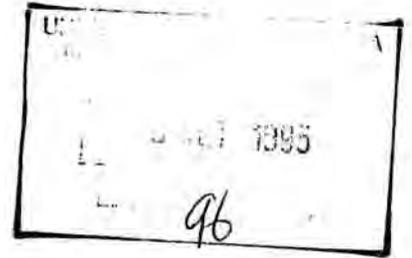
Caracterización de formas y procesos de alteración, observadas en piedra de construcción de edad miocénica del área monumental romana de Tarragona

José Luis Prada Pérez

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tdx.cat) i a través del Dipòsit Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX ni al Dipòsit Digital de la UB. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX o al Dipòsit Digital de la UB (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tdx.cat) y a través del Repositorio Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR o al Repositorio Digital de la UB. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR o al Repositorio Digital de la UB (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tdx.cat) service and by the UB Digital Repository (diposit.ub.edu) has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized nor its spreading and availability from a site foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository is not authorized (framing). Those rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.



**CARACTERIZACIÓN DE FORMAS Y PROCESOS
DE ALTERACIÓN, OBSERVADAS EN PIEDRA DE
CONSTRUCCIÓN DE EDAD MIOCÉNICA DEL
ÁREA MONUMENTAL ROMANA DE TARRAGONA**

**DEPARTAMENTO DE GEOQUÍMICA, PETROLOGÍA
Y PROSPECCIÓN GEOLÓGICA**

FACULTAD DE GEOLOGÍA

UNIVERSIDAD DE BARCELONA

043 PRADA PERE J

BIBLIOTECA DE LA UNIVERSITAT DE BARCELONA



0700196991

**JOSÉ LUIS PRADA PÉREZ
BARCELONA 1995**

512140 200 1995 1995
BIBLIOTECA DE LA UNIVERSITAT DE BARCELONA

X

4 CARACTERÍSTICAS DE LAS FÁBRICAS DOLOMÍTICAS

4.1 COMPONENTES Y TIPOS DE TEXTURAS PETROGRÁFICAS

De los materiales procedentes de cantera utilizados para construir la obra civil romana en Tarragona la dolomitización afecta de forma significativa solo a las rocas estudiadas en las "Coves del Llorito" y en "Les Coves de la Pedrera". Se trata de procesos tipo diagenético tardío, postsedimentarios, que afectan de forma muy irregular a estas litologías, con variaciones locales tanto horizontal dentro de un mismo estrato, como verticalmente a lo largo de los distintos estratos.

La irregularidad de este proceso, y la resultante particular mineralogía, se deben probablemente a las oscilaciones del nivel marino y freático. Esto ha producido un diagénesis compleja, con formación de distintas generaciones de cementos de calcita alternadas con el desarrollo de diferentes fábricas de dolomita. También se han producido en algunos casos reacciones de dedolomitización y disolución, relacionados con etapas recientes de alteración subaérea.

A partir de los resultados de los análisis mineralógicos y la observación microscópica en lamina delgada, llevamos a cabo una profundización en el estudio de las fábricas dolomíticas que nos permite exponer, la siguientes descripciones:

A. - Dolomitas de "Les Coves de la Pedrera"

"Les Coves de la Pedrera" presentan un micromosaico bastante equigranular de pequeños cristales rómbicos subeuhédricos; el mosaico de microdolomita es bastante continuo, con un tamaño medio algo inferior a 10 μm , (dolomicrosparita), ésta es la fábrica mayoritaria que podemos considerar de tipo hipidiotípica (A2) (An-4/1.F-1 y An-4/1.F-2).

Dentro de esta fábrica microdolomítica se observa algún cristal rómbico aislado de mayor tamaño ($d=40-50 \mu\text{m}$) euhédrico. En los cristales más grandes se observa una línea de discontinuidad interna que delimita un núcleo de contorno irregular, lo que indica su carácter polifásico. (An-4/2.F-1) Se ha interpretado como restos de una fábrica idiotípica (A1).

También se observa en microscopio cómo determinados restos fósiles, especialmente de algas rodofíceas, han sufrido una sustitución de la fábrica primaria por una fábrica de criptodolomita subeuhédrica, de tipo hipidiotípico (A3) (An-4/3.F-1), proceso descrito por Sibley (1982). A simple vista estos bioclastos de algas tiene un aspecto de nódulo lutítico de color blanco, y de contorno irregular y muy blando.

A gran aumento (50x y 100x) se observa las relaciones geométricas entre los tres tipos de cristales o fábricas (A1, A2 y A3), lo que nos indica su ordenación en el tiempo dentro de los procesos diagenéticos.

En efecto se ve cómo los cristales euhédricos de mayor tamaño ($d=40-50\mu\text{m}$), son sustituidos parcialmente en sus bordes de grano por la fábrica hipidiotípica de dolomicroesparita (An-4/2.F-1), esta última en cambio no penetra en la fábrica criptodolomítica de los restos de algas.

Por otra parte en la parte superior de la serie, se observa como esta misma fábrica hipidiotípica sustituye parcialmente el cemento esparítico, tipo blocky (B1), y rellena los espacios intercrystalinos. (An-4/2.F-2).

B. - Las calcisilitas de "Les Coves del Llorito" CL

En los yacimientos de las "Coves del Llorito", el contenido total de dolomita es mucho menor que en "Les Coves de la Pedrera", pero en ciertos niveles es muy abundante y presenta notables diferencias de textura tanto en vertical como lateralmente, sobre todo en los niveles superiores. Esta variedad de texturas es una característica muy significativa de este yacimiento lo que le diferencia de "Les Coves de la Pedrera" donde son mucho más homogéneas.

En el conjunto de la serie se han diferenciado los siguientes tipos de fábricas:

- A. 1: Una fábrica idiotípica (Sibley y Gregs, 1987), de cristales euhédricos, de diverso tamaño (polimodales), pero que en su mayoría oscilan entre 30 a $50\mu\text{m}$. No forman un mosaico continuo, pero tienen con frecuencia alguna cara o arista en contacto, incluso alguna interpenetración. La gran mayoría de estos cristales presentan una o varias líneas de discontinuidad interna, lo que indica su carácter polifásico y zonado.
- A2: Una fábrica hipidiotípica, de dolomita tamaño microesparita ($d<10\mu\text{m}$) subeuhedral, muy similar al observado en "Les Coves de la Pedrera", por lo que podemos considerarlo una dolmicroesparita.
- B1: Cemento esparítico anhedral tipo "blocky".
- B2: Cemento anhedral de microesparita

Además de estas fábricas y cementos hay nódulos dolomíticos de distribución muy irregular que podemos clasificarlos en dos tipos:

- C1: Nódulos de contorno subredondeado de color marrón oscuro, esta compuesto por cristales anhedrales de tamaño microesparita, bastante equigranular, se trata de una fábrica de dolomicroesparítica xenotípica.
- C2: Nódulos de contorno irregular, a veces pueden tener una morfología alargada que parece rellenar un fisura. Es un conjunto heterométrico de cristales anhedrales donde predomina el tamaño esparítico grueso, son bastante limpios y transparentes.

El primer tipo de nódulo "C1" son litoclastos de rocas dolomíticas, arrastradas con otros fragmentos de cuarzo detrítico. El segundo tipo de nódulo "C2" parece ser una fase de cemento dolomítico, poco desarrollada y que ocupa fisuras, poros y alvéolos.

El conjunto de estas fábricas tiene una distribución zonal desigual, que varía según los niveles o estratos de la serie, Después de un muestreo selectivo (An-3/4 y An-3/5) se ha detectado los siguientes tipos de texturas:

Tipo CLZ-1: (Nivel inferior, zona central Cueva B)

(An-4/3.F-2)

Predomina el cemento esparítico y microesparítico (B1 y B2) y la fábrica hipidiotípica (A2) de dolomicroesparita, apenas se observa cristales más grandes de dolomita euhédrica de la fábrica idiotípica y suelen ser de contorno confuso.

Hay algunos nódulos dolomíticos de los dos tipo C1 y C2.

Tipo CLZ-2: (Nivel superior y medio, zona central Cueva B)

(An-4/4.F-1)

Contrariamente al caso anterior en este nivel predomina las fábricas dolomíticas, idiotípica e hipidiotípica, con un aumento notable de la presencia de cristales euhédricos.

Tipo CLZ-3: (Nivel Superior noduloso, zona central Cueva B)

(An-4/4.F-2)

Esta textura esta dominada por el cemento esparítico tipo "blocky", parcialmente sustituida por la fabrica hipidiotípica de dolomicroesparita.

Tipo CLZ-5: (Nivel medio y superior, zona norte Cueva A)

(An-4/5.F-1 y F-2)

El conjunto de esta textura tiene un aspecto grumoso y de grano fino, con las siguientes características:

- Apenas se observan cristales de dolomita euhédrica (fábrica idiotípica).
- La fábrica hipidiotípica de criptodolomita y dolomicroesparita es más abundante que en los niveles inferiores. Esta fábrica dolomítica sustituye de manera pseudomorfa casi todos cristal de dolomita euhédrica anterior.

Tipo CLZ-7: (Niveles superiores, zona sur cueva C)

(An-4/6.F-1)

Es una textura muy nítida, muy cementada y compacta que presenta las siguientes características:

- Predominio de la fábrica idiotípica de dolomita, con cristales de marcado carácter zonado y polifásico.
- Gran abundancia de cuarzo detrítico subangular y heterométrico.
- Presencia de cemento esparítico de tipo blocky - La fábrica hipidiotípica es en cambio muy minoritaria.

Tipo CLZ-9: (Nivel superior, zona sur cueva A)

(An-4/6.F-2)

Predominio del cemento esparítico, con numerosos bioclastos.

No hay cristales euhédricos de dolomita, pero sí nódulos subredondeados de cripto-microdolomita "C1" de litoclastos.

También se observan sustituciones de antiguos cristales rómbicos de dolomita idiotípica por una fábrica de dolomicroesparita (fábrica hipidiotípica A2).

Conclusiones

En general los procesos diagenéticos y por tanto los tipos de fábricas generadas son muy similares entre ambas formaciones, "Les Coves de la Pedrera" y las "Coves del Llorito". Podríamos resumir estas observaciones microscópicas en las siguientes conclusiones:

- 1. Se detectan dos tipos de fábricas dolomíticas: La idiotípica con un tamaño que oscila entre 40 y 60 μm y la hipidiotípica con un tamaño entre 7 y 10 μm .
- 2. La fábrica hipidiotípica de dolomicroesparita sustituye con intensidad variable según los niveles estratigráficos, a la fábrica idiotípica de cristales euhédricos zonados.
- 3. En las partes altas de ambas series (CLZ3-"Coves del Llorito" y CCO3-Coves de la Pedrera) se observa una sustitución progresiva de un cemento esparítico tipo "blocky", por la fábrica hipidiotípica de dolomicroesparita.
- 4. En las "Coves del Llorito", en los niveles infrayacentes a la facies calcarenítica, (CLZ9), se observa un claro predominio del cemento esparítico tipo "blocky", pero con restos de las antiguas fábricas dolomíticas.
- 5. En algunos niveles superiores de la misma formación, más hacia el norte (CLZ5), se observa como la fábrica de dolomicroesparita hipidiotípica, que sustituye a los cristales euhédricos, se tiñe de rojo, lo que indica una dedolomitización incipiente subsuperficial de la textura, y su sustitución progresiva por otras fábricas de microesparita.
- 6. Los puntos 3, 4 y 5 sugieren pues la existencia de varias fases de cemento de calcita de diverso tamaño. Una inicial como mínimo anterior a la fábrica hipidiotípica, y otra posterior más desigual y especialmente desarrollada en los niveles superiores.

Distribución espacial

(An-4/7)

- El porcentaje de dolomita euhédrica (fábrica idiotípica) aumenta al ascender en la serie ("Coves del Llorito"), y al acercarse al paleorelieve mesozoico, hacia el sur-sureste, representado por las colinas de la ermita del Loreto.
- Por contra la fábrica hipidiotípica es más abundante hacia el nor-noroeste, al alejarse de este paleorelieve.

Ordenación temporal

Se puede por tanto establecer un modelo aproximado de ordenación temporal de estas fases diagenéticas:

- Primera fase de dolomitización parcial con carácter polifásico. Formación de una fábrica idiotípica zonada de doloesparita
- Aparición de un cemento esparítico y /o microesparítico de desigual desarrollo.
- Segunda fase de dolomitización. Formación de una fábrica hipidiotípica de dolomicroesparita. Esta fase es más intensa hacia el norte de la cuenca, donde dolomitiza la practica totalidad del sedimento.
- Desarrollo de una segunda fase de cemento esparítico tipo "blocky", especialmente en las partes altas de la serie.
- Procesos incipientes de dedolomitización y disolución diferencial debidos a la alteración subaérea y las filtraciones freáticas, este fenómeno es más intenso en las zonas más cercanas al paleorelieve mesozoico ("Coves del Llorito").

4.2 MINERALOGÍA, ESTEQUIOMETRÍA Y CARACTERÍSTICAS CRISTALOQUÍMICAS DE LAS FÁBRICAS DOLOMÍTICAS

4.2.1 Mineralogía y estequiometría

El principal problema de identificación mineralógica reside en el anómalo espectro de difracción que presentan estas dos litologías, tanto en muestras de cantera (An-4/8 y An-4/9), como de sillar

(Muralla Romana y Anfiteatro Romano de Tarragona). En efecto todos estos diagramas presenta una línea en 2.90 Å o muy cercana, como pico de intensidad máxima de la dolomita (espaciado de la reflexión d. 104 de los carbonatos), cuando en la ficha standard esta línea esta situada en 2.88 Å. Además la mayoría de sus líneas presentan un claro desplazamiento. Cuando este espectro se compara con la ficha de la Ankerita (Variedad ferrosa de la Dolomita), su espectro muestra varias líneas coincidentes entre ellas la misma 2.90 Å.

El desplazamiento observado en estos espectros se debe, por tanto, a unas variaciones cristalográficas de la dolomita producidas por sustituciones de Ca por Mg y/o Fe por Mg en la red y por tanto una variación de la relación estequiométrica Ca/Mg (0.5 : 0.5) de la dolomita "sensu estricto"

Estos cambios dado el ambiente geoquímico y de diagénesis de estos carbonatos, pueden ser fundamentalmente de dos tipos:

- Mg⁺⁺... sustituido por... Fe⁺⁺ ANKERITA (Mg/Fe 0.67 : 0.33)
- Mg⁺⁺... sustituido por... Ca⁺⁺ Dolomita cálcica (Ca > 0.5 y Mg < 0.5)

En el primer caso tendríamos la variedad Ankerita y en el segundo una dolomita anómala pobre en Mg, metaestable (Goldsmith y Graf 1958. Hardy, Tucker 1988)

Algunos tratados clásicos de mineralogía (Klocmann y Ramdohr 1959) indican que estas proporciones estequiométricas, anómalas, de dolomitas pobres en magnesio son, en realidad, mezclas mecánicas de calcita y dolomita. Esta hipótesis no nos convence demasiado pues este tipo de espectro lo presentan también las dolomitas más puras, sin calcita, y una mezcla mecánica no puede dar espectros siempre iguales y definidos.

Por tanto la hipótesis cristalográfica y mineralógicamente más probable es que estas dolomitas anómalas correspondan a una fase rica en Ca, dentro de la solución sólida (limitada) que constituyen los iones Ca/Mg dentro de la red de la dolomita.

Estos cristales no se tiñen en general salvo de forma muy parcial en esquinas y bordes, y más raramente en sus núcleos, lo cual se debe posiblemente a procesos de dedolomitización tardíos, como posteriormente veremos.

El teñido se realiza, sobre lámina delgada, con una disolución ácida de ferricianuro potásico pigmentada con alizarina, según la técnica desarrollada por Dickson (1965, 1966)

La escala de colores es la siguiente:

- Calcita
 - rojo calcita sin Fe⁺⁺
 - malva calcita pobre en Fe⁺⁺
 - púrpura rica en Fe⁺⁺
- Dolomita
 - *sin color de tinción* Sin Fe⁺⁺

- azul claro $Fe^{++}/Mg < 1$
- azul oscuro $Fe^{++}/Mg > 1$. Dolomitas muy ferrosas o ankerita.

(Dickson, 1965, 1966. Miller 1988)

Analizadas estas muestras en microscopía electrónica con SDE (sistema dispersivo de energías), no presentan ninguna línea del Fe o, a lo máximo una traza insignificante en áreas muy delimitadas, lo cual, unido a la gran sensibilidad que tiene este elemento por su elevado número atómico en esta técnica instrumental, contradice la hipótesis de la presencia de Ankerita.

Esta situación nos llevo a un replanteamiento del problema, empleando otras técnicas instrumentales. Así pues realizamos un análisis de Fe y Mg con fluorescencia de rayos X, en todos los tipos de carbonatos de estas facies miocénicas que presentaban algún tipo de dolomita:

- Roda de Berà: Calcita mayoritaria con una dolomita de espectro normal.
- "Les Coves de la Pedrera": Dolomitas casi puras, prácticamente sin calcita con espectros anómalos.
- "Coves del Llorito": Calcita mayoritaria, con dolomita de espectro anómalo
- Sillares del anfiteatro (iglesia románica, "Ermita del Miracle"), realizados con las calcisiltitas tipo C. Llorito y, por tanto, con espectros anómalos.

Además, para favorecer la discriminación de la procedencia mineralógica del Fe, la muestra procedente del sillar se calentó a 300 C°. Esta operación tenía como objetivo provocar la transformación de la posible goethita (solapada por las líneas de la dolomita) en hematites, sin alterar la red cristalina de las dolomitas. Esto permitiría saber si el Fe, detectado en fluorescencia, estaba en la red de la dolomita o constituyendo un mineral específico y diferente.

Los resultados realizados sobre los tres tipos de rocas indican lo siguiente: (An-4/10 y An-4/11)

- En las calizas, con escasa dolomita, de espectro normal, no hay Fe y hay escaso Mg, debido al bajo porcentaje de dolomita.
- En las dolomias (dolosiltita), con espectros anómalos y prácticamente sin calcita el Mg es muy abundante y el Fe es muy escaso.
- En las calcisiltitas, con calcita mayoritaria y dolomita anómala hay Mg pero mucho menos que en el caso anterior pues el porcentaje de dolomita en la muestra es muy inferior y además hay algo de Fe.

Aunque las dolomitas del segundo caso indicaban claramente la imposibilidad de la presencia de ankerita, en el tercer caso aún podría haber una duda razonable. Esta cuestión quedó resuelta por el calentamiento ya que se obtuvo un espectro claramente diferenciado del crudo, (An-4/12).

En efecto, la línea 2.68 Å. de la dolomita, que solapa las líneas de la goethita, se desdobra al convertirse en la línea más intensa de la Hematites. Además se produce un cambio de color al

pasar de amarillo o beige claro del crudo pigmentado por goethita, a un tono rojizo, algo anaranjado, propio de la hematites (An-4/13).

Posteriormente en un estado más avanzado de la investigación con la obtención de imágenes de rayos x, obtenidas con microsonda de electrones, se confirmó esta ausencia de hierro en la mayor parte de este tipo de dolomitas (An-4/14.F-1), y solo se observó algún cristal con un pequeño nódulo en el núcleo de carácter silíceo, que además contenía cierta cantidad de potasio y hierro. (An-4/14.F-2)

Podemos, pues, afirmar que los anómalos espectros de estas dolomitas no pueden atribuirse a la variedad Ankerita por las siguientes razones:

- Las dolomías más puras no presentan Fe, según la fluorescencia de rayos X.
- En las calcisilitas dolomitizadas hay un cierto contenido de Fe, como indica la fluorescencia de rayos X, pero debido a la presencia de goethita en la matriz, que se transforma en hematites como consecuencia de haberse sometido a una temperatura de 300 C°
-
- El microanálisis con sonda de electrones de estos cristales de dolomita nunca da picos de "Fe" significativos.
- Las imágenes de rayos x obtenidas confirman que esta situación es la más general, y explica que las escasas excepciones se deben a pequeños nódulos de naturaleza silícea que contiene además hierro y potasio.

La bibliografía consultada coincide con esta hipótesis de que las dolomitas que presentan estos desplazamientos en el espectro de difracción de rayos X son dolomitas con un porcentaje en Ca superior al ideal estequiométrico y las denominan dolomitas cálcicas. En este sentido es especialmente significativo, según estos estudios, la presencia de la línea $d = 2.90 \text{ \AA}$, que es además el pico de intensidad máxima.

En efecto, M. E. Tucker, en su libro "Carbonate Sedimentology" (capítulo 8, 1990), explica como las sustituciones de Mg por Ca producen un incremento del espaciado cristalino, ya que el "Ca" tiene un radio iónico mayor. Por otra parte, las sustituciones de Mg por Fe, tipo Ankerita, también producen este tipo de aumento en las distancias reticulares, ya que el Fe tiene mayor radio iónico que el Mg. No obstante parece ser que los espaciados y las intensidades relativas son, en ambos casos, diferentes, siendo precisamente la línea $d = 2.90 \text{ \AA}$ la característica del primer tipo de sustituciones, y por tanto indicativa de un aumento del porcentaje molar del Ca CO_3 en las dolomitas.

Según la ecuación de Lumsdem (1980), y basándose en los datos de los estudios de Goldsmith y Graf (1958), para un espaciado cristalino de la línea $d(104) = 2.90 \text{ \AA}$ este porcentaje molar "N" del Ca CO_3 está en torno al 55%:

$$N(\text{CaCO}_3) = M * d(104) - B$$

Donde:

N = fracción molar de CaCO_3

M = 333.33

B = 911.99

d (104) = espaciado en angstrom, en este caso 2.90 Å

M y B son constantes estructurales cristalográficas determinadas por los estudios ya mencionados de Goldsmith y Graf (1958).

También indica M. E. Tucker que estas dolomitas cálcicas, que no cumplen con el ideal estequiométrico, están peor ordenadas estructural o cristalográficamente. Son, por tanto metaestables y, consecuentemente, más solubles.

Es muy importante señalar que esta anomalía espectral la presentan tanto las microdolomitas tipo "les Coves de la Pedrera" como las calcisilitas dolomitizadas tipo "Llorito", por lo que cabe deducir que ambas son dolomitas cálcicas, con estructuras reticulares muy similares. Por tanto, la zonación observada en los cristales de dolomita del tipo "Llorito" no es la estructura cristalina responsable de estos espectros anómalos y no tiene por tanto una relación directa con estas características estequiométricas.

4.3 ESTUDIO DE LA ZONACIÓN OBSERVADA EN LAS DOLOMITAS IDIOTÍPICAS

4.3.1 Introducción

En la cantera de "Les Coves de la Pedrera", como ya hemos indicado, además de los cristales de pequeño tamaño, que forma la mayoría de la roca, hay algunos cristales de dolomita dispersos, de mayor diámetro (entre 40 y 60 μm), que presentan algunas líneas de discontinuidad interna, que podrían interpretarse como bandas de crecimiento.

Las dolomitas cálcicas tipo "Llorito", presentan de forma más clara, una serie de bandas concéntricas, separadas por líneas de discontinuidad muy marcadas, posiblemente producidas por varias fases de crecimiento cristalino. Se puede pues considerar como una zonación concéntrica discontinua.

Esta zonación la presentan casi todos los cristales independientemente de su tamaño, dando una textura bastante heterométrica, con un aspecto euhédrico y un contorno rómbico, tienen un núcleo amplio de aspecto grumoso y algo oscuro. En cambio, las bandas exteriores son estrechas,

continuas, claras y muy paralelas. En las líneas de separación entre bandas de crecimiento hay numerosas inclusiones oscuras y marronáceas de micrita y óxidos de hierro.

Según las investigaciones realizadas (Choquette&Steinen 1980, GaWthorpe 1987), este tipo de cristales rómbicos con bandas de crecimiento, núcleos oscuros y bandas externas más claras suelen estar zonados químicamente. Otros autores (Land 1975) creen que estas bandas exteriores, más claras, son productos de fases de cristalización de soluciones más diluidas y pobres en carbonato calcico, lo cual también constituye una zonación química.

Se ha observado mediante MEB. que los núcleos de estos cristales de dolomita bandeada, tipo "Llorito", se alteran preferentemente con respecto a las bandas externas, tanto en cantera como en el monumento (aunque sea en los paramentos y sillares donde esta alteración diferencial parece más acelerada).

Este fenómeno podría hacer sospechar, pues, que existe una diferencia de composición entre el interior y la periferia del cristal.

Por otra parte H. Holail y otros (1988), describen una situación bastante similar a nuestro caso en una serie cretácica en el norte de Egipto. En una de las formaciones denominada "El Heiz" (Alto Cenomaniense) observan un disolución preferencial del núcleo de un cristal zonado, como producto de procesos de dedolomitización correspondientes a fases tardías de la diagénesis.

La zonación observada en las dolomitas por estos autores, tiene también carácter geoquímico pero a diferencia de las dolomitas estudiadas del mioceno de Tarragona en su caso su núcleo es siempre rico en Fe, es interesante observar que en ambos casos son dolomitas no estequiométricas.

4.3.2 Metodología y técnicas instrumentales

Para estudiar esta posible zonación se ha utilizado las siguientes técnicas:

- A: Microscopía electrónica de barrido (MEB) y microanálisis con sonda de electrones.
- B: Catodoluminiscéncia.

A: Microscopía electrónica de barrido (MEB) y microanálisis con sonda de electrones

1. Imágenes de contraste químico usando la emisión de electrones retrodispersados "back Scattered" (BSEAM)

La fracción de electrones retrodispersados es muy dependiente del número atómico y crece desde un 10% para el Carbono a valores superior al 50% para el Uranio (An-4/16).

Utilizando detectores sensibles a estos electrones se pueden conformar imágenes que muestran diferencias en el número atómico medio Z de los distintos puntos barridos por el haz de electrones (Goldstein 1981, Friel y Barbi 1990).

Podríamos definir el Z medio como:

$$\bar{Z} = C(i) Z(i)$$

Donde C (i) es la concentración de cada elemento (i) y Z (i) su número atómico.

Esta imagen de contraste químico nos dará distintas tonalidades de grises, siendo las más claras las que corresponden a (z) medio más altos y las más oscuras a los más bajos.

Se ha realizado numerosos análisis con esta técnica de diversos cristales tanto de cantera como de la Muralla Romana de Tarragona, para detectar una posible zonación y la evolución que sufre la composición intracristalina con el proceso de alteración.

2. - Determinación de perfiles de concentración Ca, Mg y Ca/Mg utilizando un sistema acoplado para espectrometría de rayos X

2. a - Condiciones instrumentales

Se seleccionó la energía de los electrones incidentes de tal manera que fuera el adecuado para una excitación eficiente de las líneas Ca. K y Mg. K, pero que al mismo tiempo produjera una baja penetración en la muestra.

Para ello se ha utilizado una simulación de "Montecarlo" (Ducumb, Reed, 1968. Ducumb 1971, Baró 1993), y se obtuvo que con 10 Kev la penetración estaba entorno a las 1.5 μm , además se permitía que la excitación eficiente de la línea K del Ca y K del Mg se produjera con sobrevoltaje de $U = E_o / E_c > 2$, condición mínima para la buena detección de un elemento.

Donde:

E_c = Energía característica de una línea de un elemento

E_o = Energía o sobrevoltaje necesario para su excitación

Si $E_o = 10 \text{ Kev}$ y $E_c (\text{K Ca}) = 4.038 \text{ Kev}$ y $E_c (\text{K Mg}) = 1.303 \text{ Kev}$.

Entonces

$$U = \frac{E_o}{E_c(\text{KCa})} = \frac{10\text{KeV}}{4.038\text{KeV}} = 2.49$$

$$U = \frac{E_o}{E_c(\text{KMg})} = \frac{10\text{KeV}}{1.303} = 7.67$$

La condición instrumental dada por $E_o / E_c > 2$ permite obtener la máxima probabilidad de excitación de una línea característica según se observa en la gráfica que relaciona la probabilidad de ionización (QE_c^2) con el coeficiente de sobrevoltaje (U) (Riveros 1994) (An-4/16).

Se seleccionó un número de puntos de análisis en correlación con las dimensiones del cristal y la sección del área excitada por el haz electrónico.

En nuestro caso los cristales de dolomita analizados están entre las 40 μm y las 60 μm y el área excitada entre una o dos micras, por lo que el número de microáreas elegido para la realización del perfil debía siempre oscilar entorno a 10 por cristal. Este procedimiento evita la solapación de información y facilita que el resultado sea significativo (An-4/17).

2. b - Técnicas de análisis y mediciones

2. b. 1 - Proceso analítico

Debido a la falta de estabilidad de la corriente de electrones en el MEB, se utilizó un elemento puro (Cu) de referencia para la determinación de los perfiles de concentración (Ca, Mg y Ca/Mg).

El método se basa en corregir las variaciones de intensidad de corriente que se dan entre los diferentes puntos de análisis intracristalinos mediante la adquisición de espectros sucesivos, alternando un punto del cristal con otro punto de la superficie del material de referencia. (An-4/15)

De esta forma podemos normalizar intensidades obtenidas y relacionarlas directamente con las variaciones relativas de concentración del Ca y del Mg en el cristal.

2. b. 2 - Contaje y selección de ventanas

(An-4/15)

La cuantificación de la intensidad del pico, se realiza por la integración automática del número de cuentas comprendidas en una porción del ancho de la línea preseleccionada, que se considera representativa para cada tipo de elemento.

Al respecto se eligió un ancho correspondiente al 96% del pico ($\text{fwhm} = 2.35$), que corresponde al área central comprendida entre los canales que representan la mitad de la intensidad máxima.

Para establecer las intensidades relativas representativas de la concentración teórica de cada elemento se realiza los cocientes de la intensidad del Ca. k y el Mg. k respecto al patrón en este caso el Cu. L como factor corrector de la oscilación de corriente.

Finalmente se puede realizar ratios Ca. k/Mg. K, y observar la distribución en el perfil analizado.

3. - Imágenes de Rayos X

En este método analítico se obtienen imágenes de rayos x mediante el barrido de un haz de electrones (0.1-1 μm), y la selección de ventanas en el espectrómetro (SDE y/o WDS), que permiten observar la emisión característica de elementos previamente seleccionados. (Friel y Barbi 1990).

La elevada estabilidad de su corriente de sonda permite realizar análisis cuantitativo de mayor precisión y fiabilidad.

Hemos trabajado sobre lámina delgada petrográfica sin cubrir, y con pulido metalográfico, y metalizadas con "C".

Se obtuvieron imágenes de Si, Ca, Mg, K, Fe, Na, y además se realizaron sobre las imágenes perfiles intracristalinos de concentración relativa para "Ca", "Mg".

Estas imágenes se obtuvieron utilizando una Microsonda CAMECA SX50 y un microscopio electrónico de barrido JEOL 840, con capacidad de análisis, el software utilizado por el equipamiento es el AN10000-EDS, y la obtención del mapa de elementos se realizó mediante un software específico desarrollado para el JEOL 840, el DIGIPAD de LINK.

B. - Catodoluminiscencia

Esta técnica excita los centros luminiscentes del mineral, mediante un haz de electrones de energía relativamente baja (Marshall 1988).

Las interacciones con la muestra son similares a las que suceden en el microscopio electrónico (ver An. 8/1), pues la técnica instrumental se basa también en el bombardeo con un haz de electrones, pero el volumen de mayor eficiencia catodoluminiscente es algo más profundo que el volumen de emisión de rayos x y del continuo.

Las características de la emisión (color-longitud de onda) son específicas del tipo de mineral y sus centros o elementos luminiscentes.

El aparato utilizado es un microscopio con dispositivo específico para catodoluminiscencia (Technosyn Luminiscence model 8200 MKII, de la casa NIKON). Las condiciones de trabajo han sido un voltaje entorno a 10 keV y una corriente de sonda entre 300 y 400 μ A, este rango de intensidades evita cualquier modificación del color y la intensidad de la luminiscencia.

La muestra analizada ha sido una lámina delgada sin cubrir y con pulido metalográfico.

Debido a la debilidad de la luminiscencia, y por tanto al elevado tiempo de exposición que sería necesario, no se pueden obtener fotografías de una mínima calidad, aunque este método ha servido para confirmar las observaciones llevadas a cabo con las otras técnicas ópticas e instrumentales y realizar esquemas de la luminiscencia intracristalina de las dolomitas idiomórficas zonadas (An-4/30).

4.3.3 Resultados

1 - Perfiles intracristalinos de concentraciones de Ca, Mg y Ca/Mg, utilizando un sistema acoplado, para espectrometría de rayos x

Se realizó una adquisición seriada con 5 ó 10 puntos de análisis intracristalino, según la dimensión del cristal (An-4/17), lo que nos ha permitido determinar que existe tres tipos de distribuciones Ca/Mg:

Distribución Ca/Mg, tipo A

Presentan un núcleo con un elevado descenso del contenido de Mg. En cambio en las bandas externas este elemento es mucho más abundante. En todo el cristal el calcio predomina sobre el magnesio ratificando su carácter de dolomita cálcica (An-4/16, An-4/18, An-4/19 y An-4/20).

Se trataría pues de una zonación química, concéntrica y paralela a las líneas de discontinuidad o bandas de crecimiento.

Distribución tipo B

El dominio del Calcio sobre el Magnesio es general y bastante constante en todo el cristal independientemente de sus bandas de crecimiento, (dolomita cálcica), apenas hay zonación química, excepto en las líneas o franjas de discontinuidad, donde apenas hay Magnesio.

Distribución tipo C

Es un caso muy similar al caso A, pero presenta pequeñas áreas irregulares en los bordes y esquinas del cristal, donde el descenso de la concentración de magnesio es muy acusada, estas áreas calcificadas coinciden con las zonas teñidas en rojo como calcita, observadas en microscopio óptico.

En conclusión todos estos cristales tienen un déficit de Mg, son dolomitas cálcicas, con bandas de crecimiento lo que le da un aspecto zonado, separado por franjas de discontinuidad sin apenas Mg. Las bandas más externas son casi siempre más ricas en Mg que el núcleo, ya que la distribución tipo "A" es la más frecuente y por tanto suelen tener una zonación química paralela a las bandas de crecimiento. La calcificación posterior puede afectar las esquinas del cristal (distribución tipo C), corresponden a muestras de roca que proceden de áreas superficiales y más alteradas del yacimiento.

2 - Imágenes de contraste químico ("Back Scattered")

Las imágenes obtenidas, de los cristales, sobre los que se había realizado los perfiles de concentración, no presentan contraste, ni permiten observar variaciones substanciales de brillo o color, que indique las diferencias químicas, que existen entre el núcleo y las bandas más externas del cristal (An-4/21), incluso en aquellos cristales que tienen diferencias notables, como hemos indicado con la distribución tipo "A".

Esto se debe probablemente a que a pesar de estos cambios cristaloquímicos, no existe una variación suficiente del Z medio, entre ambas zonas.

Se ha de tener en cuenta, que según la fracción molar de calcita (55%) deducida de la ley de Lumsden (1979), este Z medio está entorno a 9.28, pues es una dolomita cálcica, y el núcleo simplemente tiene una fracción molar de calcita algo mayor, lo cual poco puede hacer variar este valor de Z medio.

3 - Determinación de perfiles de concentración Ca, Mg por espectrometría de rayos x, en microsonda (CAMECAS. X50)

Se comprobó la disminución de contenido de Mg, en los núcleos de estos cristales zonados con distribución Ca/Mg tipo A, y se observó, en cambio, que la concentración de Ca apenas variaba de un punto a otro del cristal, (An-4/22). Estas mediciones tenían un importante significado por la alta estabilidad de corriente con que trabaja la microsonda CAMECA. X50. También se comprobó la distribución algo parchada o calcificación de las esquinas de algunos cristales.

4 - Imágenes de rayos X-Mapping en Z

Se estudió varios cristales zonados, en el MEB Jeol 840, y se observó que muchos cristales presentaban, una distribución tipo "A" esto es con una disminución de magnesio en el núcleo, lo que se mostraba como un oscurecimiento de la zona central intercrystalina, en el mapping de este elemento (An-4/23.F-1 y F-2)

Los perfiles realizados sobre este tipo de "mapping", confirmaban este descenso en la concentración de magnesio (An-4/24.F-1 y F-2)

Por otra parte los "mapping en Z" obtenidos para el Ca, confirmaban su escasa variación de concentración en el interior del cristal. (An-4/23.F-3)

Se detectan algunos cristales, que apenas presentan variaciones en su imagen en Z, correspondiente al magnesio, entre el núcleo y sus bandas más externas, excepto en las líneas de discontinuidad interna (An-4/25, An-4/26 y An-4/27), esta situación es claramente coincidente con la distribución Ca/Mg tipo "B".

También se pone de manifiesto que algunas líneas de discontinuidad tienen un perímetro quebrado (An-4/29), lo que podría indicar que la banda más externa envuelve un aglomerado de pequeños cristales de protodolomitas precursoras de la fábrica idiotípica.

Otros cristales presentan además una inclusión en el núcleo de un mineral compuesto de silicio, hierro y potasio (An-4/27 y An-4/28), posible residuo de la nucleación cristalina inicial.

5 - Observación en catodoluminiscencia

(An-4/30)

Hemos observado las texturas de las dolomitas de las "Coves del Llorito", con fábricas idiotípicas de cristales zonados, teniendo en cuenta las siguientes características luminiscentes de los minerales estudiados:

- La calcita da una intensa luminiscencia naranja
- La dolomita, especialmente las bandas de crecimiento más externas y estequiométricas adquieren un color marrón grisáceo o incluso no es luminiscente
- Los núcleos deficitarios en magnesio de las dolomitas zonadas también presentan una luminiscencia de color naranja similar a la de la calcita
- El cuarzo y las arcillas ricas en potasio, dan luminiscencia azul.

Se ha observado 7 tipos de cristales rómbicos luminiscentes (An-4/30):

- 1.- Núcleo de perímetro rómbico luminiscente, con una banda más externa marrón oscura, escasamente luminiscente.

- 2.- Disposición similar a la anterior, pero con una banda interior marrón oscura apenas luminiscente.
- 3.- La banda más externa es marrón oscura poco luminiscente, el núcleo si, pero a diferencia del primer caso, presenta una pequeña área no luminiscente en el interior del núcleo.
- 4.- Muy similar a la anterior pero su área central es de contorno difuso.
- 5.- El cristal es todo el luminiscente pero presenta una estrecha banda interior no luminiscente.
- 6.- Es exactamente la situación inversa al primer caso, núcleo no luminiscente y banda más externa luminiscente.
- 7.- El cristal es totalmente luminiscente excepto un pequeño punto central.

En algunos de los cristales se ha observado además que esta zonación presentaba una discontinuidad o rotura, cuyo significado discutiremos en las conclusiones, en el apartado 4. 4.

Interpretación de la observación en catodoluminiscencia

- La mayoría de cristales rómbicos observados en las preparaciones corresponden al primer y segundo caso, el tercer y cuarto caso son mucho menos frecuentes, todos ellos son cristales de dolomita.
- Los casos cinco, seis y siete, son cristales de calcita esparítica, de neoformación, con inclusiones de dolomita o silicatos no luminiscentes o minerales con hierro.
- Los cuatro primeros casos, presenta una luminiscencia que corresponde a las variaciones de distribución de magnesio, detectada por las técnicas anteriores con microsonda de electrones, esto es un núcleo pobre en magnesio y una banda más externa más dolomítica o estequiométrica, esto es la distribución Ca/Mg tipo A.
- El segundo caso nos indica la posibilidad de varios ciclos de cristalización, con alternancias en el contenido de magnesio.
- El tercer y cuarto caso se corresponden bastante con las imágenes de rayos X obtenidas en la microsonda CAMECA, indicarían la presencia de inclusiones no luminiscentes de silicatos y/o hierro en el núcleo del cristal restos del proceso inicial de nucleación cristalina. (An-4/27, An-4/28 y An-4/14.F-2).
- Los casos 5, 6 y 7 con predominio general del aspecto luminiscente los relacionamos con procesos de dedolomitización, en concreto con el caso ya descrito de una fábrica hipidiotípica (tipo A2) de dolomicroesparita que sustituye a los cristales rómbicos zonados (tipo A1), y que a su vez es sustituida por una fábrica de microesparita generada por procesos de calcificación (DT). Esta última fábrica luminiscente como es de calcita aparece teñida de rojo en microscopio óptico si se utiliza la técnica ya mencionada (An-4/31).

Conclusión: La luminiscencia observada no coincide con la descrita en otras fábricas dolomíticas según la bibliografía (Valero Garces y Gisbert, 1993), en donde la proporción de hierro y manganeso parecen controlar el fenómeno y el tipo de coloración. Precisamente nuestro caso se aparta de lo habitual porque los cristales de dolomita de estas fábricas miocénicas apenas contienen este tipo de elementos. Aunque desconocemos el mecanismo exacto que explique la sucesión luminiscente observada, no hay duda, en cambio, de que las secuencias luminiscentes detectadas están claramente relacionadas con la zonación química intracristalina de las fábricas idiomórficas.

4.4 ORIGEN Y EVOLUCIÓN DIAGENÉTICA DE LAS FÁBRICAS DOLOMÍTICAS

Hipótesis de solución a diversos problemas planteados.

1.- ¿Pueden tener un origen detrítico los cristales de dolomita euhédricos zonados?

La posibilidad de que estas dolomitas sean clastos, producto de una removilización de un sedimento anterior tiene los siguientes argumentos:

- **A favor:**

- En catodoluminiscencia se observa una discontinuidad o posible ruptura de la zonación (An-4/30).
- El carácter detrítico del sedimento, con numerosos clastos de cuarzo
- La distribución de estos cristales que son más abundantes hacia el techo de la serie, podría haber sido causada por una erosión progresiva de un estrato anterior.

- **En contra:**

- Los cristales están bien conservados, con un perfil rómbico bastante completo y definido, lo que hace difícil admitir la posibilidad de un transporte.
- Los cristales no están flotando en la matriz, si no que suelen estar en contacto y frecuentemente interpenetrados.
- La posible ruptura de la zonación, que se observa en catodoluminiscencia, no se corresponde como hemos dicho con la del cristal, pensamos que esta estructura puede ser explicada por una interfase de disolución, anterior a la cristalización de la banda más externa, rica en magnesio. Esta hipótesis de disolución explicaría el contorno redondeado o de caras curvas que presentan muchos núcleos y las numerosas inclusiones minerales que presentan estas líneas de discontinuidad intracristalina.
Este proceso de disolución entre las fases de crecimiento cristalino han sido descritos en numerosa bibliografía (D. P. Buelter, R. Guillemette 1988; M. E. Tucker, V. P. Wright, 1990) y es muy frecuente en casos de protodolomitas, no estequiométricas, que son más solubles.

- Por lo expuesto pensamos que el origen más probable es la dolomitización parcial por sustitución de un sedimento mixto carbonatado-siliciclástico, con varias fases de desarrollo, alternada, con otras de disolución.

2.- ¿Cual es la secuencia diagenética de las fases de cemento y neoformación cristalina ?

(An-4/31)

El proceso de dolomitización de estos sedimentos carbonatados siliciclásticos, se inicia con la fábrica idiotípica, de cristales euhédricos.

Es difícil averiguar cual es la textura primaria de carbonato anterior al proceso de dolomitización, por las numerosas transformaciones sucesivas que ha sufrido durante la diagénesis; pero hay indicios indirectos de que fue el fino sedimento de la calcisiltita original lo que sufrió una dolomitización parcial y por fases. En este sentido hay numerosas descripciones ya publicadas (Evamy, 1967) de procesos de dolomitización, que se desarrollan a partir de finos sedimentos carbonatados ("mudstone" - "siltstone").

En efecto, ya hemos comentado que las imágenes de rayos x, nos han revelado la presencia de inclusiones silíceas dentro del núcleo de estos cristales de dolomita, que corresponden a pequeños fragmentos del sedimento siliciclástico original.

Ademas las líneas de discontinuidad presentan inclusiones oscuras tamaño micrita que corresponden también al sedimento original, y se corresponden con fuertes descensos de magnesio detectado en los perfiles intracristalinos de concentración Ca, Mg, realizada en microsonda de electrones. Este tipo de crecimiento a partir de una fina matriz carbonatada, y de bioclastos de algas, ya ha sido descrito por Land (1973), en nuestro caso los clastos y el contenido arcilloso con magnesio en composición, pueden haber favorecido el proceso de reacción o nucleación.

Esta fábrica idiotípica se inicia con la formación de un cristal con un tamaño entre 10 y 20 μm , que compone la mayor parte de los núcleos de las dolomitas euhédricas zonadas, es probable que se trate de una protodolomita, termino introducido por Goldsmith y Graf (1958), para indicar una dolomita poco ordenada cristalográficamente. Situación estructural que facilita las anomalías estequiométricas observadas en estas dolomitas, con un significativo aumento de la fracción molar del carbonato cálcico (entorno al 55%).

Este proceso de formación explica la presencia de estos núcleos deficitarios de magnesio, detectados en espectrometría de rayos x tanto en MEB, como en microsonda electrónica.

Como ya hemos indicado esta fábrica idiotípica tiene un carácter polifásico, con etapas de disolución y otras de crecimiento, y finalmente siempre hay una fase desarrollo rica en magnesio, más estequiométrica, que compone la banda más externa.

Después de esta primera fase de dolomitización, se produce probablemente una fase de cemento esparítico tipo "blocky" que se localiza preferentemente, en los niveles superiores de la serie de ambas formaciones (CCO. 3, CLZ3 Y CLZ9).

Posteriormente a estas dos episodios diagenéticos, se produce una segunda fase de dolomitización, que produce la sustitución parcial o total según los niveles, de las dos fábricas anteriores por una fábrica hipidiotípica de microdolomita. Por razones que inicialmente no son

evidentes y que discutiremos en el siguiente apartado, esta fase es más intensa hacia el norte de la cuenca y cuanto más nos alejamos del paleorelieve (An-4/7).

Finalmente se produce una nueva fase de formación de cemento esparítico y microesparítico, que sustituye a su vez a la fábrica hipidiotípica (CLZ5).

De forma mucho más tardía se inicia procesos de dedolomitización y disolución diferencial relacionados con la erosión subaérea y las filtraciones freáticas.

3.- ¿Cómo ha afectado la dedolomitización a estas texturas de la facies calcisilita?

Debemos señalar las siguientes conclusiones de este estudio petrográfico de los materiales de cantera:

1.- El proceso se detecta fundamentalmente en "Les Coves del Llorito" y no afecta toda la serie por igual pues no está muy desarrollado. El estudio en lámina delgada permite ver (An-4/31), que existe dos procesos diferentes:

- A-La sustitución de las fábricas idiotípica (An-4/32.F-1 y F-2) e hipidiotípica por microesparita (An-4/31), proceso que tiene un desarrollo muy desigual según los tramos estratigráficos.
- B- La disolución diferencial de los cristales de dolomita euhédrica, tanto en los sustituidos como en los no sustituidos.

Ambos procesos de sustitución y disolución lógicamente están separados en el tiempo. Su estudio en microscopio petrográfico permite ver lo siguiente:

- A.- Se observa en la serie de "Les Coves del Llorito" una sustitución progresiva de cristales de dolomita hipidiotípica por cemento microesparítico. Así en lámina delgada tratada con tinción selectiva de calcita, se observa cristales euhédricos de la fábrica idiotípica sustituidos previamente por una fábrica de dolomita hipidiotípica. An-4/2.F-1 y An-4/5.F-2, están teñidos de rojo, a veces parcialmente y a veces totalmente (An-4/32.F-1), indicando por lo tanto una calcificación de esta textura.
- B.- La alteración diferencial de los cristales euhédricos de dolomita presenta una estructura y porosidad diferente dependiendo de la fábrica, lo que produce los siguientes casos:

B-1: Cristales euhédricos sustituidos por fábricas hipidiotípicas. (An-4/31)

Inicialmente se manifiesta por un poro pseudocircular, a veces de contorno muy irregular que se puede asimilar a una porosidad tipo móldico intracristalino, si el proceso continúa el resultado final es un poro de contorno rómbico *sin restos del cristal*.

B-2: Cristales euhédricos no sustituidos por fábricas hipidiotípicas.

Estos cristales zonados presentan una disolución diferencial de sus núcleos muy intensa, afecta por tanto a la zona interna más deficitaria en magnesio. El proceso produce finalmente *poros rómbicos con una carcasa residual*, correspondiente a la banda más rica en magnesio.

- 2.- Esta dedolomitización y por supuesto la disolución diferencial posterior no es responsable de la zonación geoquímica observada en la fábrica idiotípica, ni de la no estequiometría de las dolomitas de esta facies calci-dolosilita.

Podría pensarse que esta distribución intracristalina de calcio y magnesio es producto de la calcificación tardía de estas fábricas y no de su proceso de formación, pero existen claros indicios de que es el proceso de crecimiento cristalino el responsable de esta zonación, por las siguientes razones:

- Las discontinuidades internas del cristal, debidas a las fases de crecimiento son las que marcan los cambios en la composición.
- Este tipo de zonación con un núcleo pobre en magnesio, esta ampliamente descrito en la bibliografía consultada, ya comentada.
- Esta zonación se observa en cristales euhédricos, que están parcialmente sustituidos por la fábrica hipidiotípica, lo que indica que esta distribución intracristalina del calcio y el magnesio son anteriores a esta sustitución.

Hemos de insistir finalmente que la porosidad intracristalina y la calcificación de la textura, no es un proceso muy desarrollado, y hay niveles como el CLZ.7 donde apenas se observan.

4.- Hipótesis sobre los modelos posibles de ambientes de dolomitización

En primer lugar indicar que sin un estudio regional más amplio y una cartografía detallada del Mioceno de la zona de Tarragona, que permita una reconstrucción paleogeográfica y paleoambiental, es difícil asegurar un modelo, además por el propio tamaño de los cristales y su dispersión es muy difícil técnicamente (al menos con los laboratorios disponibles) de realizar un estudio isotópico completo. Así pues solamente indicaremos algunos parámetros y características texturales y mineralógicas que pueden sugerir un modelo u otro.

Otro problema adicional reside en que la existencia de dos fases de dolomitización que además son muy diferentes en su distribución y tipo de fábrica, pero similares en su anómala estequiometría mineral como dolomitas cálcicas lo que hace muy difícil discernir si corresponden o no a un mismo modelo o ambiente.

De los cinco modelos más admitidos en la bibliografía científica (Tucker 1990), hay que eliminar todos aquellos que impliquen una formación de depósitos evaporíticos, ya que estos no se han localizado en ningún nivel de la serie.

La presencia de palygorskita se ha asociado en otras formaciones del Mioceno que tienen un carácter más continental con un modelo de "seepage-reflux" evaporación-reflujo (Pozo, 1986), pero esta hipótesis sigue estando asociada a procesos y formaciones evaporíticas, que aquí no se han detectado.

También es poco probable que el proceso de dolomitización esté relacionado con flujos geotermales del interior de la tierra, asociado a sistema de fallas profundas, pues aunque en parte la tectónica de la zona permite especular sobre esta posibilidad, sobre un modelo tipo "Kohout convection", este tipo de ambientes, suele ir acompañado de mineralizaciones por fluidos termales y una mayor proporción de Mg y Na, que lo detectado en los análisis intracristalinos que se han realizado (microsonda y análisis de rayos x). Desgraciadamente por la naturaleza de la propia textura y por razones técnicas, insistimos, no se ha podido realizar un análisis isotópico que descarte totalmente esta posibilidad.

En definitiva las características de estas facies encajan bastante con un proceso de dolomitización parcial descrito en la formación "Hope Gate" de Jamaica, descrita por Land (1973), e interpretada como "Mixing-Zone", esto es zona de mezcla de aguas continentales y marinas, debidas a oscilaciones del nivel eustático, la semejanza con este ejemplo se basaría en lo siguiente:

- Ausencia de depósitos evaporíticos
- El carácter no estequiométrico de las dolomitas cálcicas, común a ambos tipos de fábricas y yacimientos.
- El bajo porcentaje de Mg, especialmente en los núcleos primarios, de carácter protodolomítico.
- La no detección de Na, en los análisis intracristalinos y en imágenes de rayos X realizados en MEB y microsonda.
- Somerización de los niveles superiores de estas facies.
- La existencia de discontinuidades sedimentarias, algunas incluso carstificadas asociadas a este proceso de somerización.

Por otra parte estas fábricas por sus características cristalinas, especialmente la fábrica idiotípica, con su zonación y su anómala estequiometría, así como los procesos de dedolomitización-disolución observados, coinciden con el caso descrito de la formación "El Heiz" (Egipto) del alto cretácico (H. Holail y otros 1988) que también es interpretado como "Mixing Zone".

También en este yacimiento cretácico de Egipto existe la presencia de una discontinuidad sedimentaria, que en nuestros yacimientos cercanos a Tarragona es la que existente entre las dos facies miocénicas estudiadas.

5.- Hipótesis sobre las relaciones entre la evolución de la cuenca por movimientos eustáticos y la fases de dolomitización

(An-4/33)

Quedan dos preguntas por contestar sobre la naturaleza de estas fábricas y yacimientos:

La primera es encontrar una explicación a la distribución espacial de las dos fases de dolomitización, con dos fábricas diferentes, la idiotípica inicial y la hipidotípica posterior.

¿Por qué la fábrica idiotípica es más abundante hacia el techo de la serie que aflora en las Cuevas del Llorito y la hipidotípica, de menor tamaño, es más abundante hacia el interior de la cuenca y en las partes bajas de la serie? (An-4/7).

La segunda es aún más desconcertante si cabe. ¿Por qué ambos tipos de fábricas, tan diferentes en tamaño y distribución, separadas en el tiempo, en cambio presentan el mismo tipo de anomalía espectral, esto es son dolomitas cálcicas, no estequiométricas, con fuertes déficits en magnesio?

Existen dos factores clave para entender este fenómeno:

- Las diferencias topográficas actuales entre ambos yacimientos representan notables diferencias batimétricas de su sustrato rocoso, lo que no solo han condicionado su sedimentación, si no también su evolución diagenética.
- Los movimientos eustáticos, cuya existencia se ve confirmada por estructuras sedimentarias ya citadas y que son altamente significativas.

Aunque no es absolutamente necesario un modelo de tipo "Mixing Zone" para resolver este problema, su aplicación facilita la solución, lo que por otra parte lo hace aún más probable.

En efecto si analizamos el mapa topográfico actual a escala 1: 5000, hoja 34-18 (473) serie L de Tarragona, "Les Coves de la Pedrera", situadas en el valle del Río Francolí, se sitúan entre la cota 15 y 40 m aproximadamente, sobre el nivel de mar actual. En cambio Las "Coves del Llorito", se localizan, en la ladera norte de las colinas de Ntra. Sra. del Loreto, a una cota claramente superior entre los 40 y los 60 m., lo que queda evidente en un corte topográfico de dicho mapa (An-4/33).

Si bien estas cotas pueden haber variado por movimientos tectónicos, estos no son de suficiente entidad, como para modificar en lo substancial esta diferencia, y lo que hoy observamos es muy similar a la situación paleogeográfica original.

Así podemos considerar que ambos yacimientos son los restos de los depósitos de dos antiguas cubetas miocénicas, separadas por un umbral-isla, que hoy en día corresponde a los altos del barrio de San Pablo y San Pedro, próximos a Tarragona. "Les Coves de la Pedrera" correspondería a una cubeta más profunda, tipo bahía, según refleja los estudios estratigráficos y paleogeográficos de la tesis doctoral de Trilla (1971). En cambio las "Coves del Llorito" era un pequeño estuario de escaso fondo, con gran cantidad de aportes detríticos.

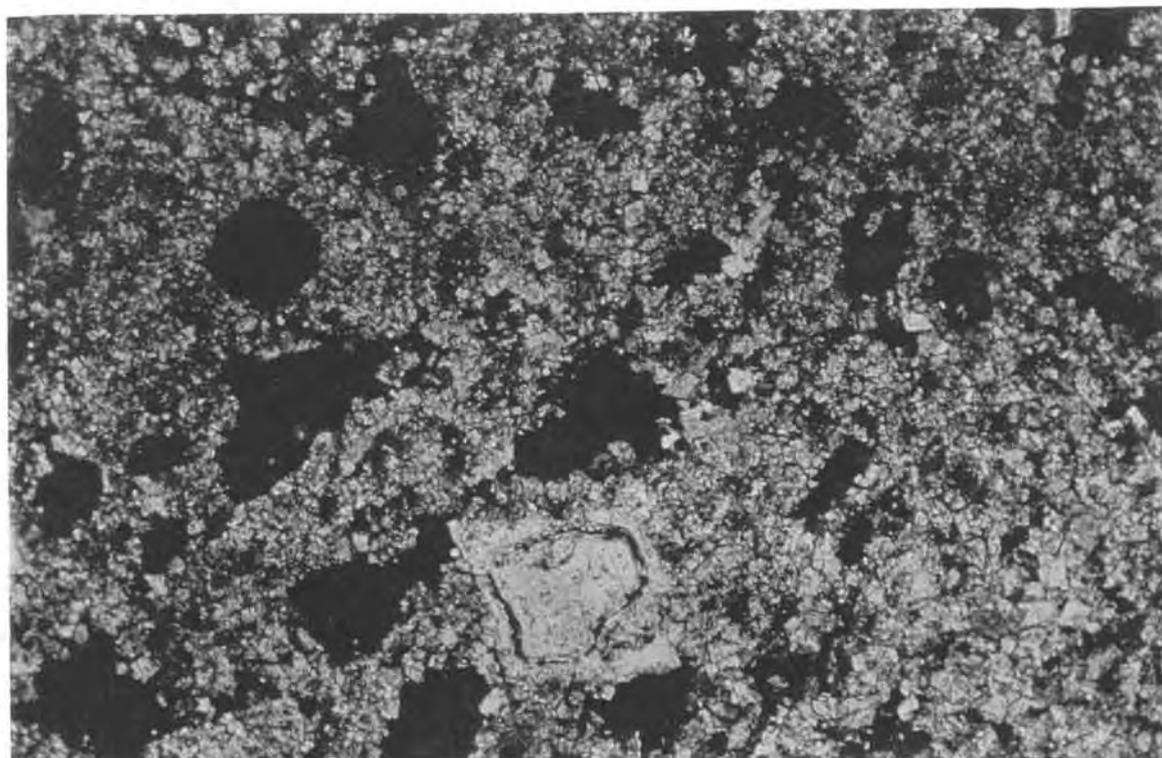
La primera fase de dolomitización es más extensa y general, se produce con un nivel de mar muy alto, que recubre ambas cubetas, dejando solo en exposición aérea, las colinas precosteras y los altos y umbrales-isla ya mencionados. La inestabilidad de este alto nivel de mar, presenta numerosas oscilaciones, que explican el carácter polifásico de la primera fábrica de tipo idiotípica.

La segunda fase más tardía, representa un nivel de mar más bajo, ya en franca regresión, pero bastante constante, este descenso deja fuera de la influencia de las aguas freáticas marinas, la parte superior de la cubeta de las "Coves del Llorito", situada en una cota más alta. Esta situación explica porque en estas zonas se preserva mejor la primitiva fábrica idiotípica.

Por el contrario en las zonas bajas y cuanto más nos alejamos del relieve emergido, la influencia de las aguas marinas es mayor, esto explica la casi total desaparición de la fábrica idiotípica en "Les Coves de la Pedrera" y su substitución por la hipidiotípica.

No es descartable, como insinúan varios autores entre ellos el propio Land, que este modelo de "Mixing Zone", tenga un control climático, por periodos húmedos que activan la circulación del nivel freático continental.

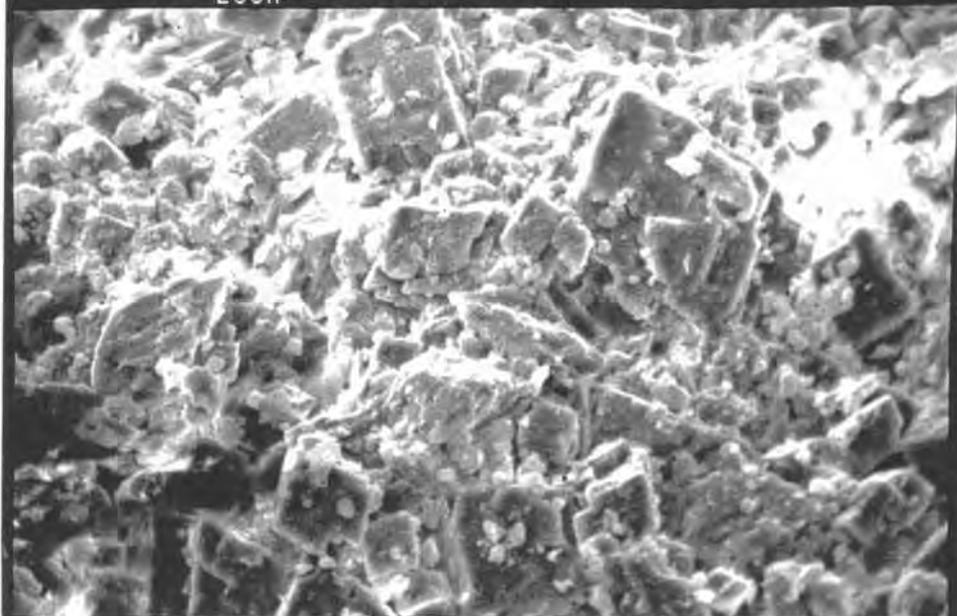
Pero este esquema de evolución de la cuenca explica también las semejanzas estequiométricas entre ambas fábricas, ya que existe una coincidencia ambiental entre ambas fases de formación. En efecto el modelo de dolomitización es el mismo, pues al bajar de cota el nivel de mar, no varía substancialmente la naturaleza química de las aguas marinas y continentales que se mezclan en los poros de la roca y, por tanto, las condiciones geoquímicas son substancialmente las mismas, solo que trasladadas en el tiempo a cotas más bajas por movimientos eustáticos. En definitiva la semejanza estequiométrica representa una semejanza ambiental.



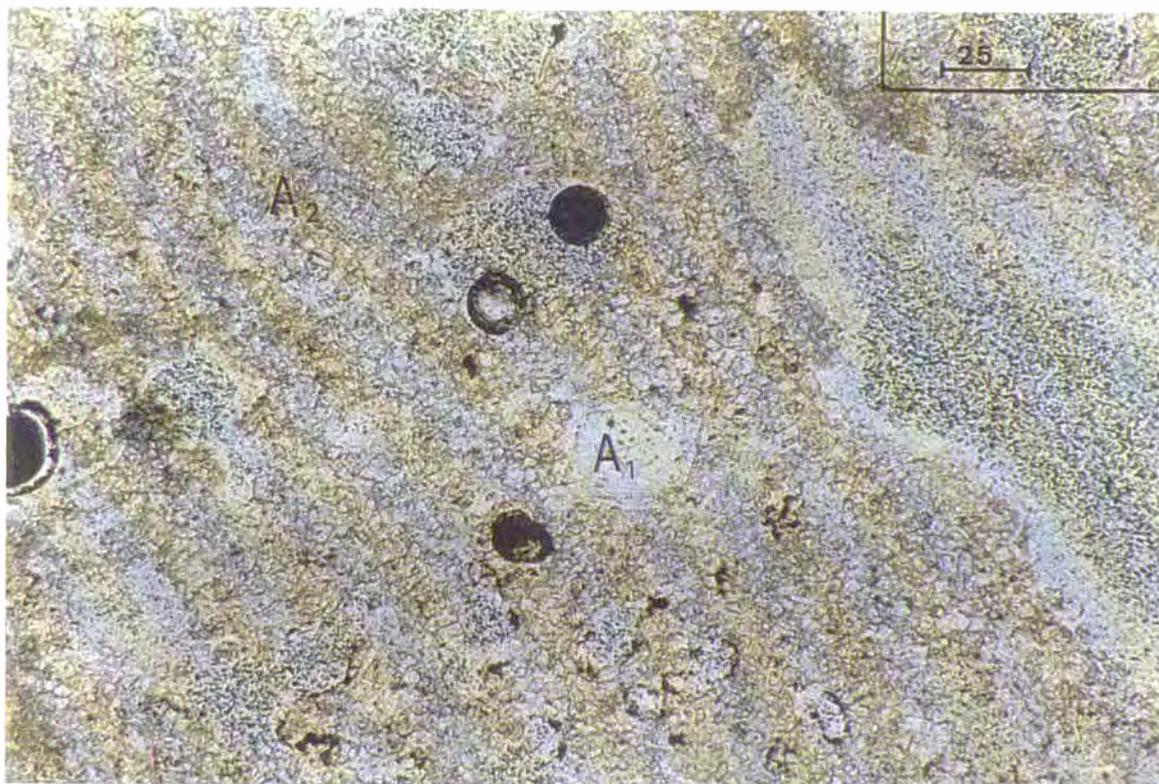
An-4/1.F-1 LCCO.1.1/ NC (50 x)



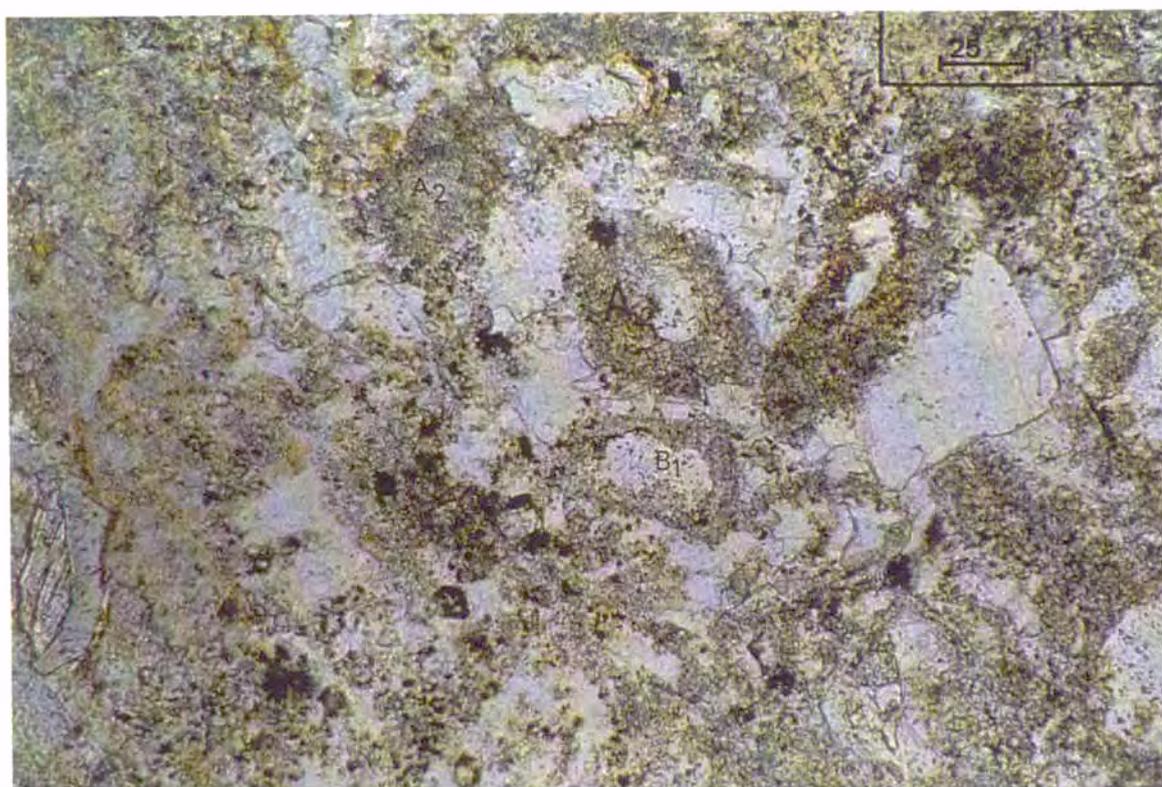
1.12KX 15KV WD:29MM S 03213 P 00007
 20UM



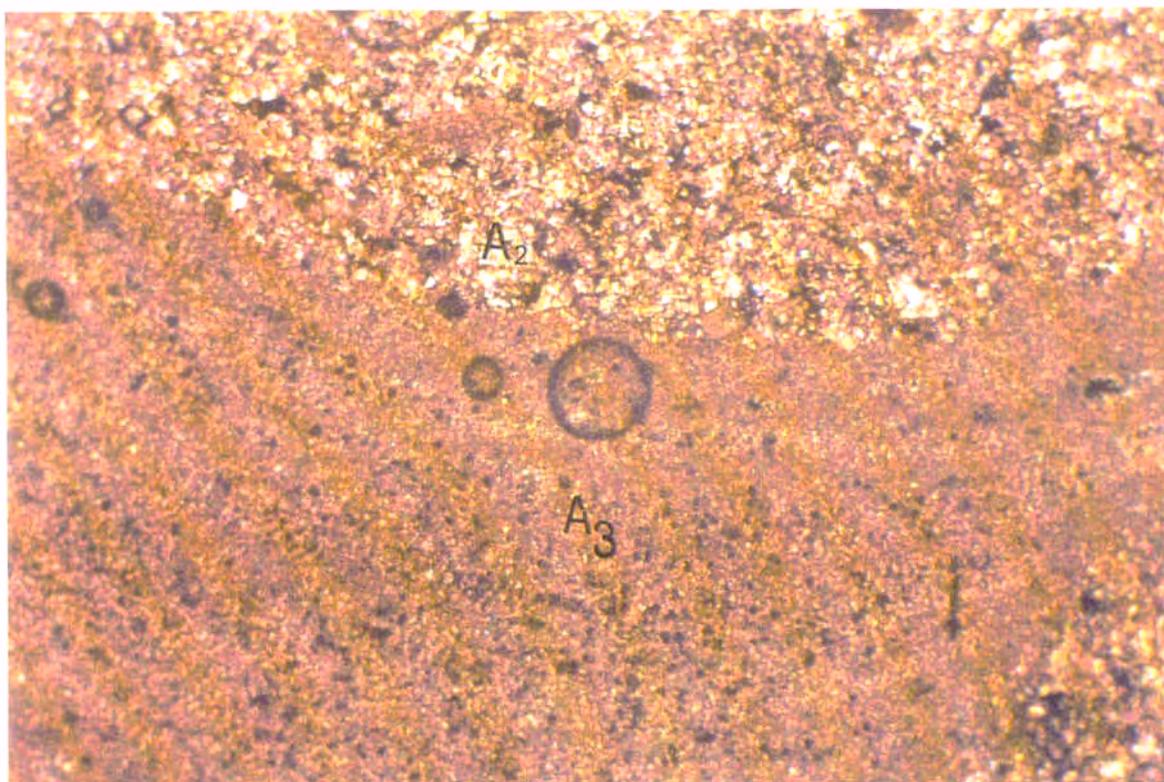
An-4/1.F-2 LCCO.1.1. Imagen de las dos fábricas dolomíticas en M.E.B.



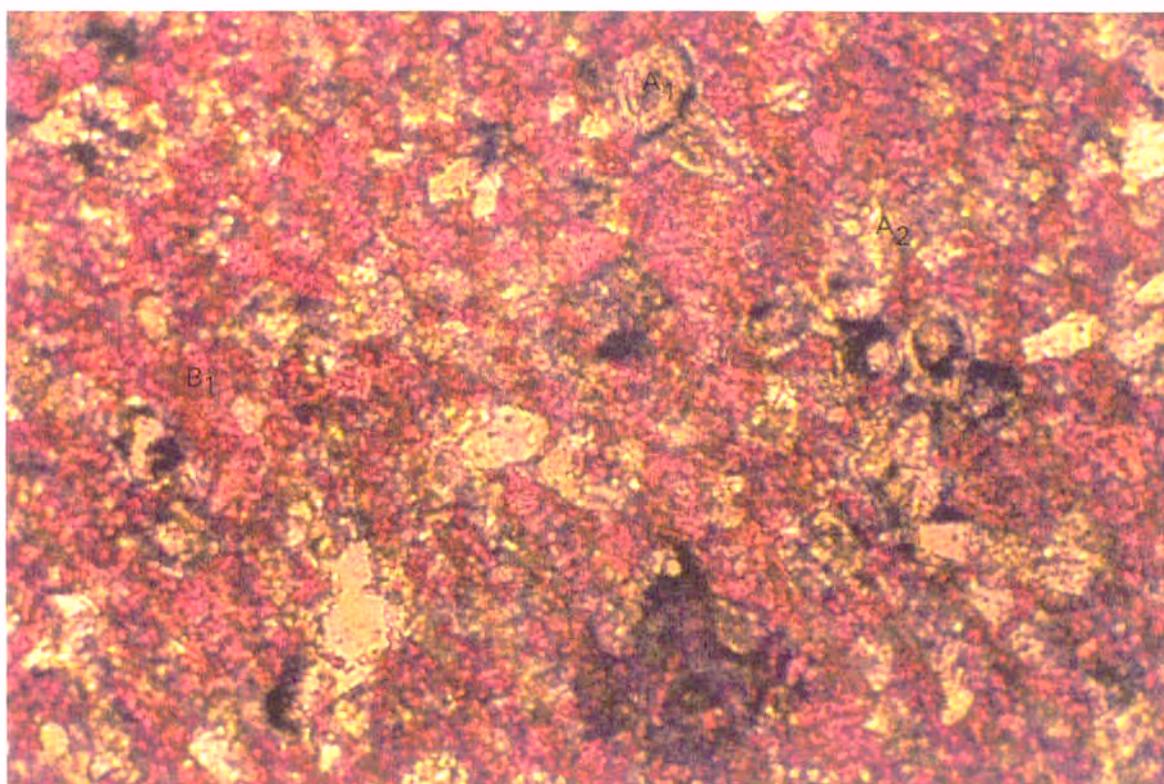
An-4/2.F-1 LCCO.1.1/ NP (40 x)
Sustitución de la fábrica idiosintópica A₁ por la fábrica hipidiotípica A₂



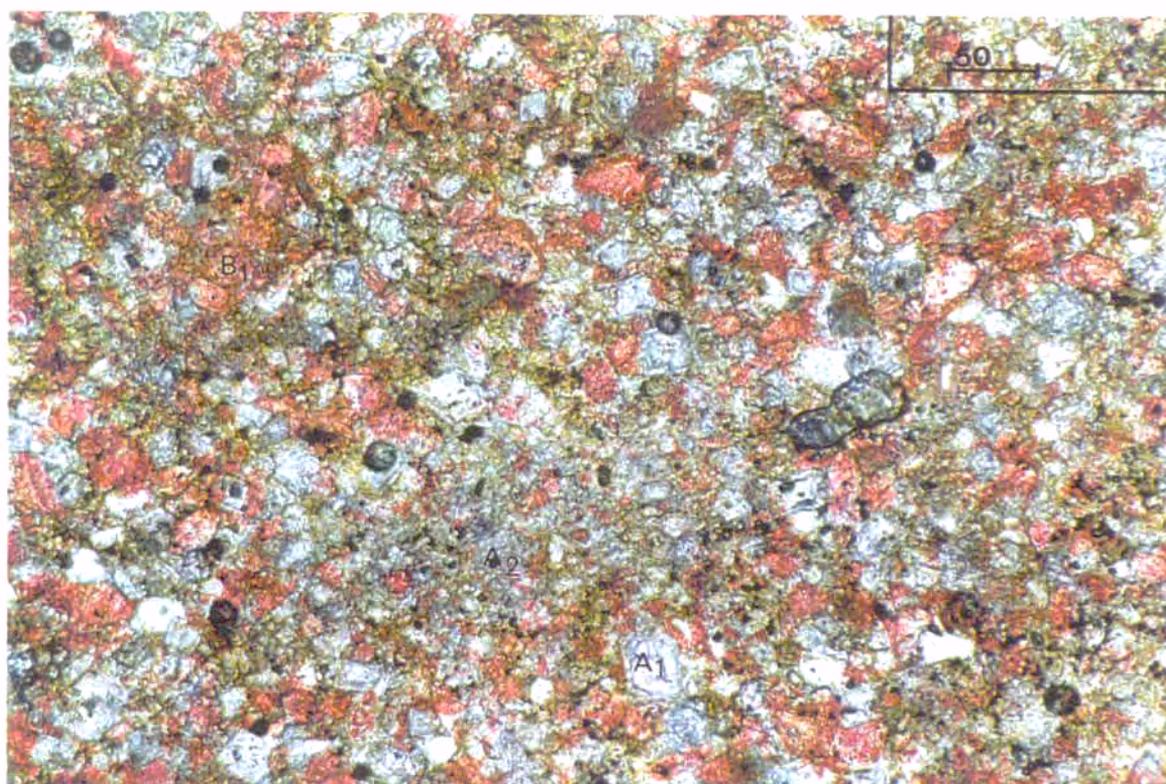
An-4/2.F-2 LCCO.3/NP (40 x)
Sustitución del cemento esparítico blocky B₁ por la fábrica hipidiotípica A₂



An-4/3.F-1 LCCO.1.1/ NC (100 x) Sustitución de bioclastos de algas rodofíceas por criptodolomita A_3 , en lugar de la fábrica hipidiotípica A_2

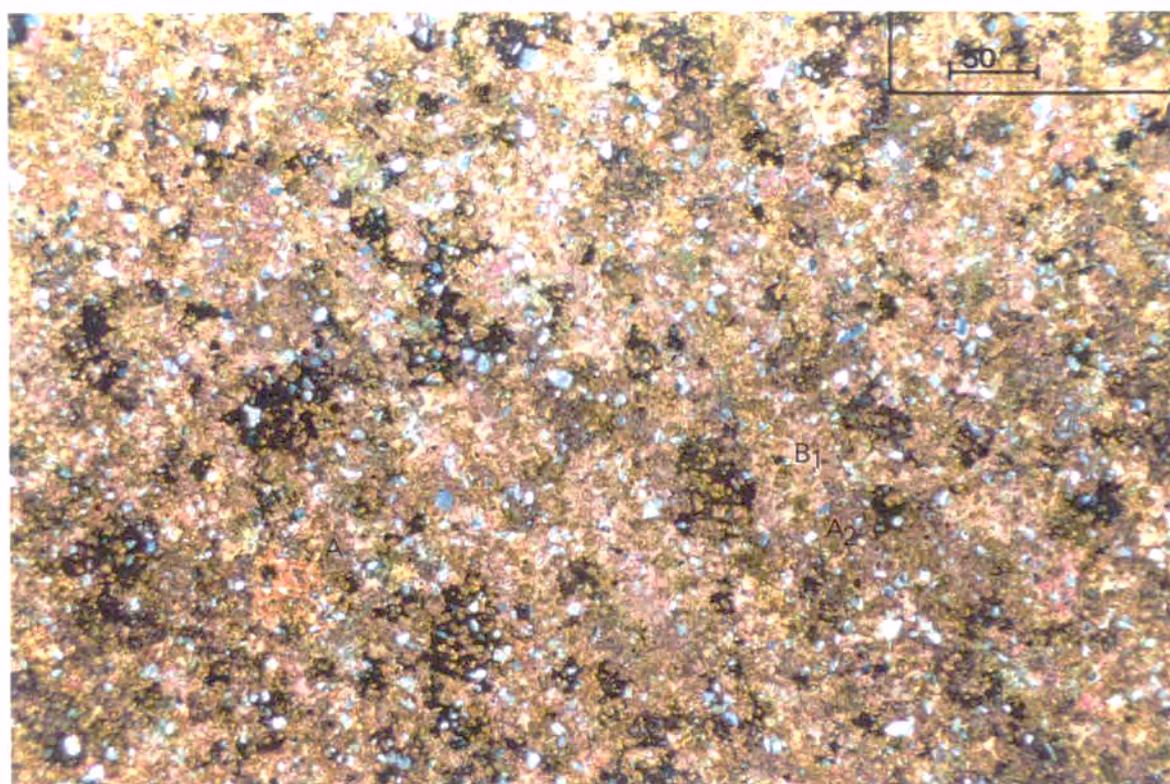


An-4/3.F-2 LCZ.1/NC (50 x)
 A_1 : Cristales euhédricos; A_2 : Microdolomita; B_1 : Esparito (Blocky)



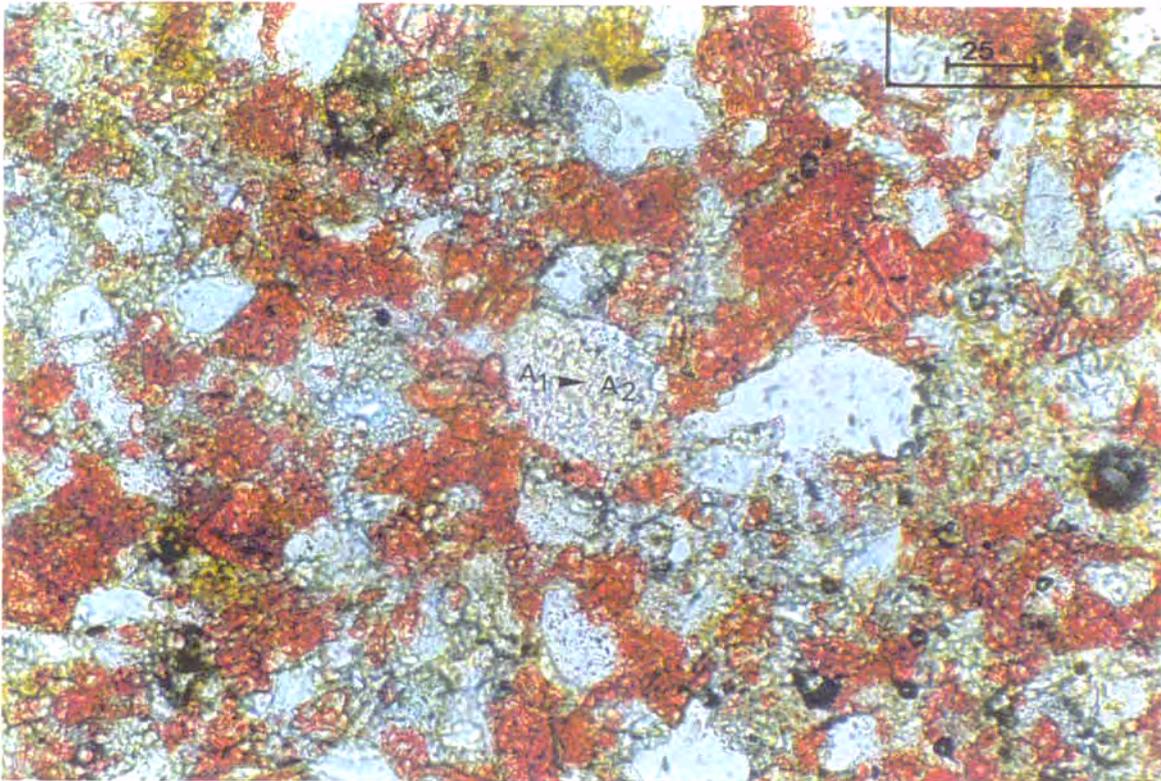
An-4/4F-1 LCLZ.2/ NC (25 x)

A₁: Fábrica Idiotípica; A₂: Fábrica Hipidiotípica; B₁: Cemento Blocky

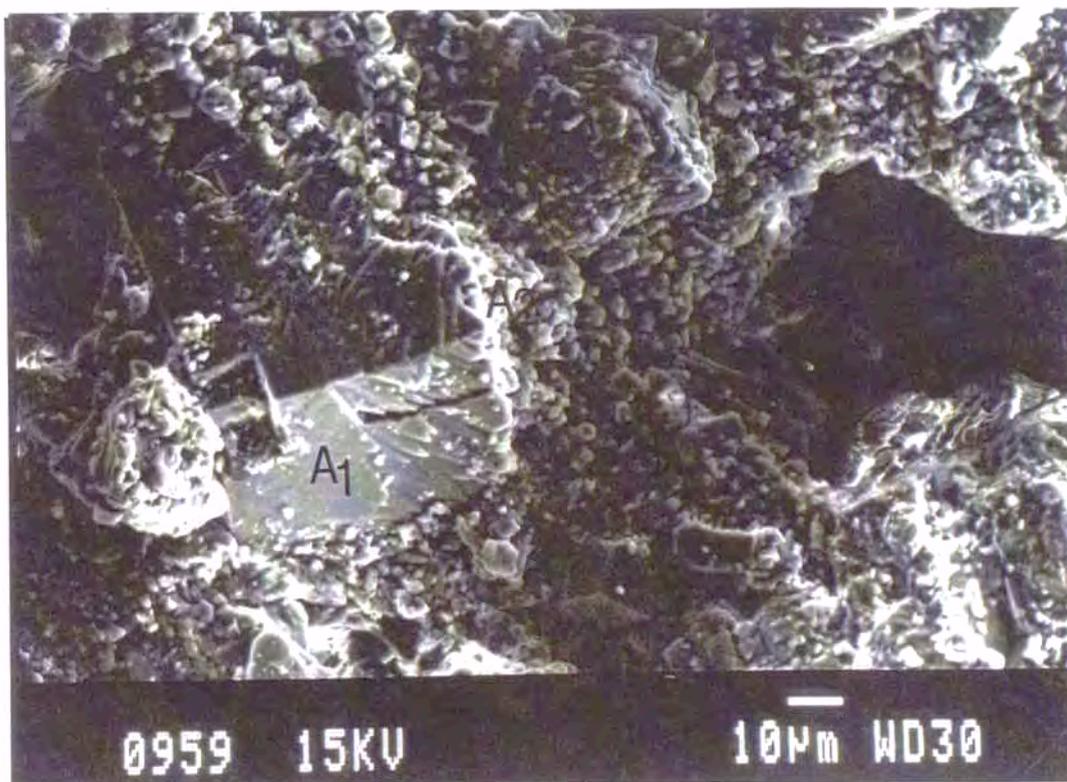


An-4/4.F-2 LCLZ.3/NC (25 x)

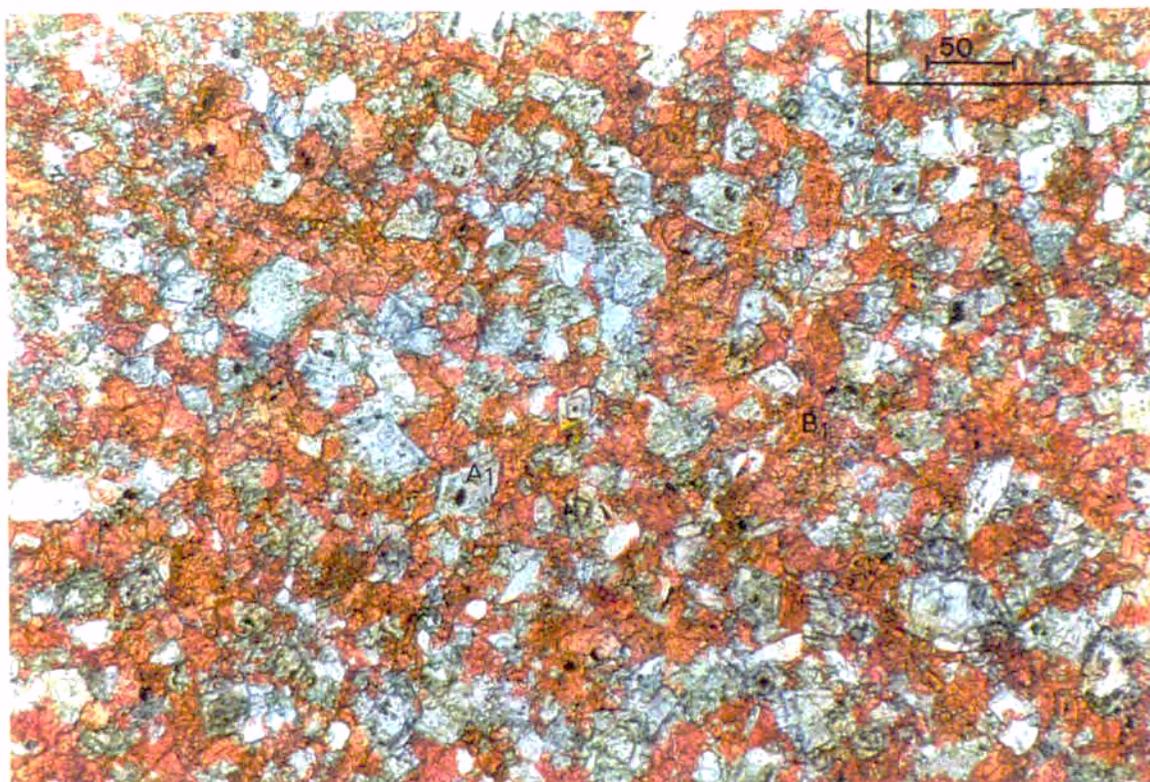
A₂: Microdolomita; B₁: Esparito (Blocky)



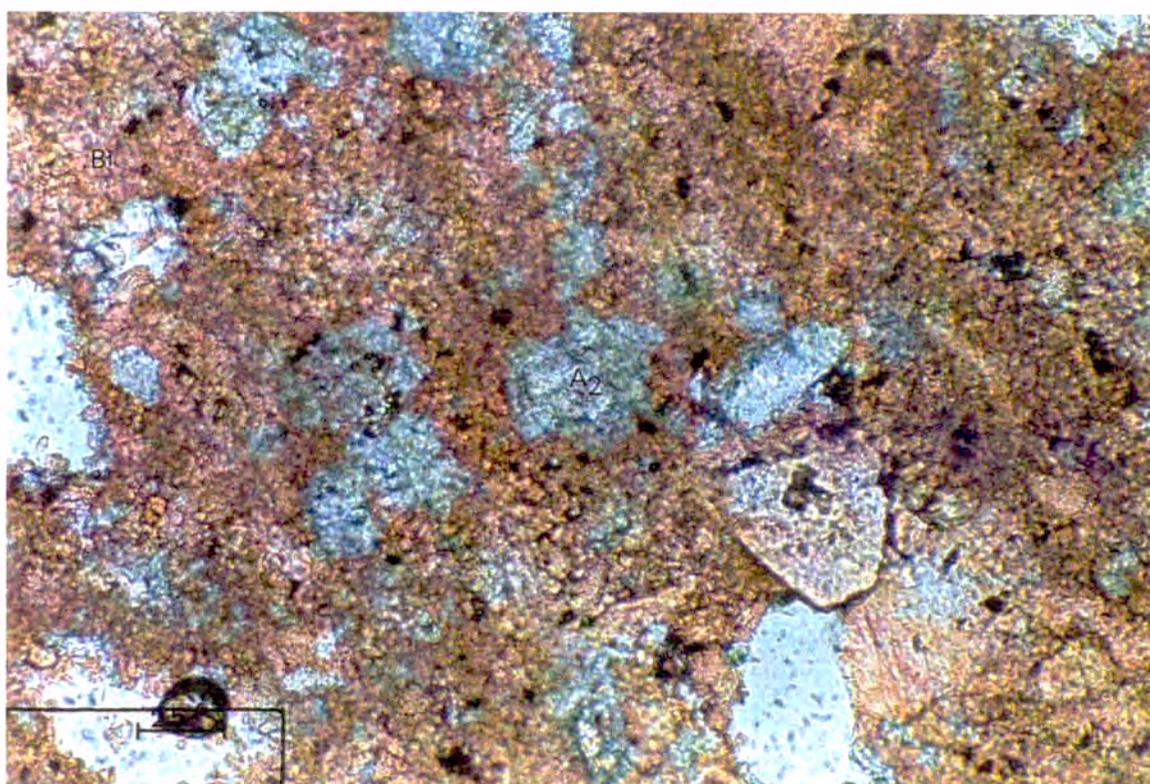
An-4/5F-1 LCLZ.5/ NC (40 x)
Sustitución de la fábrica Idiotípica A₁ por la Hipidiotípica A₂



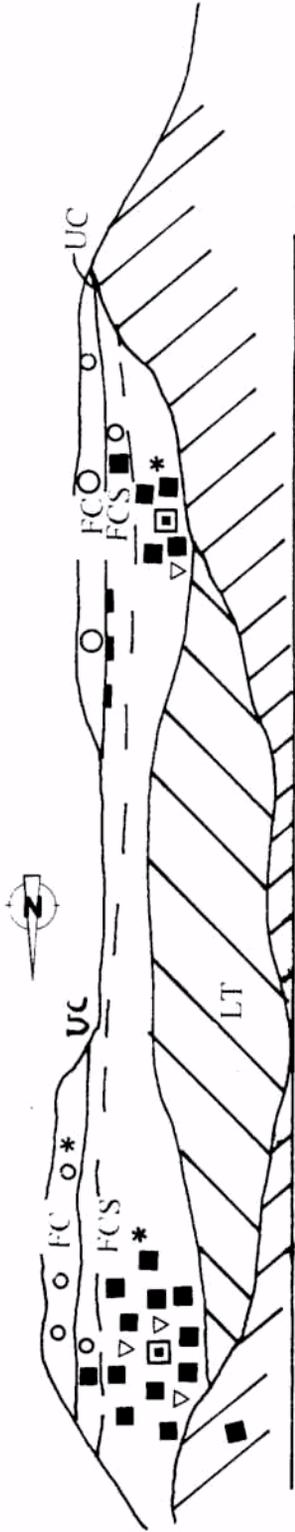
An-4/5.F-2 LCLZ.5
Sustitución de la fábrica Idiotípica A₁ por la Hipidiotípica A₂, visto en M.E.B.



An-4/6.F-1 LCLZ.7/ NC (25 x)
A₁ : Fábrica Idiofípica; B₁; Cemento Esparfítico

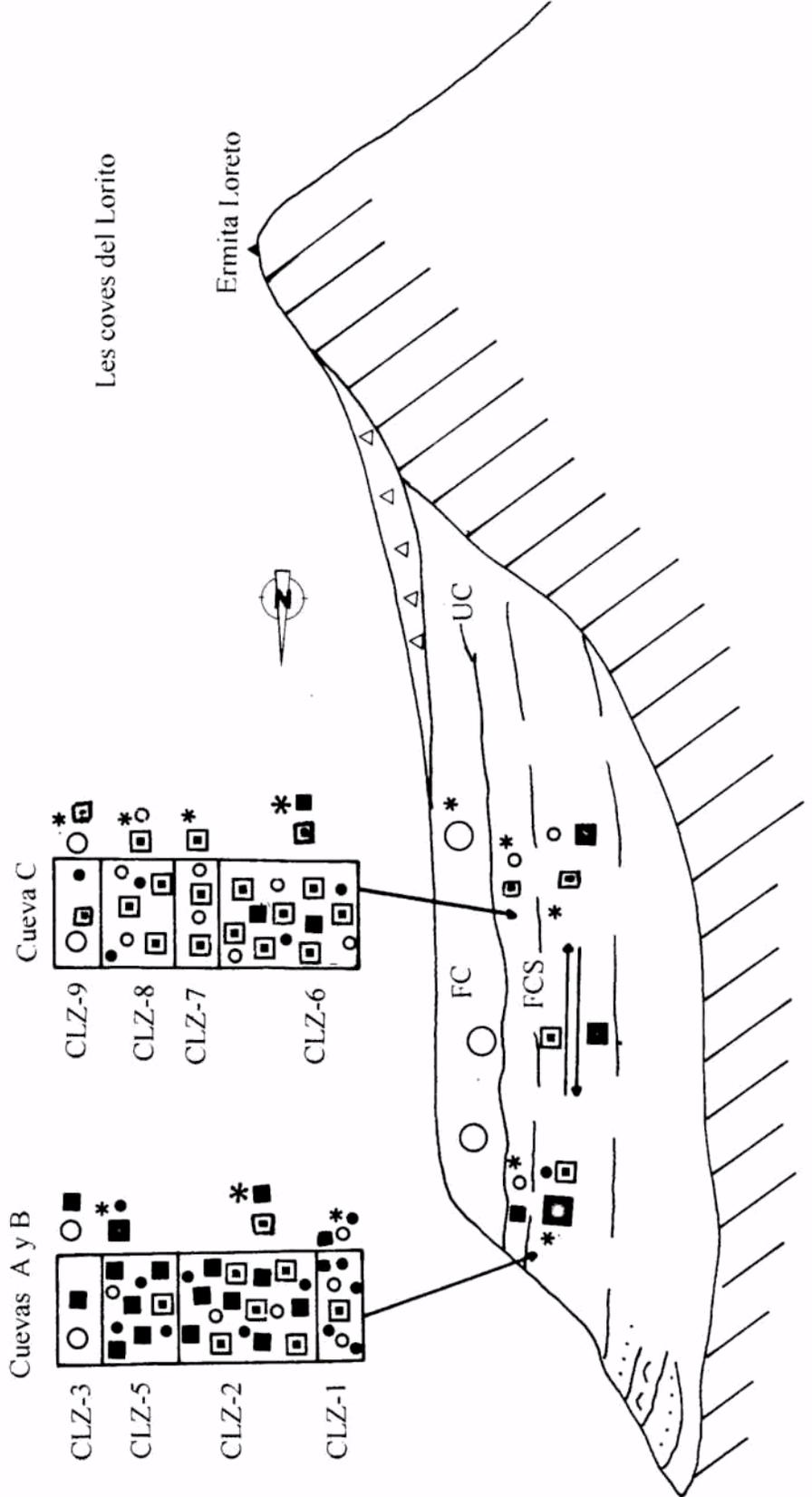


An-4/6.F-2 LCLZ.9/NC (40 x)
A₂ : Fábrica Hipidiofípica; B₁; Cemento Esparfítico



E: 1/2.000

Fábricas dolomíticas	
□	A1-Idiotípica
■	A2-Hipidiotípica-Microesparita
▽	A3-Hipidiotípica-Criptodolomita
Fábricas de Calcita	
○	Esparita-Blocky
●	Microesparita
*	Fábricas dominantes
	Zócalo mesozoico
	Latisol tropical (Mioceno)
	UC Discontinuidad estratigráfica
	FC Fácies calcarenítica
	FCS Fácies calcisilítica
	Superficie carsificada



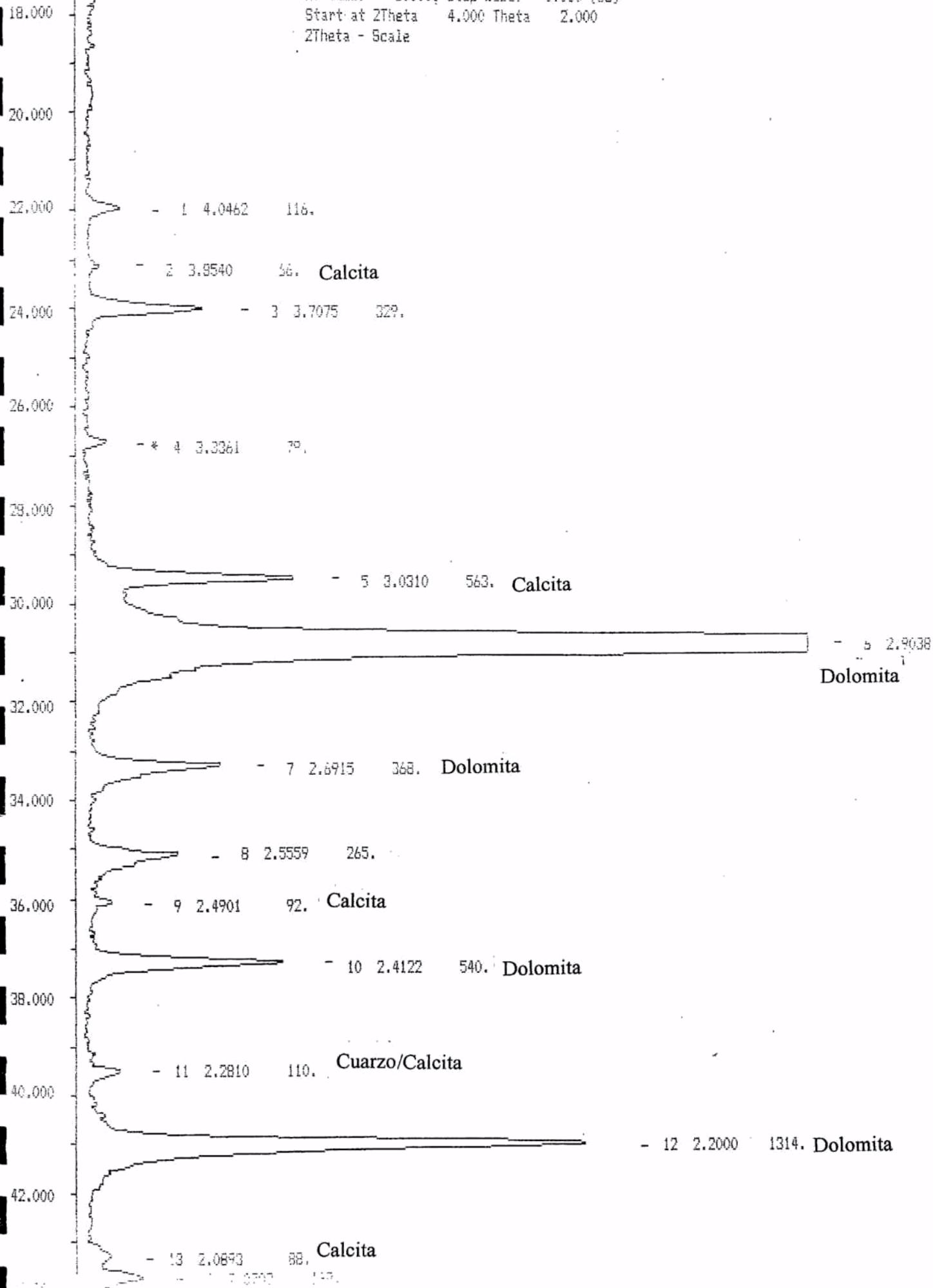
Cuevas A y B

- CLZ-3
- CLZ-5
- CLZ-2
- CLZ-1

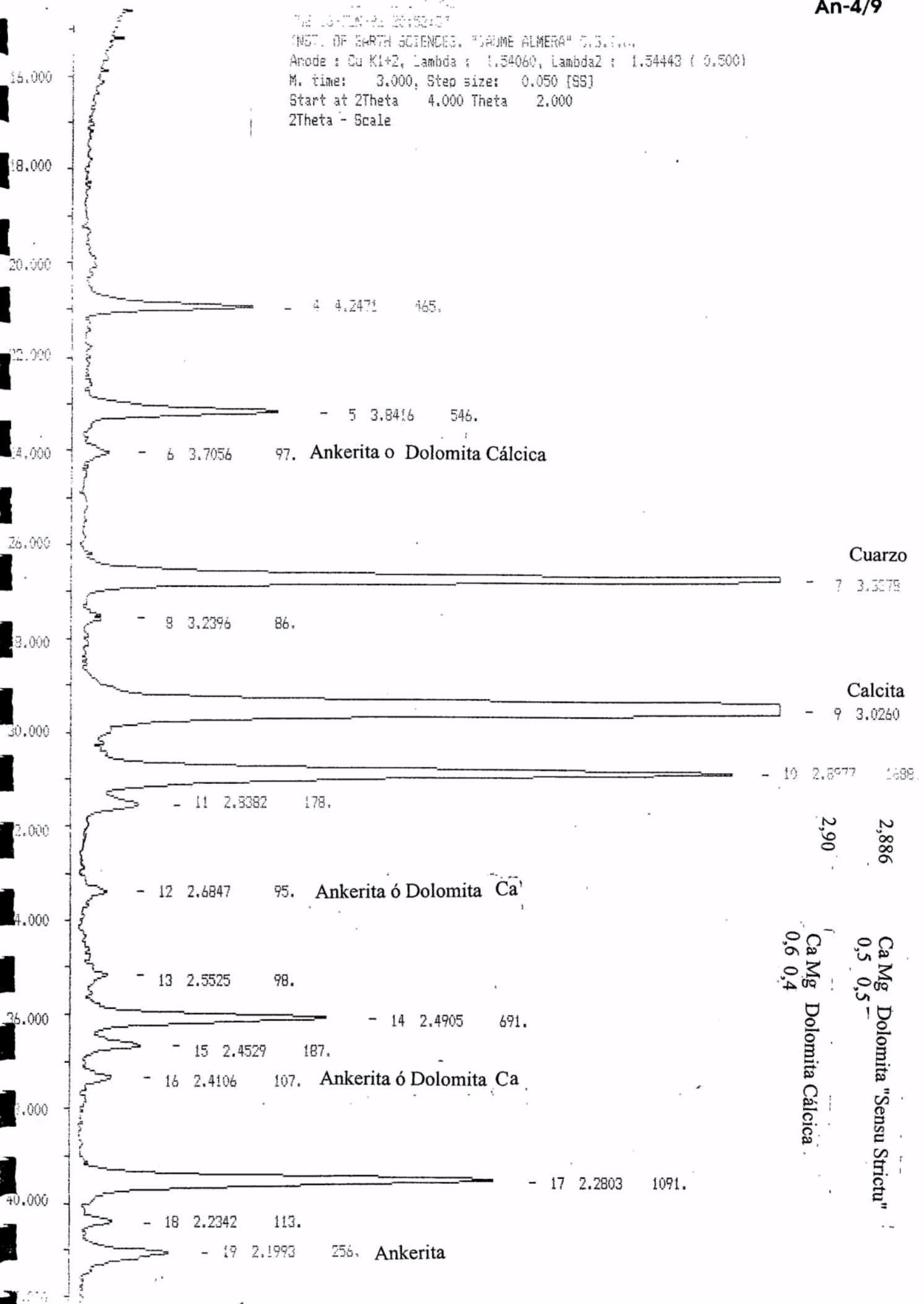
Cueva C

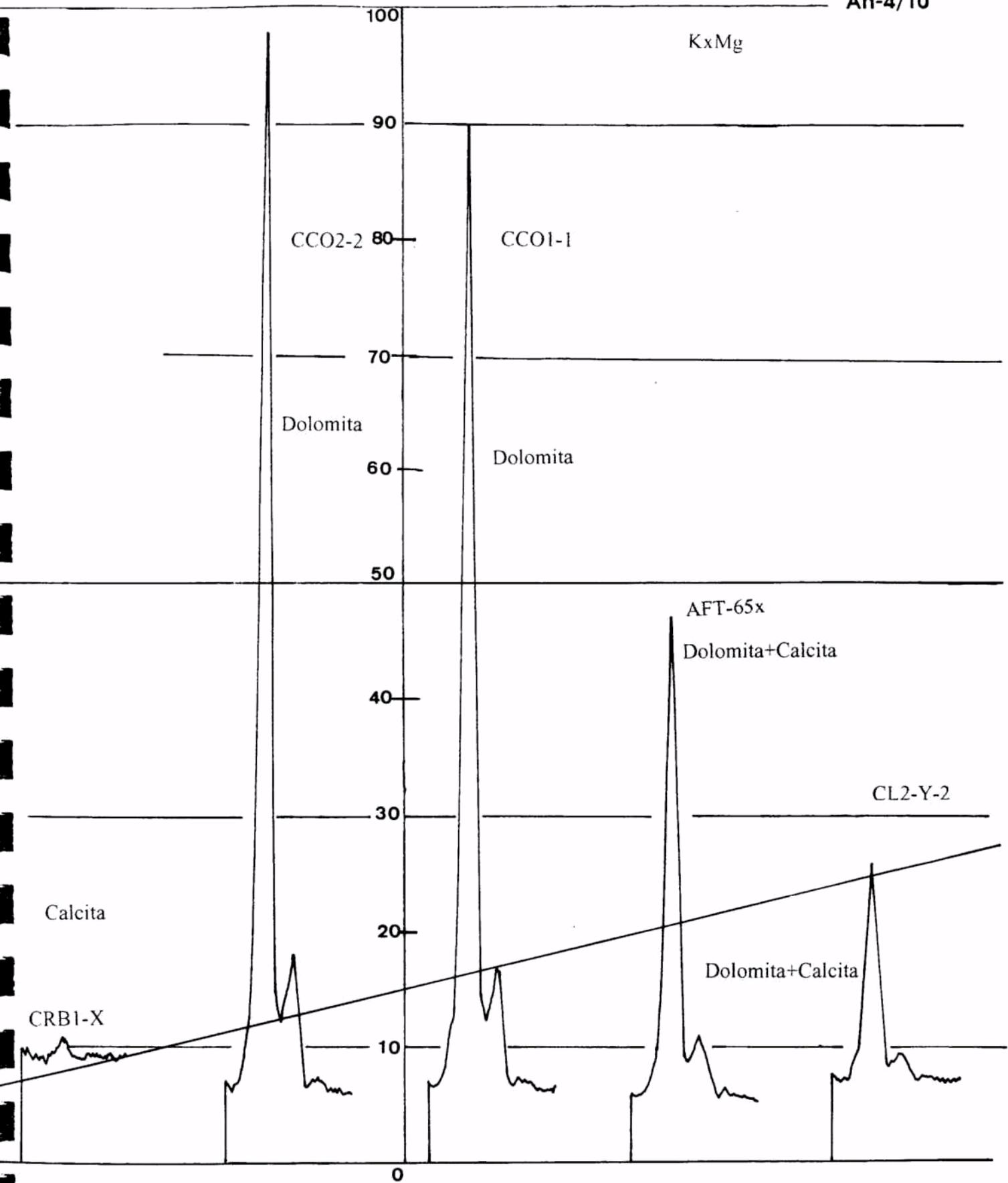
- CLZ-9
- CLZ-8
- CLZ-7
- CLZ-6

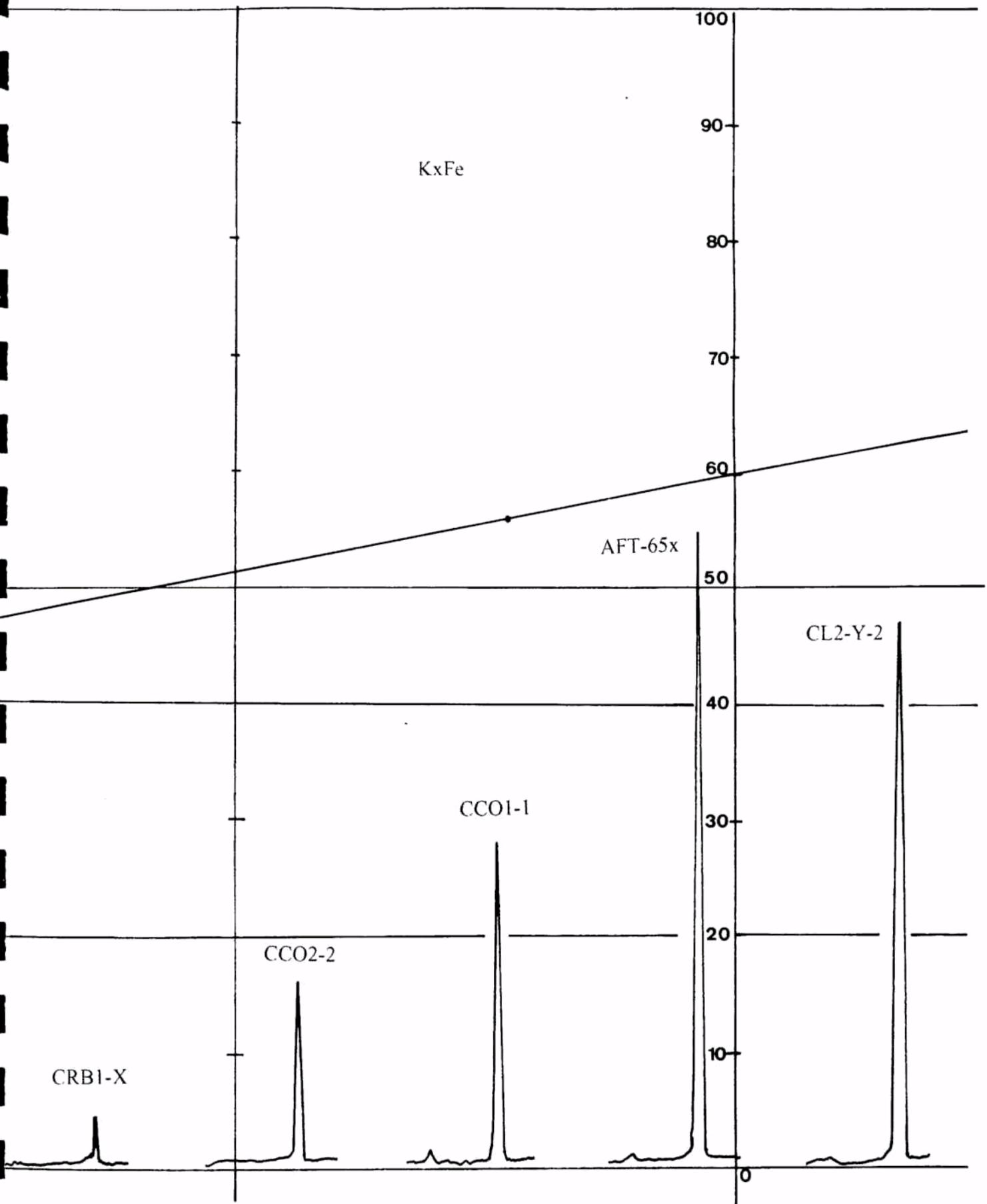
01-12-9
 10 1.000
 RAE 16-04-90 10:00:00
 INST. OF EARTH SCIENCES, "LAUME ALPERA" C.S.I.C.
 Anode : Cu K1+2, Lambda : 1.54060, Lambda2 : 1.54445 (0.500)
 M. time: 3.000, Step size: 0.050 [SS]
 Start at 2Theta 4.000 Theta 2.000
 2Theta - Scale

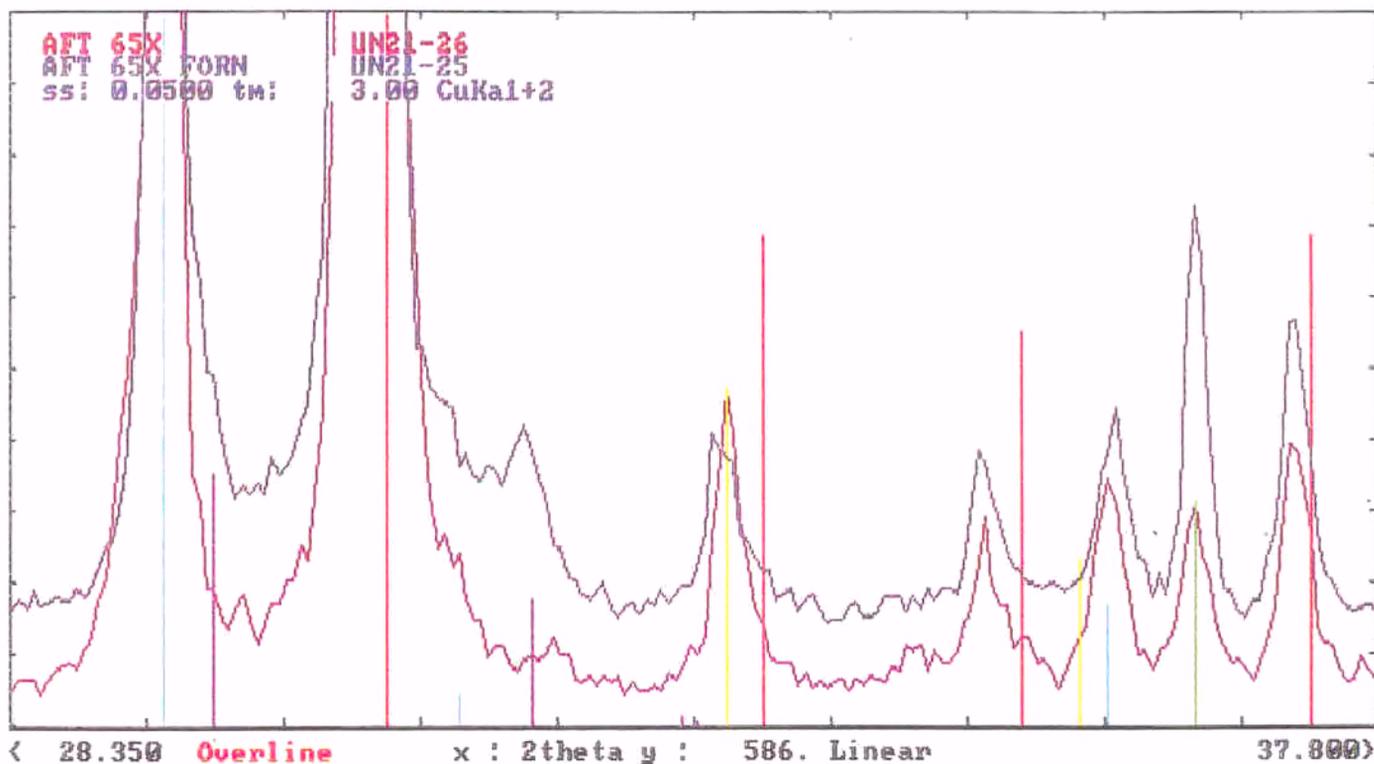


The following is a list of peaks
 INST. OF EARTH SCIENCES, "JAUME ALMERA" U.S.I.C.
 Anode: Cu K1+2, Lambda: 1.54060, Lambda2: 1.54443 (0.500)
 M. time: 3.000, Step size: 0.050 [SS]
 Start at 2Theta 4.000 Theta 2.000
 2Theta - Scale



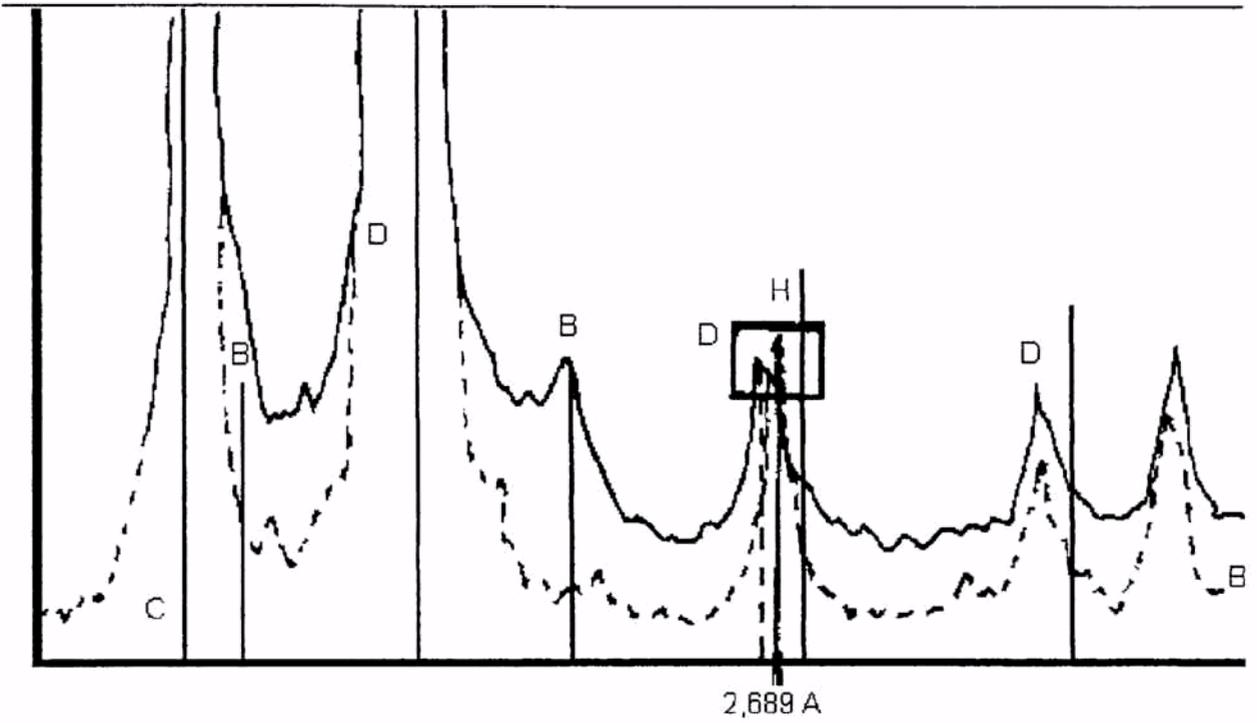






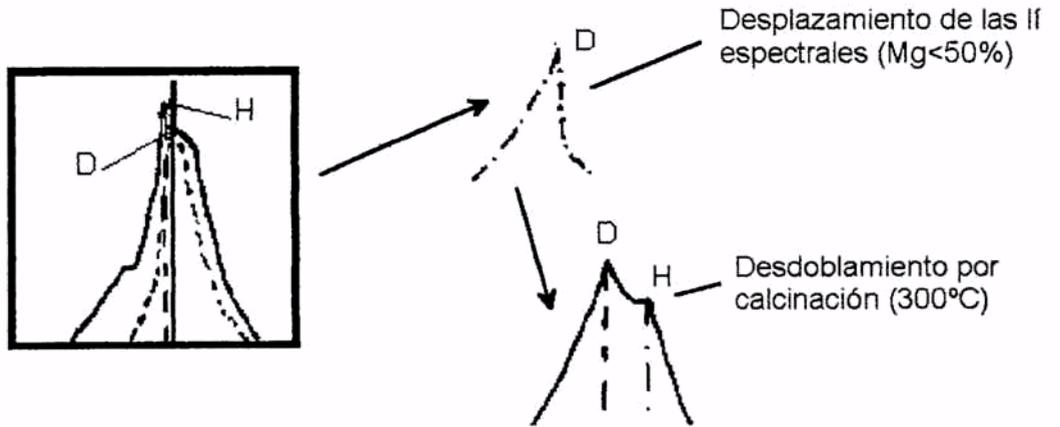
33-1161 * SiO₂ Quartz syn
 4-0882 C-CO₃ Calcite
 11-0078 D CaMg(CO₃)₂ Dolomite
 14-0453 D CaSO₄.1.5H₂O Bassanite syn
 13-0534 D Fe₂O₃ Hematite syn

File: UN21-25 300 C_



B: Difracción a Temperatura ambiente (crudo)
 A: Difracción de material calcinado o cocido

300°C durante 20 horas.

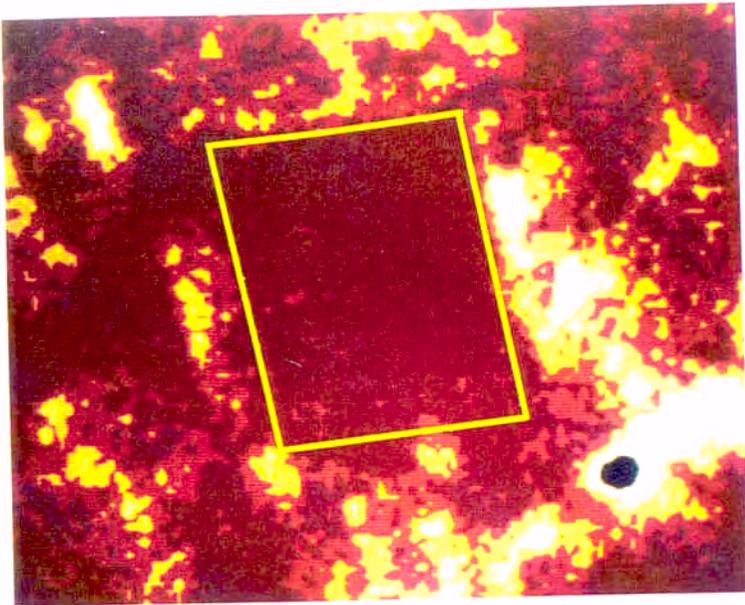


Goethita $\xrightarrow{\text{calcinación } 300^{\circ}\text{C}}$ Hematites
 FeO(OH) $\xrightarrow{\quad}$ Fe_2O_3
 Pigmento amarillo \quad \quad Pigmento rojo

D: Dolomita
 H: Hematites
 C: Calcita
 B: Bassanita

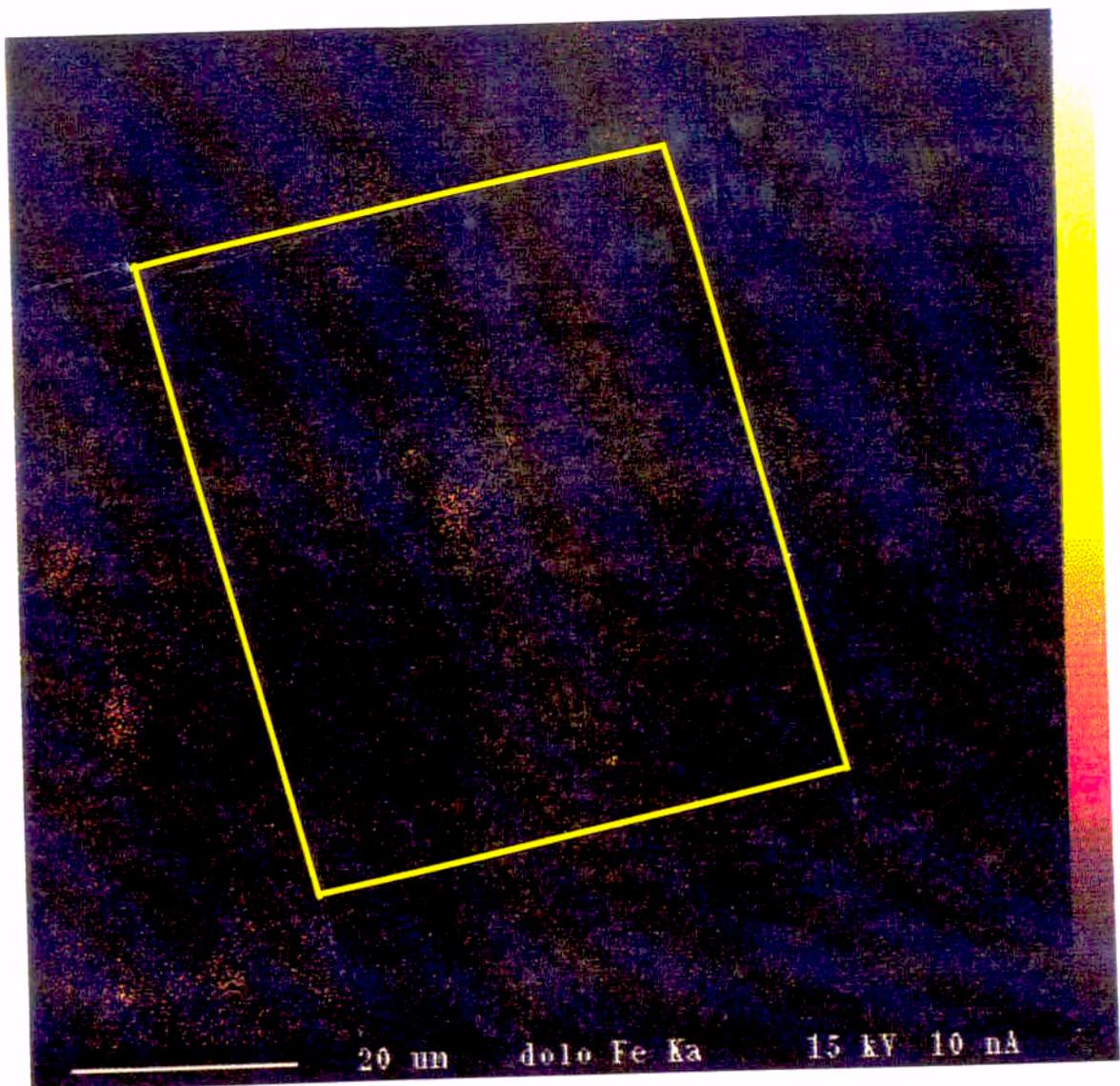
Hematites $\frac{I}{100} : 2,69$
 Goethita $\frac{I}{8} : 2,69$

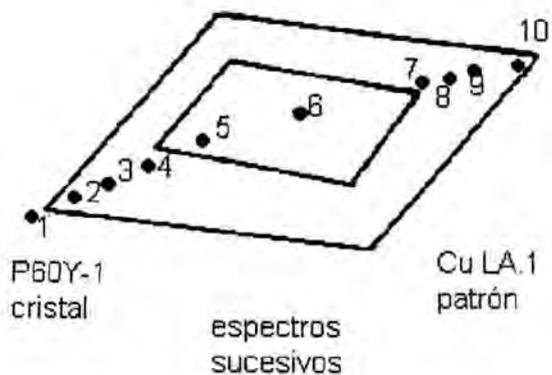
al aumentar la intensidad del pico éste se desdobra y se separa del pico de la dolomita



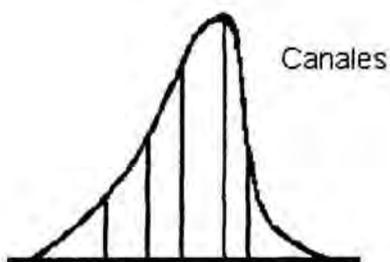
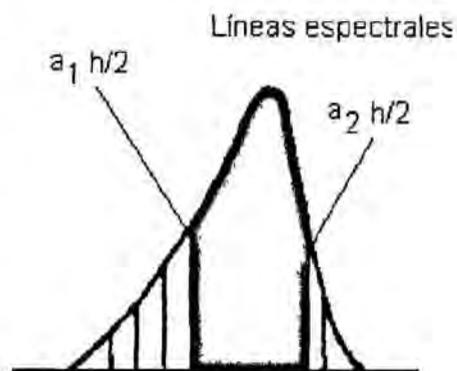
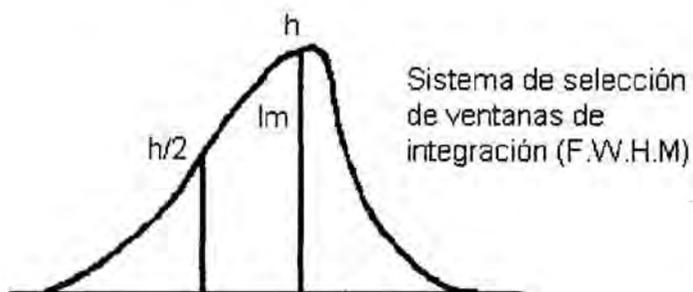
An-4/14.F-1 Imágen de Z/Fe Jesl.840
sobre un cristal de dolomita

An-4/14.F-2 Imágen de Z/Fe (Microsonda CAMECA)





"Stub" portamuestras



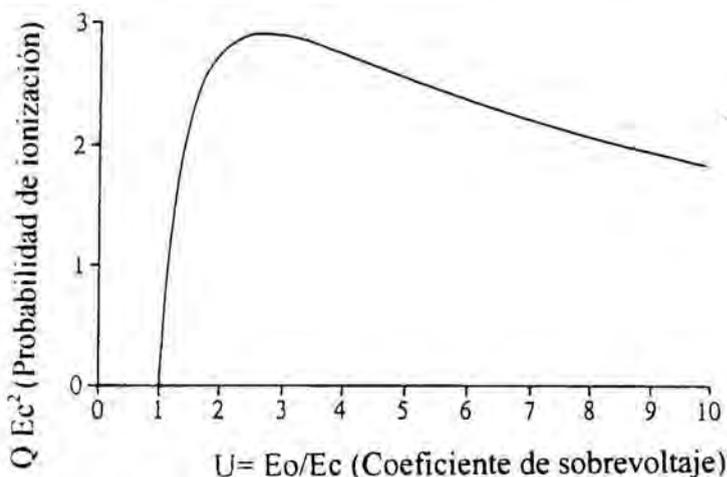
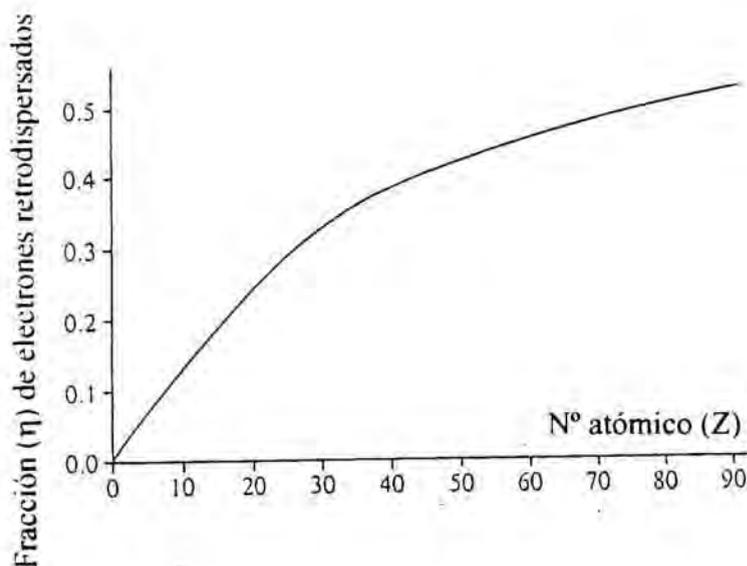
Selección de ventana
 Área integrada = S
 fWhm = 2,35

h: intensidad máxima
 h/2: la mitad de la intensidad máxima

ANALISIS SEMICUANTITATIVO PUNTUAL DE CRISTALES DE DOLOMITA TIPO "LORITO"
Tabla de los puntos del perfil

p60-0	Ao	Bo	A"		B"	
Muestra	Mg k	Ca k	Cu k	IMg/ICu	I Ca/ICu	"A"/"B"
P60Y1	1195	5252	3237	0,369168	1,622489	4,394979
P60Y2	2818	6504	4161	0,677241	1,563085	2,308019
P60Y3	1944	5292	4968	0,391304	1,065217	2,722222
P60Y4	820	4765	4939	0,166025	0,964770	5,810975
P60Y5	527	4843	4738	0,111228	1,022161	9,189753
P60Y6	361	7320	3638	0,099230	2,012094	20,27700
P60Y7	2857	5684	4554	0,627360	1,248133	1,989499
P60Y8	1950	4991	4796	0,406588	1,040658	2,559487
P60Y9	1453	7347	3237	0,448872	2,269694	5,056434

Las columnas Ao y Bo representa la intensidad o número de cuentas integradas por el software AN10000-EDS /LINK



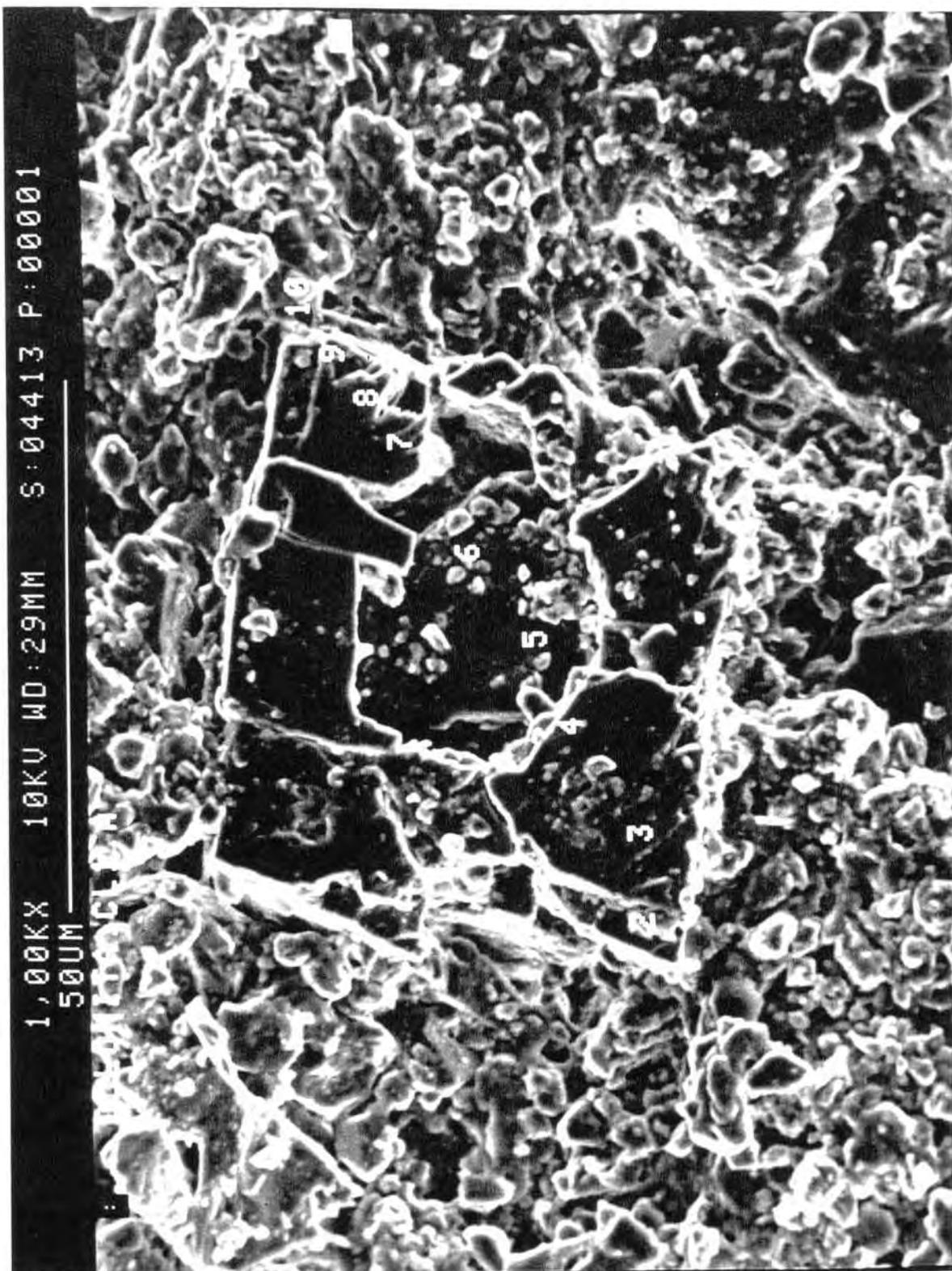
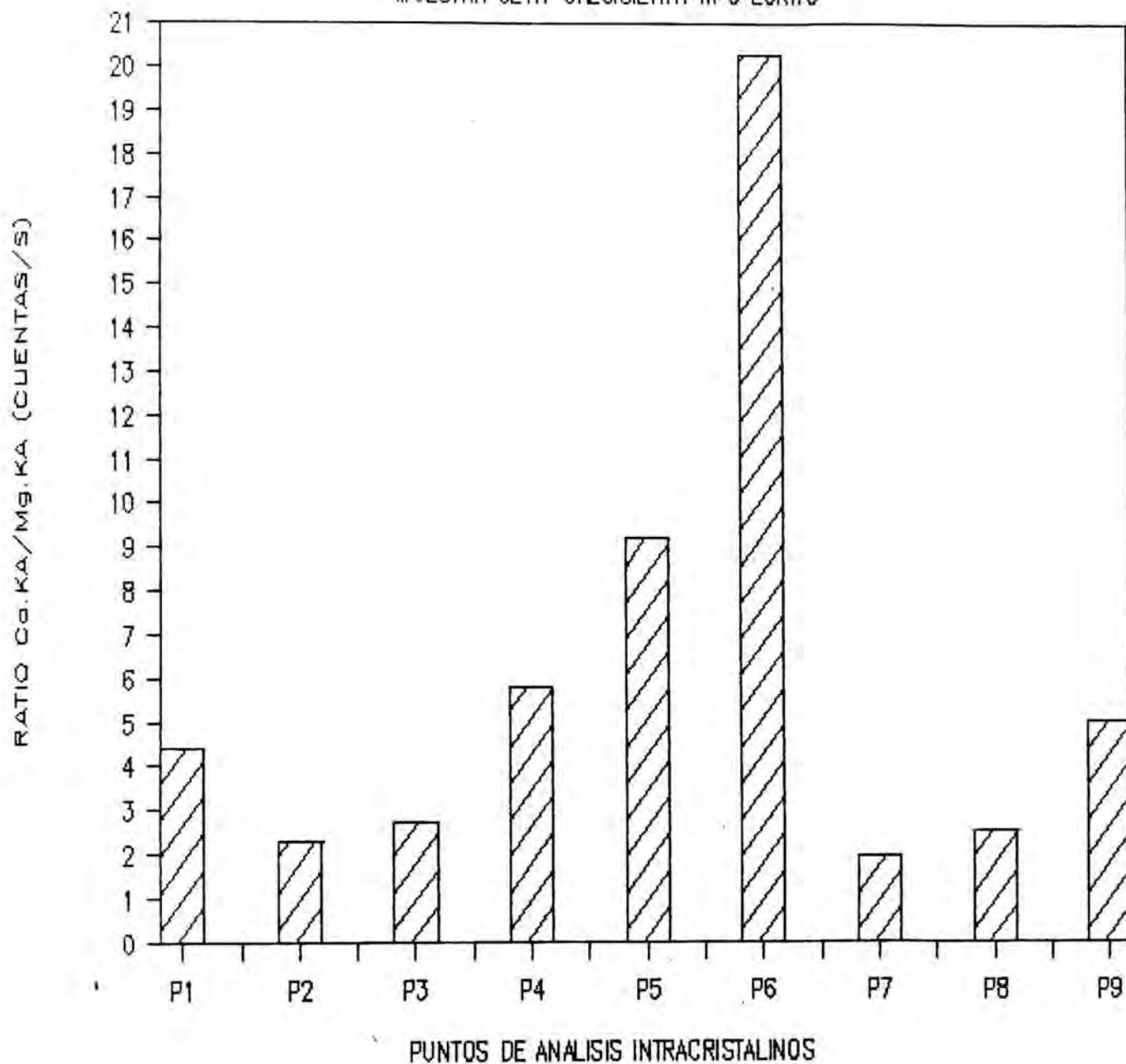


Imagen M.E.B. (puntos del perfil P60.1)

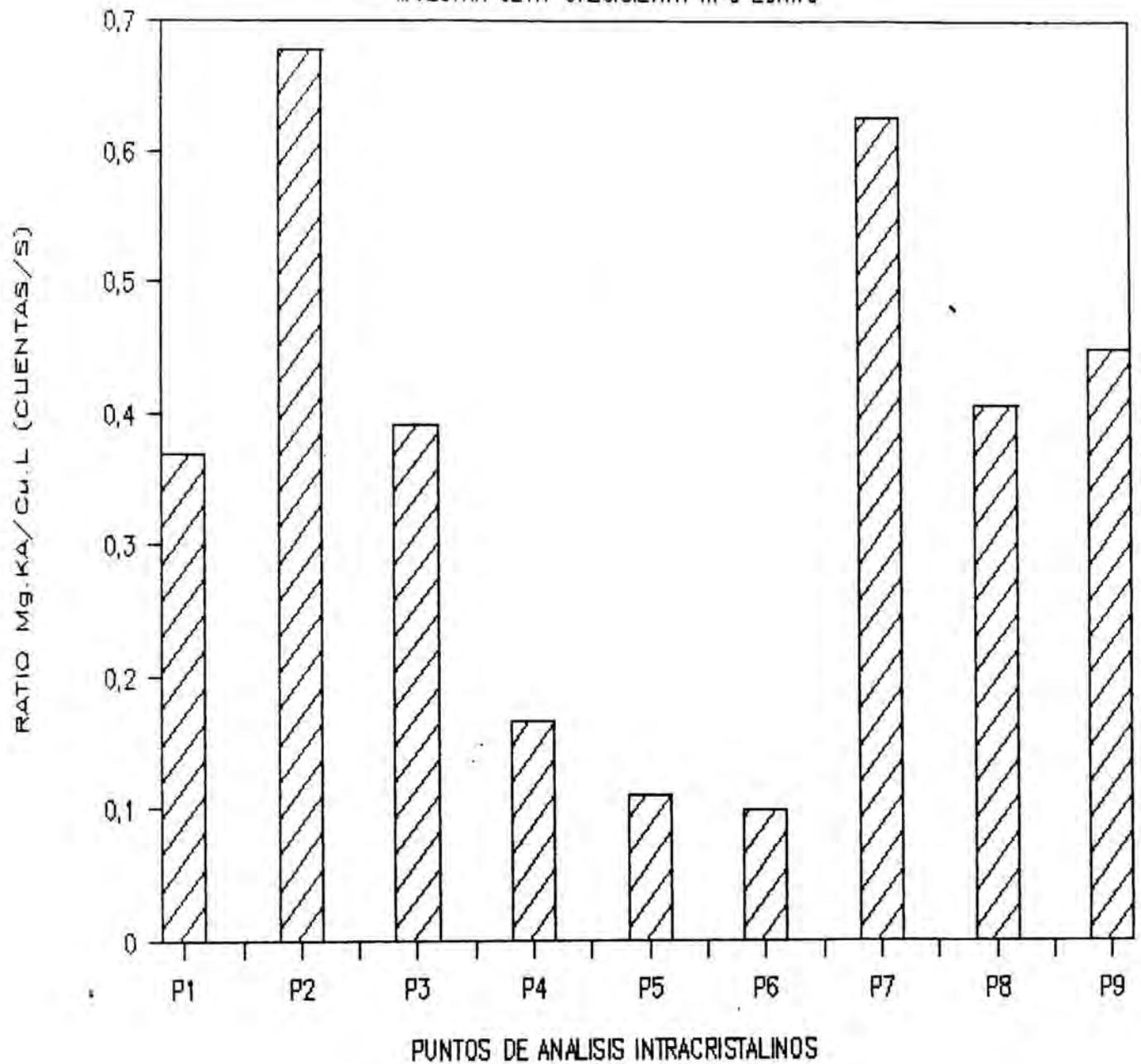
RATIOS Ca/Mg INTRACRISTALINOS

MUESTRA CL1A-CALCISILTITA TIPO LORITO



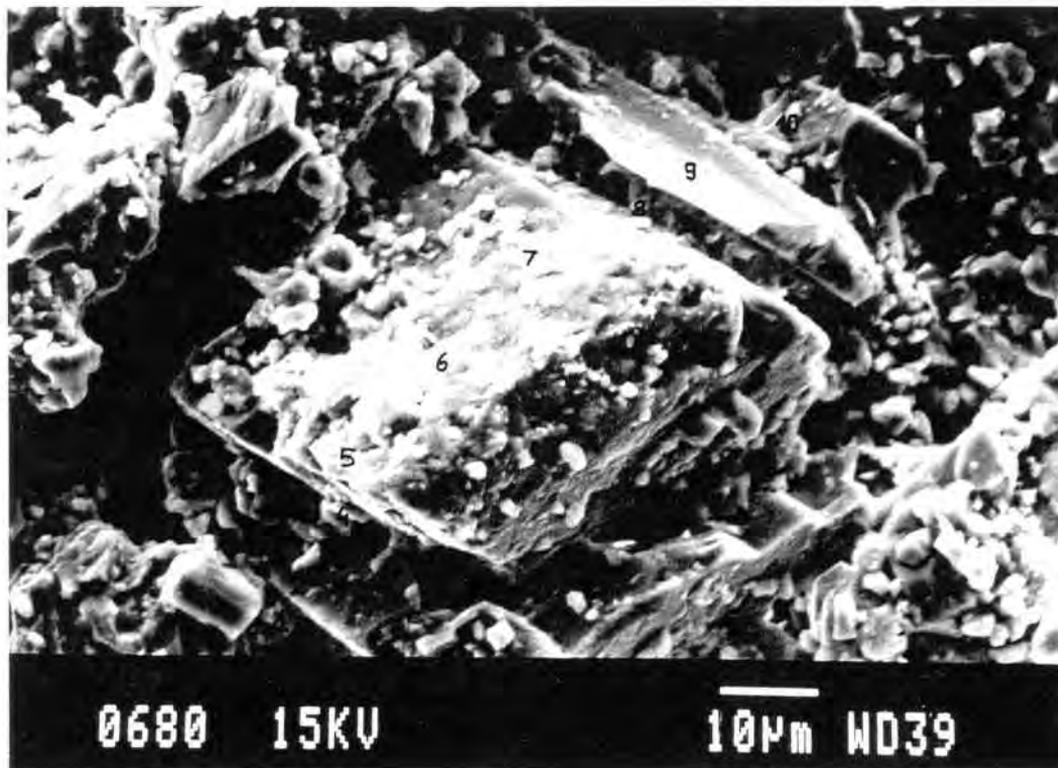
RATIOS Mg.KA/Cu.L INTRACRISTALINOS

MUESTRA CL1A-CALCISILTITA TIPO LORITO



p60-z-20-4-93				"A"	"B"	
Muestra	Mg k	Ca k	Cu k	'IMg/ICu	ICa/ICu	"A"/"B"
P60z1	531	6113	2422	0,219240	2,523947	11,51224
P60z2	2342	6749	2525	0,927524	2,672871	2,881725
P60z3	1996	6402	2098	0,951382	3,051477	3,207414
P60z4	1265	10830	2783	0,454545	3,891484	8,561264
P60z5	2593	6151	2580	1,005038	2,384108	2,372155
P60z6	2758	6307	2882	0,956974	2,188410	2,286802
P60z7	2455	5544	2145	1,144522	2,584615	2,258248
P60z8	105	5962	1704	0,061619	3,498826	56,78095
P60z9	2714	6861	2723	0,996694	2,519647	2,528002
P60z10	234	9949	2723	0,085934	3,653690	42,51709

Las columnas Ao y Bo representa la intensidad o número de cuentas integradas por el software AN10000-EDS /LINK



Perfil concentraciones Ca/Mg, distribución tipo B

En Dolomitas tipo Lorito zonados/ Fábrica Idiotípica.

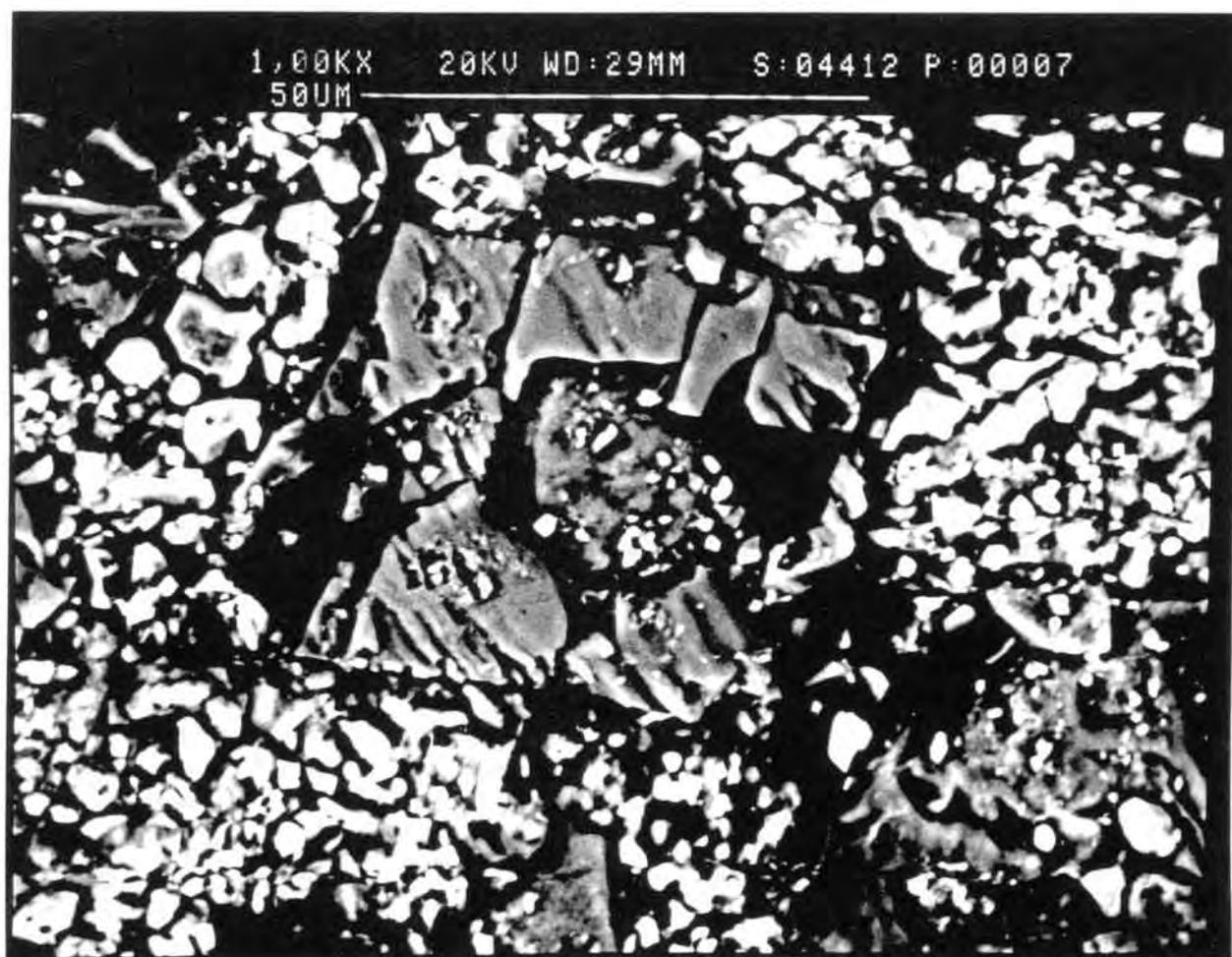
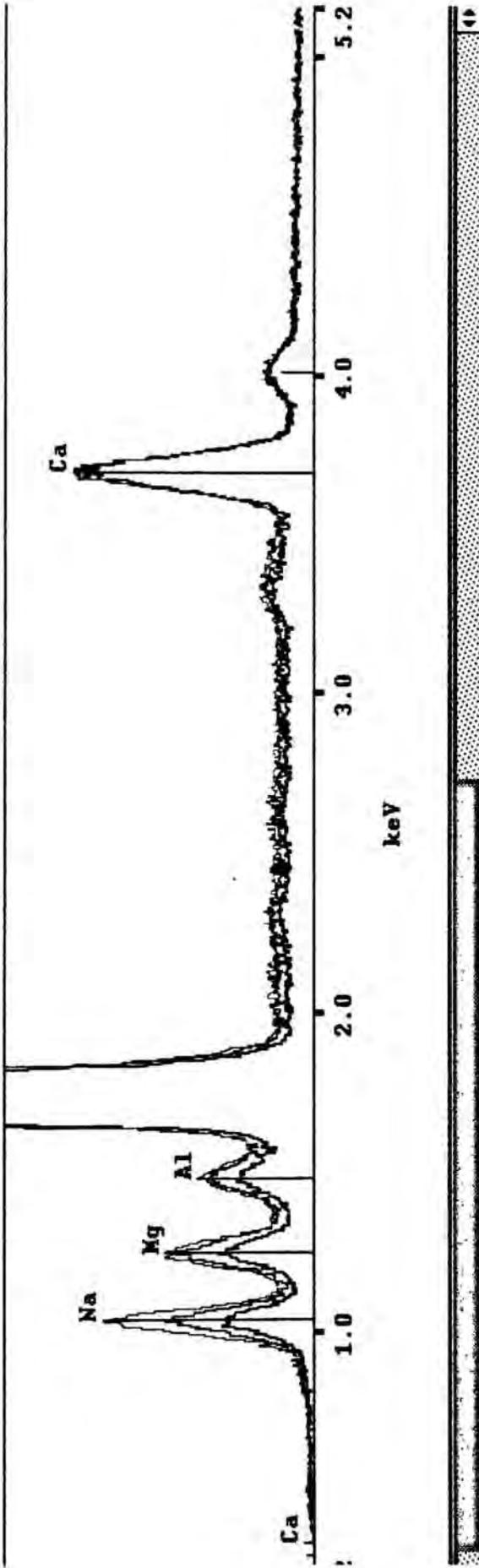


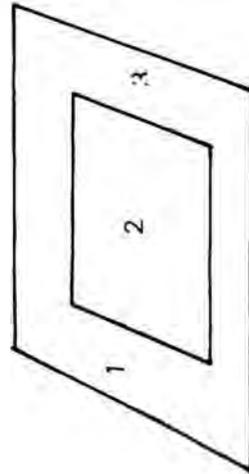
Imagen de Retrodifundidos (P60)

1289 FS

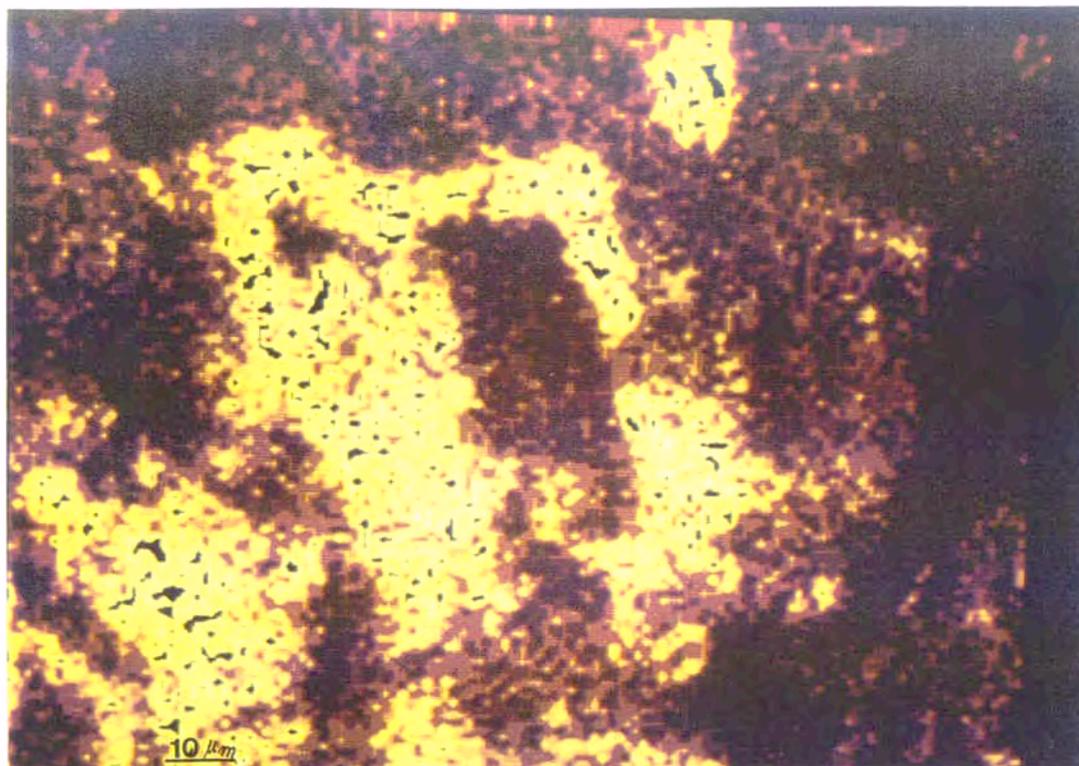
Window 1
✓ prada1
prada2
prada3
cl_dolomitas"tipo lorito"
cl_dolomitas"tipo lorito"
cl_dolomitas"tipo lorito"



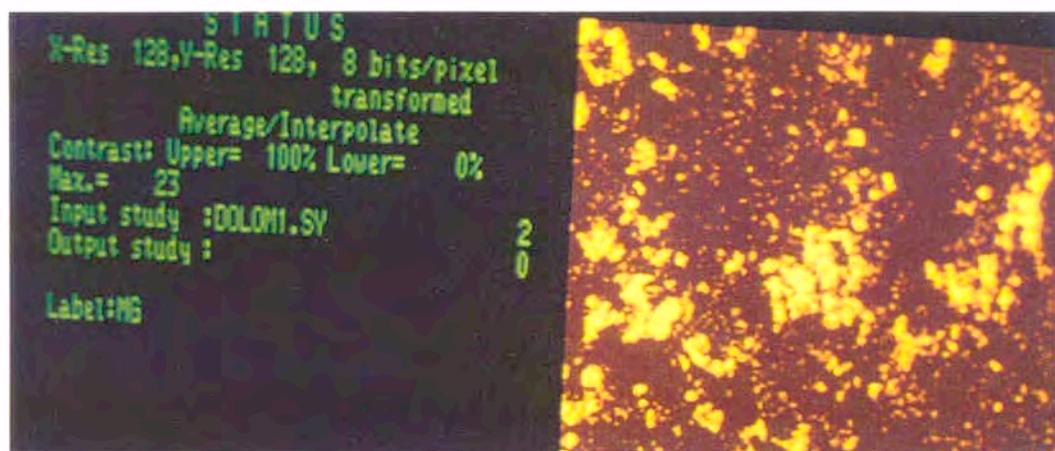
Determinación de perfiles por espectrometría de rayos-X en microsonda tipo CAMECA



Dolomita zonada "tipo Lorito"

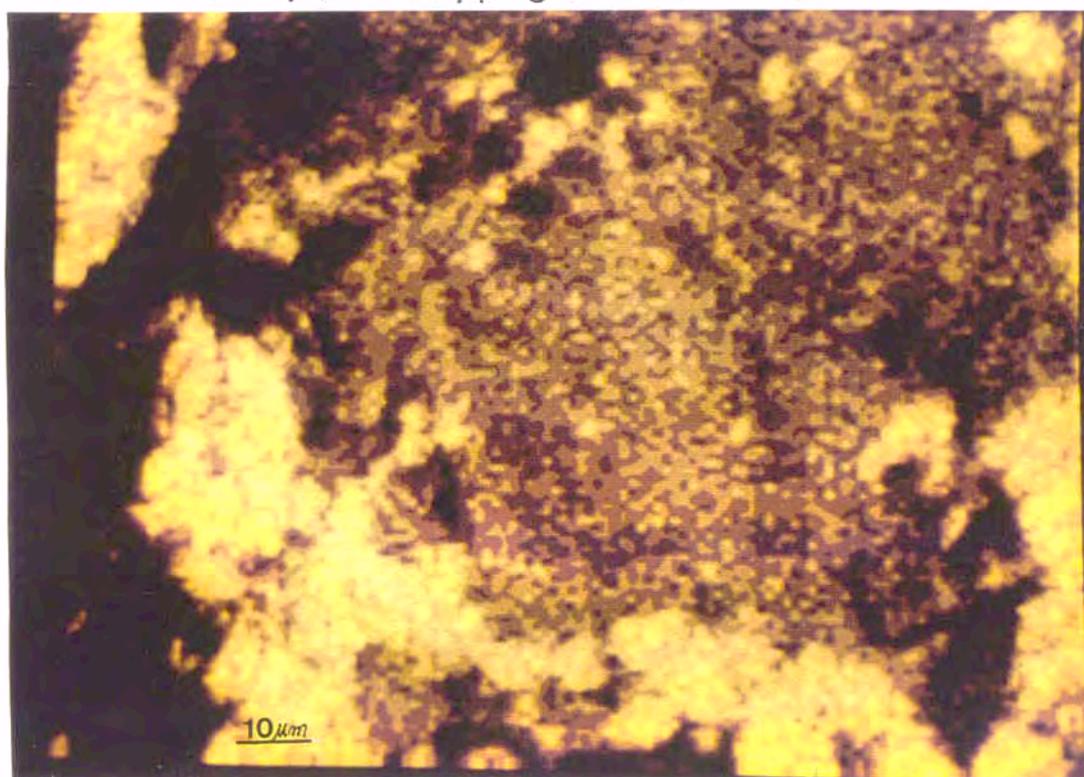


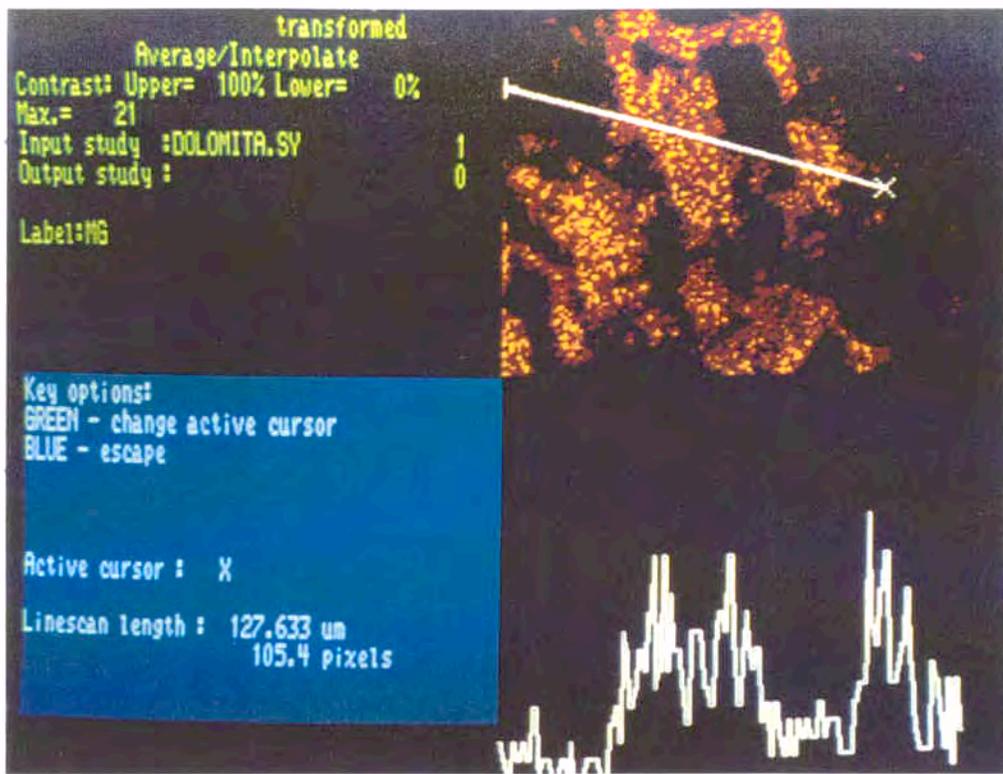
An-4/23.F-1 Mapping de Mg de un cristal zonado



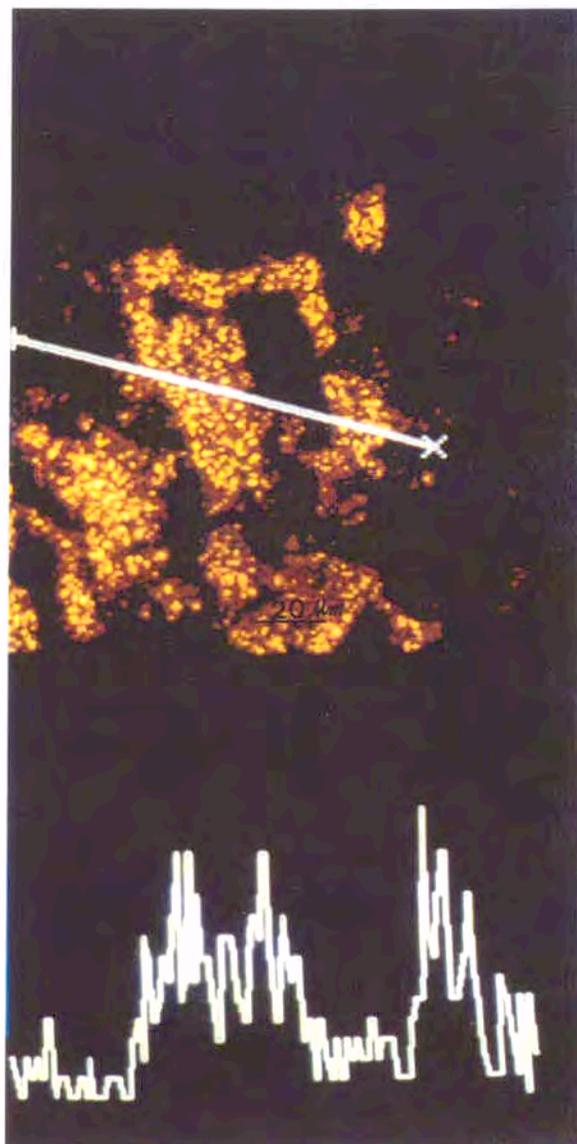
An-4/23.F-2 Mapping de Mg del entorno del cristal

An-4/23.F-3 Mapping de Ca del cristal





An-4/24.F-1 y 2 Perfiles sobre imagen de Z (Mg)



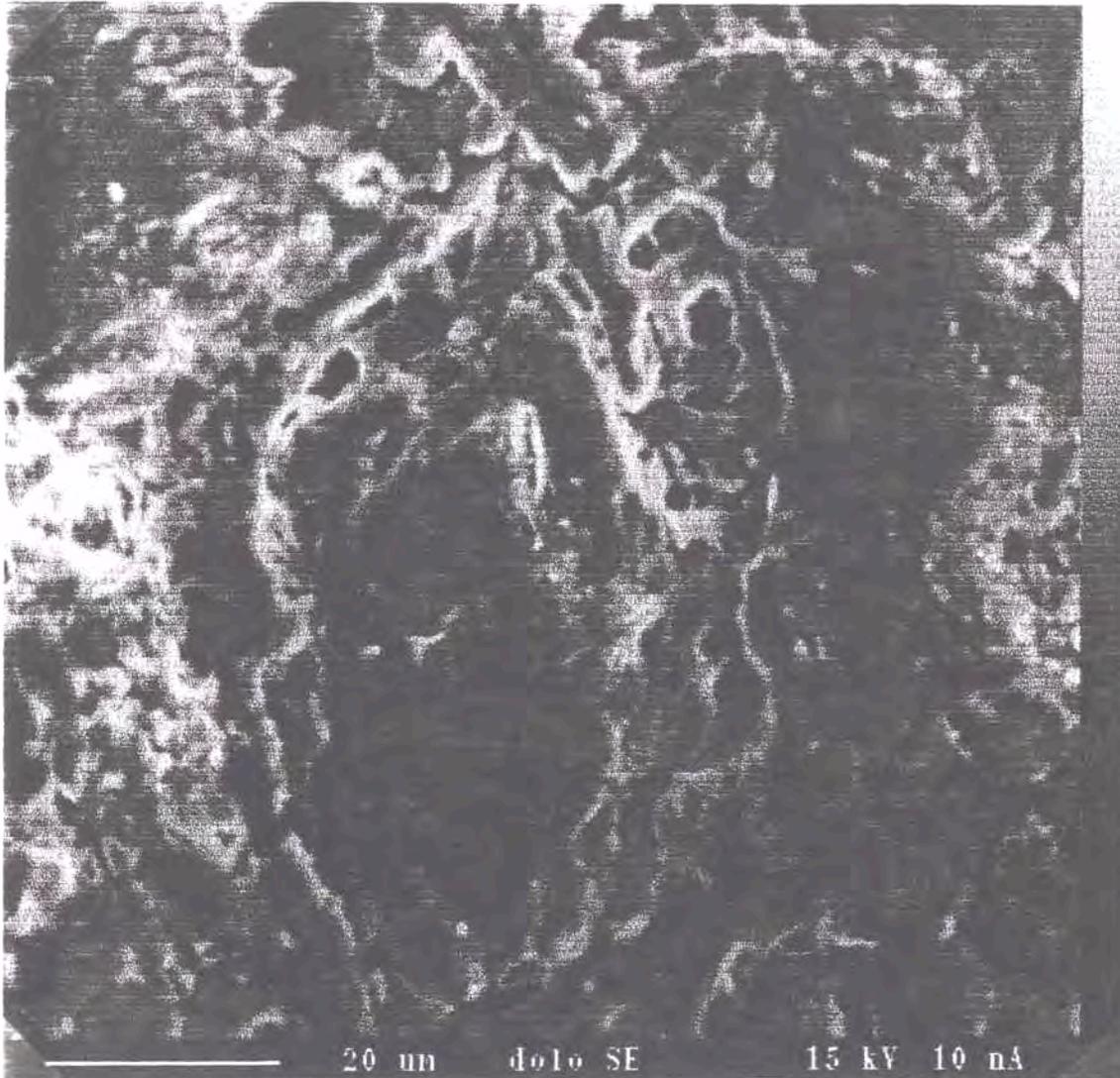


Imagen de referencia obtenida por electrones secundarios para imágenes de rayos X. Mapping Z

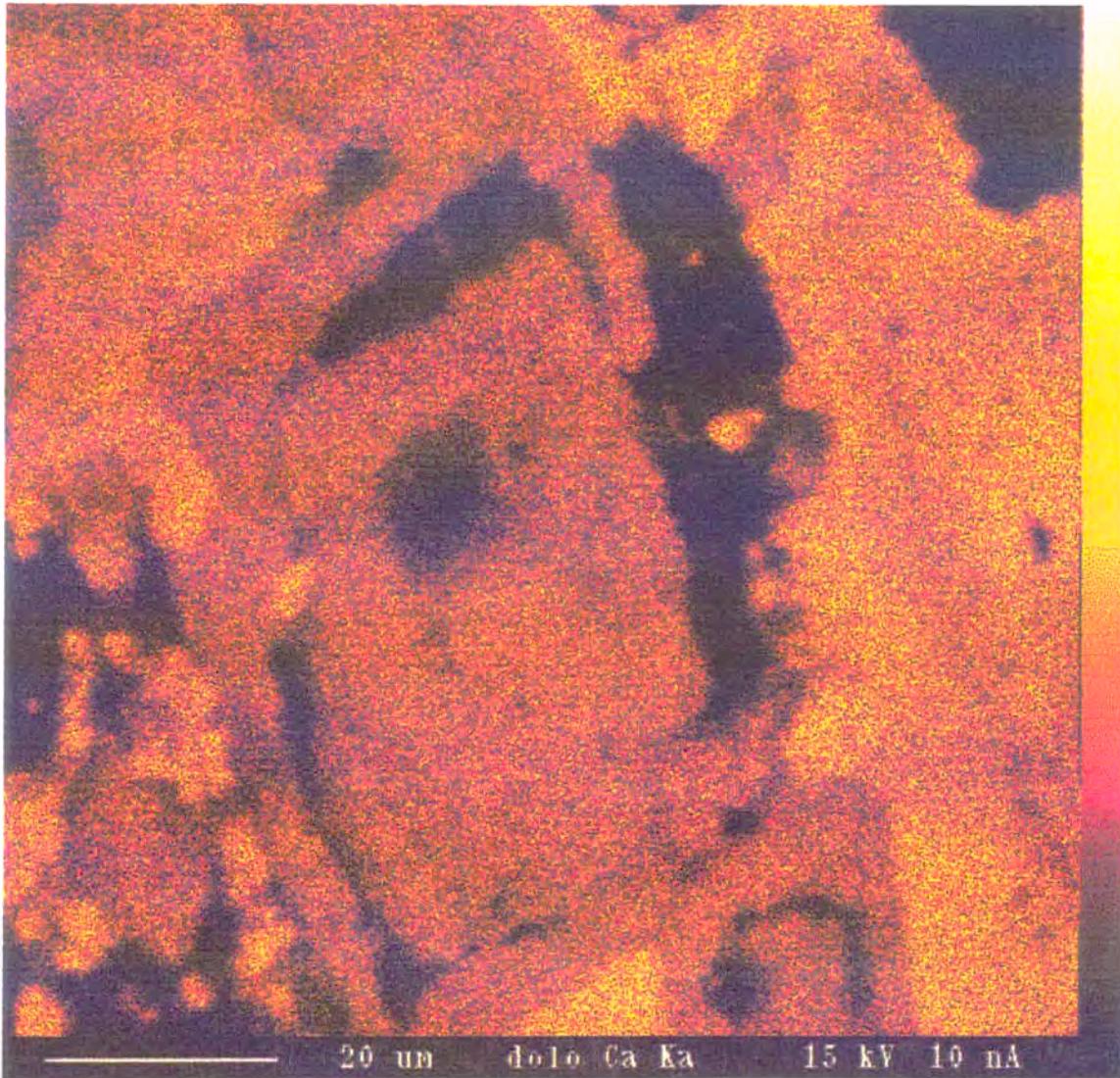


Imagen de rayos X. Mapping de Calcio en una dolomita tipo "B"

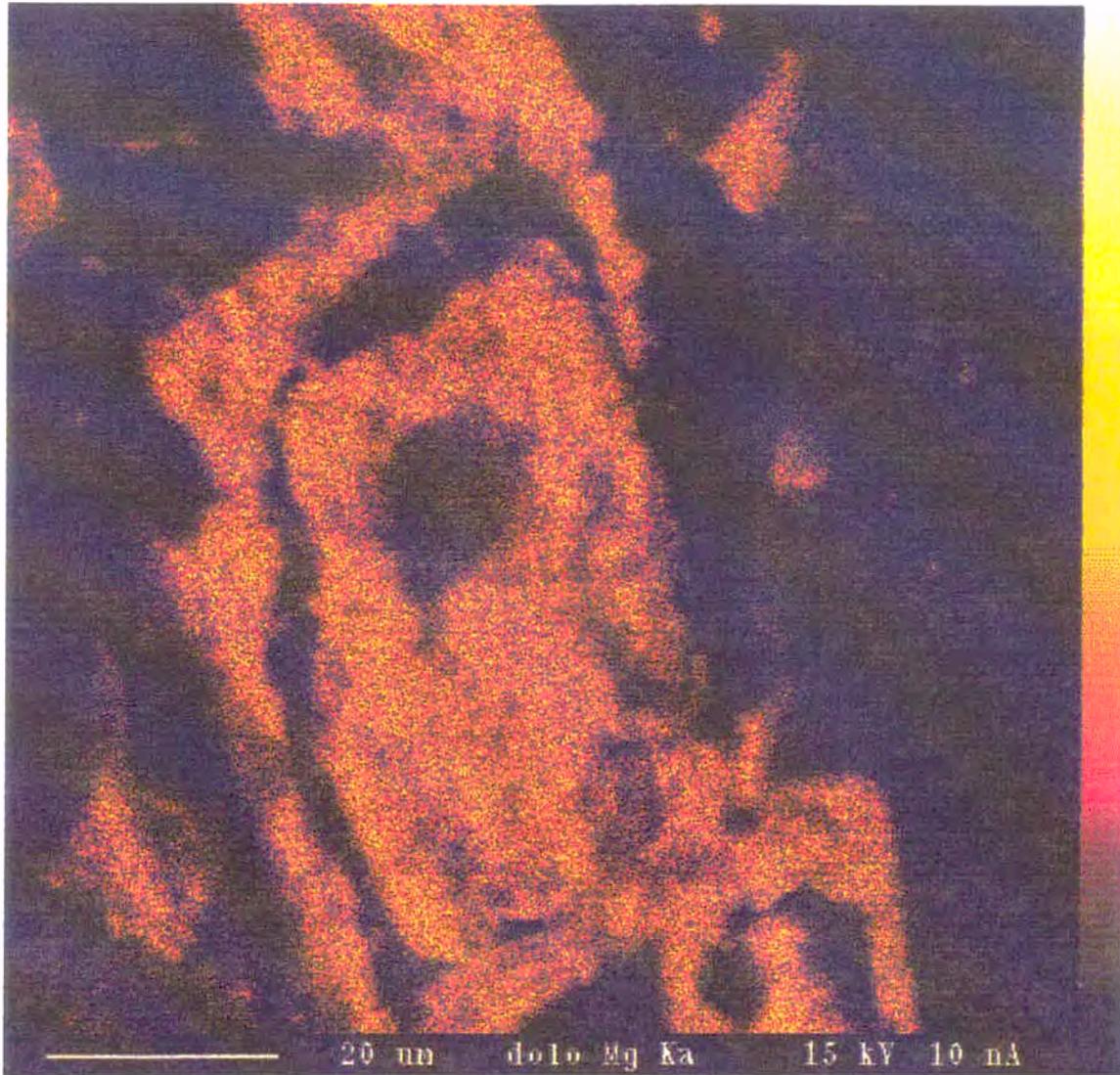


Imagen de rayos X. Mapping de Magnesio en una dolomita tipo "B"

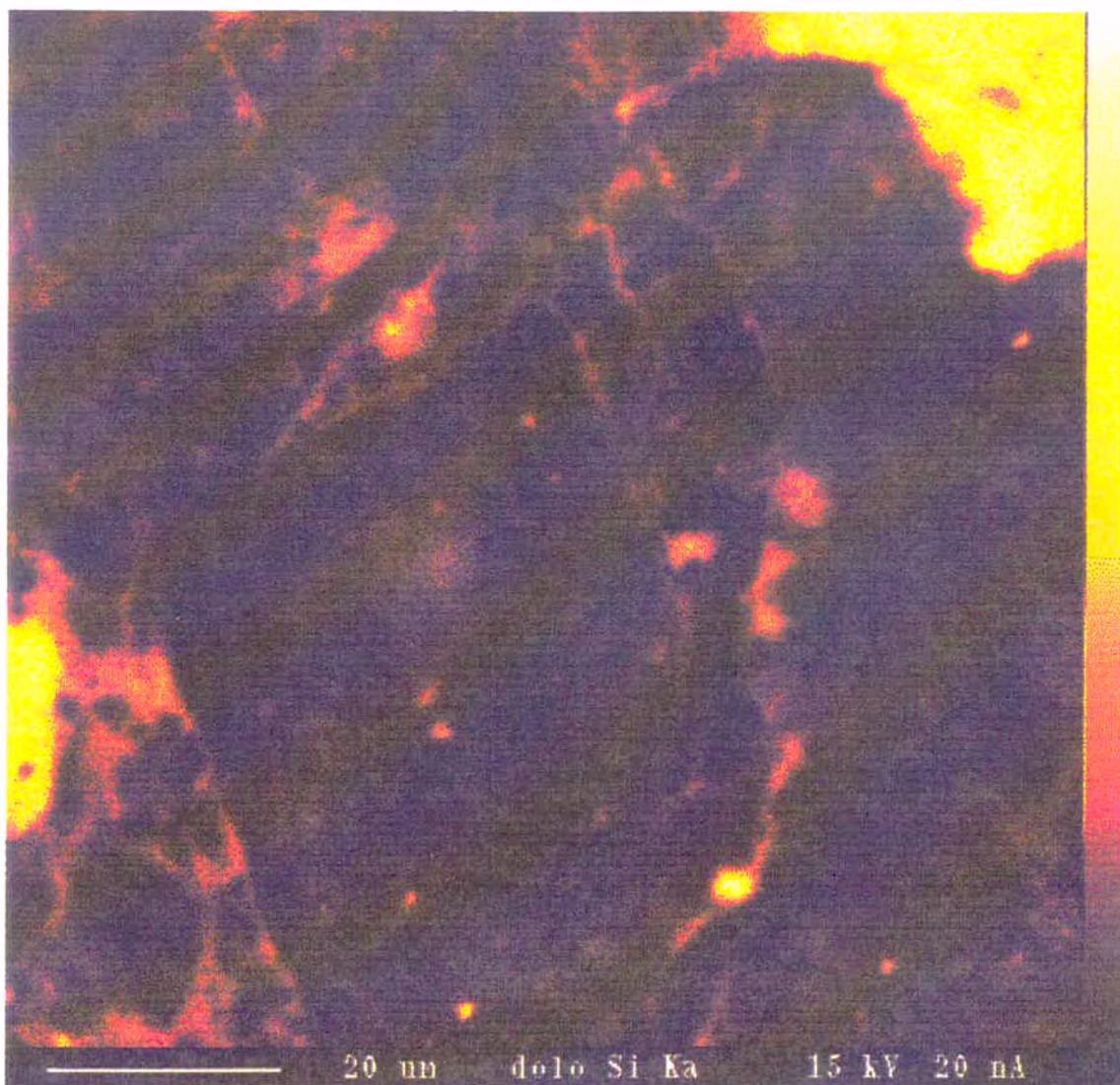


Imagen de rayos X. Presencia de sílice en el núcleo cristalino de las dolomitas

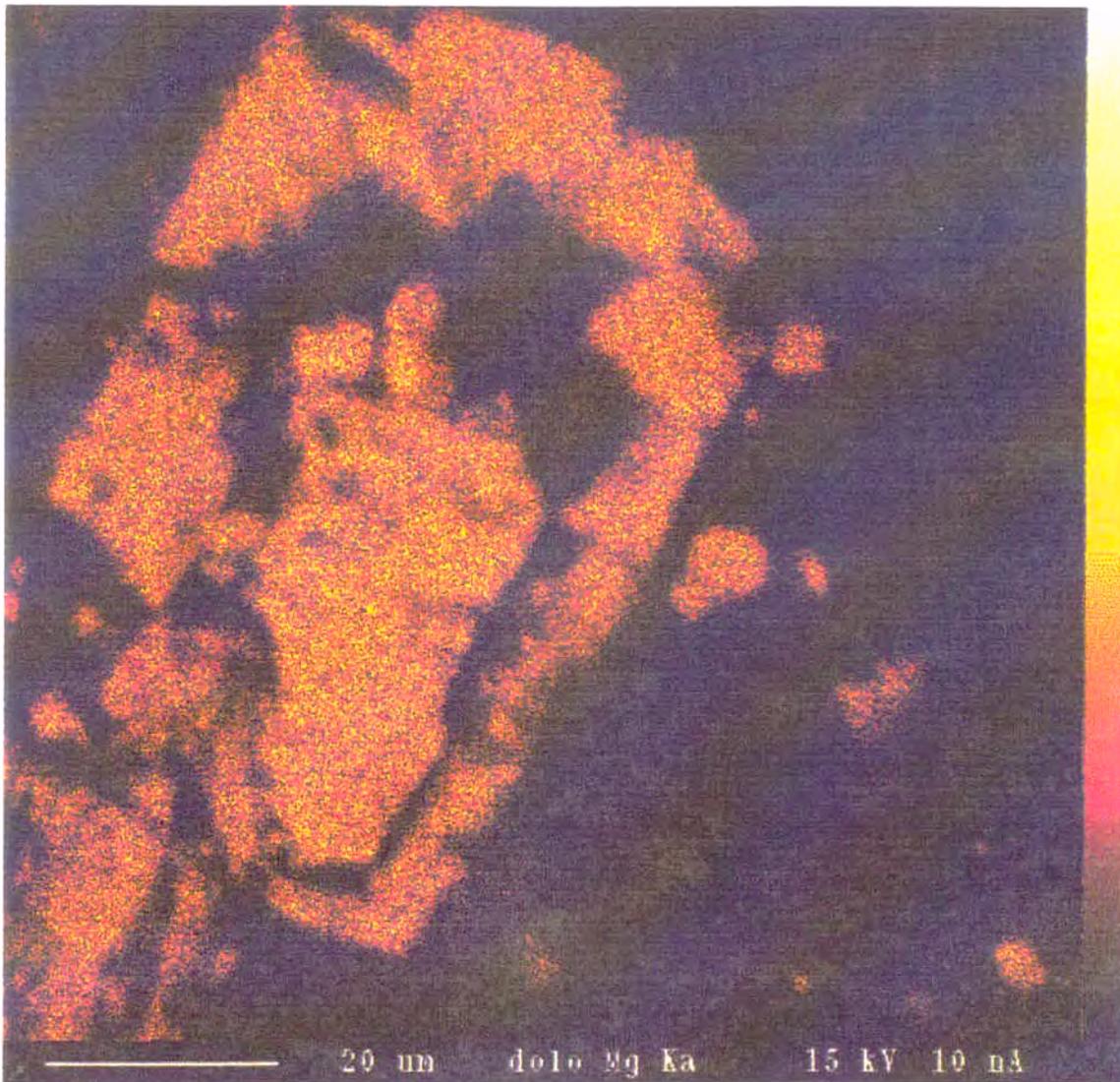


Imagen de rayos X. Mapping de Magnesio. Distribución Ca/Mg en las dolomitas tipo "B". Se observa el perfil Poligonal de las líneas de discontinuidad intracristalina.

**Tipos de cristales zonados
observados en Catodoluminiscencia**

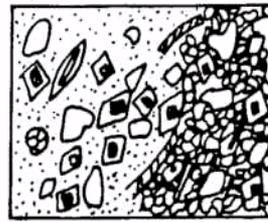
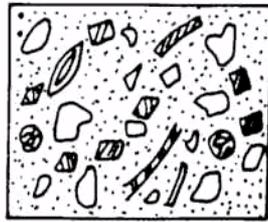
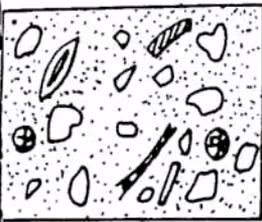
Br: borde cristal
Nu: núcleo
NL: no luminiscente
SL: si luminiscente

Secuencias normales (mayoritarias)

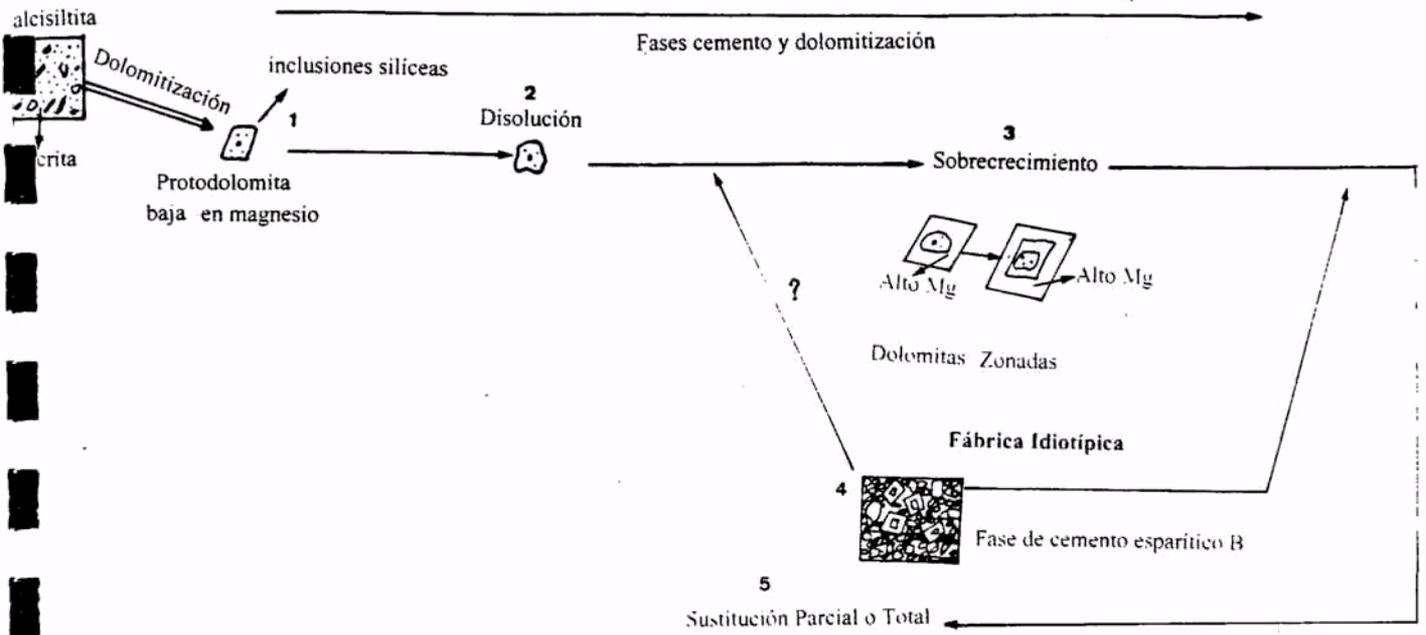
Fábrica CL3

<p>1</p> 	<p>Secuencia luminiscente NL-SL</p> <hr/> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> Br-NL Nu-SL </div>
<p>2</p> 	<p>Secuencia luminiscente NL-SL-NL-SL</p> <hr/> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> Br-NL Nu — { SL NL SL </div>
<p>3</p> 	<p>Secuencia luminiscente NL-SL-NL</p> <hr/>
<p>4</p> 	<p>Secuencia luminiscente NL-SL-NL (mancha difusa)</p> <hr/> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> Br-NL Nu SL NL (mancha difusa) </div>
<p>5</p> <p>Secuencias invertidas (minoritarias)</p> 	<p>Secuencia luminiscente SL-NL-SL</p> <hr/> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> Br-SL Nu NL SL </div>
<p>6</p> 	<p>Secuencia luminiscente SL-NL (gris difuso)</p> <hr/> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> Br-SL Nu-NL (gris) </div>
<p>7</p> 	<p>Secuencia luminiscente SL-NL</p> <hr/> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> Br-SL Nu-NL (pequeño punto central) </div>

Sedimento Original



Etapas Diagenéticas de la Fácies Calci-dolosilita



A₁ Fábrica Idiográfica Predominante



A₂ Fábrica Hipidiográfica Predominante

Fábrica Hipidiográfica

Dedolomitización 6

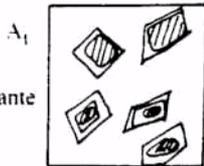
Cemento Esparítico



B₂

6.1 Lixiviado diferencial

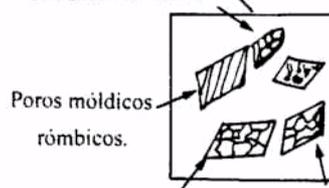
6.2 Sustitución pseudomórfica - Lixiviación total



A₁

Fábrica Idiográfica Predominante

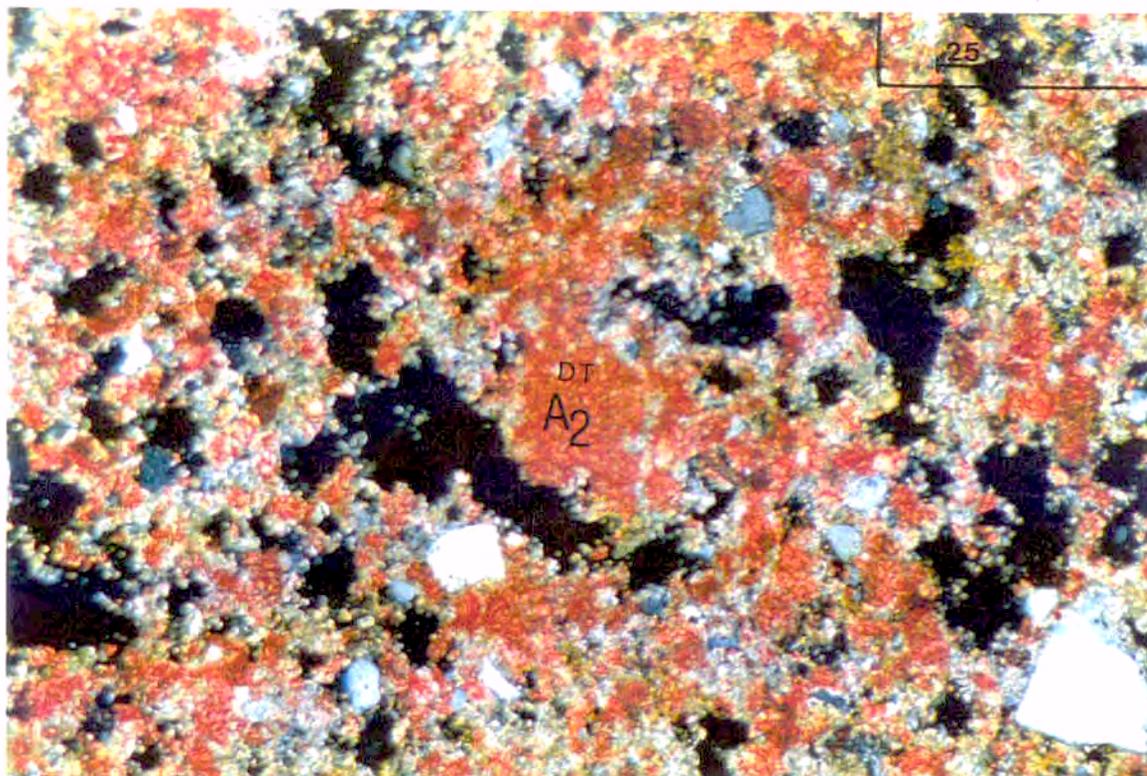
-Poros móldicos rómbicos



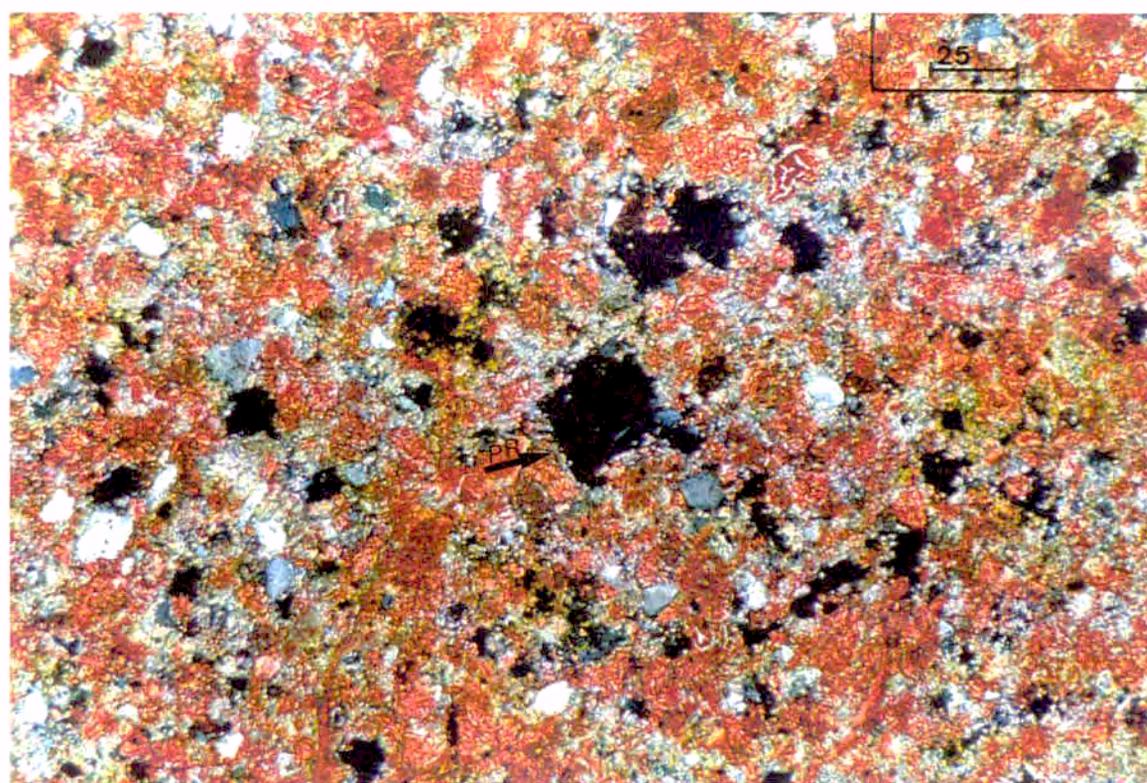
A₂

Fábrica Hipidiográfica predominante

Cristales pseudomórficos de esparita teñidos en rojo



An-4/32.F-1 LCLZ.5/ NC (40 x)
Dedolomitización. Fábrica Hipidiotípica A₂ de sustitución de cristales Idiográficos

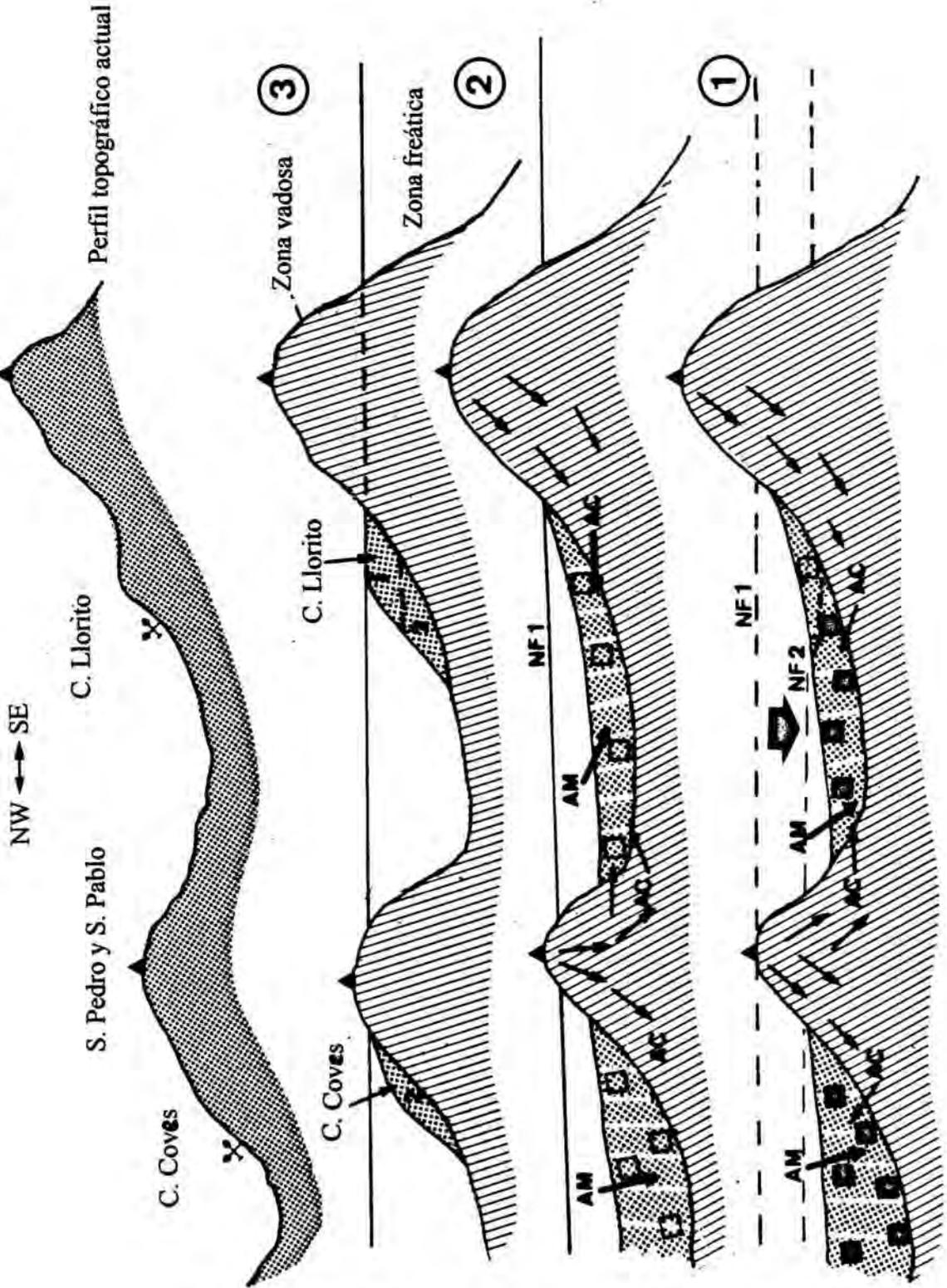


An-4/32.F-2 LCLZ.5/NC (40 x)
Disolución diferenciada. Cristales dedolomitizados dando poros rómbicos (PR)

Modelo Ambiental de las fases de Dolomitización Tipo "Mixing Zone"

E: 1/25.000

Ermita Ntra. Sra. Loreto



5 COMPOSICIÓN PETROLÓGICA Y FORMAS DE ALTERACIÓN DE ALGUNOS MONUMENTOS SIGNIFICATIVOS: MURALLA ROMANA, ANFITEATRO ROMANO Y "ARC DE BERÀ"

5.1 INTRODUCCIÓN HISTÓRICA Y DOCUMENTAL

5.1.1 La Muralla Romana de Tarragona

Se trata del más antiguo testimonio de la ingeniería militar romana en la Península Ibérica y el mayor monumento histórico de época romana que conserva Tarragona.

Actualmente tiene un perímetro de 1300 m.; según Pons d'Icart (s. XVI) alcanzaba los 4000 m., limitando una superficie de unas 70 a 75 Ha.

Ha sufrido numerosas fases de construcción y de remodelación o reparación parcial, las primeras en época romana y en época medieval. A partir del siglo XVI, su importancia militar comienza a disminuir, llegando a carecer de interés defensivo poco después de la guerra de la Independencia (y guerras carlistas). Podemos, pues, considerar, las siguientes etapas en su evolución:

- Fundación del campamento militar romano (primera fase o muralla primitiva: 220-218 a. C.)
- Ampliación y remodelación tardo-republicana (fase constructiva principal o segunda fase: 150-125 a. C)
- Recomposición Medieval y "Mur Vell" (siglo XII).
- Ampliación medieval ("La Muralleta": siglo XIV)
- Refuerzos y fortificaciones a partir del siglo XVI.
- Derribo y reconstrucción del área del "Portal de San Antoni" siglo XVIII.
- Construcción de una falsa barbacana defensiva, así como otras fortificaciones exteriores, por ingenieros ingleses (siglo XVIII).
- Reparaciones, después de la "Guerra del Francès", de época post-napoleónica.

Según el actual estado del conocimiento histórico documental, la primera muralla está relacionada con la ubicación del campamento militar de los Escipiones, situado junto a un "oppidum" ibérico llamado "Tarrakon", poco más o menos sobre 220-218 a. C., según autores. (Lamboglia, 1974; Hauschild, 1983; Aquilué, Dupré, Massó y otros 1986).

Esta primera fortificación amurallada, de 6 m. de altura por 4m de espesor, estaba realizada con grandes bloques de piedra en seco, técnica que se denomina ciclópea y que puede asimilarse a la primitiva fábrica romana denominada "opus siliceum". Además del muro se construyeron algunas torres de defensa (actualmente solo, quedan las de "Minerva", "Seminari" y "Arquebisbe"), que además de un muro de base ciclópea tenían un segundo cuerpo con sillares ligeramente almohadillados.

La segunda fase, cuya cronología es aún discutida, oscila entre el 150-125 a. C. Según esos autores, no tiene solamente fines militares sino de prestigio político, y supuso la ampliación del recinto amurallado, que se extendió rodeando la colina inicial del asentamiento, hasta llegar al cantil que separa este montículo de la línea de costa.

Esta fase constructiva es la más importante y dio la forma y estructura principal a la muralla. Supuso el recrecimiento, hasta una altura de 12 m. de la anterior y un aumento del ancho hasta alcanzar los 6 m de base que tiene de promedio.

La técnica constructiva se basaba en la construcción de dos paramentos paralelos de sillares con piezas de forma prismática ("opus quadratum") asentados sobre bloques ciclópeos ("opus siliceum") que constituyen un zócalo megalítico. La trabazón entre estos paramentos se realizaba por pequeños muros transversales de sillares (An-5/2)

El espacio intermuros se rellenaba con dos tipos de fábricas:

- Una base de piedra y tierra, sin cemento de cal, hasta alcanzar el nivel del zócalo megalítico.
- Un relleno de adobes encajados (fábrica de "later crudus") en hileras, hasta la coronación del muro y la base del enlosado que constituía el paseo superior de ronda.

Con la restauración de la ciudad en la época medieval (siglo XII), se recupera sobre todo la muralla correspondiente a la parte alta de Tarragona, lo que obliga a cerrar el recinto con una muralla nueva ("Mur Vell"), aprovechando la separación entre el antiguo circo y el "Forum Provinciae".

Durante el siglo XIV, se construye una muralla "La Muralleta" o "Mur Nou" delante de la fachada monumental del circo romano, con torres y paramentos añadidos a la construcción romana original. El espacio que queda entre ambos se rellena con tierras y piedra sin mortero.

La antigua muralla romana de la zona del "Portal de San Antoni", fue derruida y reconstruida de nuevo en época moderna (1737), pero con grandes variaciones en la técnica constructiva, pues no existe el zócalo megalítico y los sillares a diferencia de la antigua fábrica romana "opus quadratum", que estaban juntados en seco, están ahora unidos por mortero de cal aérea. Además el relleno interno es totalmente diferente, hecho con hormigón de cal aérea o argamasa (An-5/2).

Existen fotos del siglo XIX que demuestran que este paramento estaba revocado, pero la coincidencia o continuidad del perfil de estos sillares con los de otros paños de la misma muralla y de época romana, que no tienen recubrimiento, hacen pensar que la obra original del siglo XVIII tampoco presentaba revoque.

La Guerra de la Independencia, denominada popularmente del "Francès" en Cataluña, dañó muy seriamente la muralla, pero ya no se reparó con fábrica de sillería, sino con mampostería de bloques irregulares con mortero de cal aérea; en algunos sectores se realizó un revoque de mortero.

La reforma urbana desde mediados del siglo XIX, posibilitó el vaciado del interior de la muralla en algunos sectores y la construcción de viviendas y palacios en su interior.

La muralla de Tarragona, consecuentemente no presenta una homogeneidad, ya que ni hay sincronismo en su construcción, ni son iguales los materiales empleados (tipo de piedra y mortero), ni lo son las mismas técnicas constructivas, pero presenta zonas más o menos extensas donde es más uniforme. Por lo tanto su perímetro actual es la suma de dominios diferentes a veces solapados y con ciertas características comunes. Por estas razones hemos escogido para el estudio tres áreas diferentes (An-5/1), con las siguientes características:

1- Paseo de San Antonio

- Paramento del siglo XVIII
- Sin zócalo megalítico
- Con juntas de mortero de cal aérea.
- Relleno interno con hormigón de cal aérea o argamasa
- Composición petrológica predominante: calcisiltita tipo "Llorito"
- Orientación SSE-NNO

2- Paseo Torroja

- Paramento, externo e interno, de época romana
- Con zócalo megalítico
- Sin juntas de mortero
- Relleno interno original romano, con dos fábricas: "later crudus" y niveles de gravas
- Composición petrológica predominante: calcisiltita tipo "Llorito"
- Orientación NNE-SSO

3- Ronda de la "Baixada del Roser"

- Paramento de época romana
- Con zócalo megalítico
- Sin juntas de mortero

- Composición petrológica predominante: calcarenita tipo "Mèdol"
- Relleno original vaciado parcial o totalmente
- Orientación Sur
- Dentro del casco urbano

Esta selección se hizo con el objetivo de observar diferentes formas de alteración y la posible influencia de todos estos factores sobre los procesos de degradación.

5.1.2 El Anfiteatro Romano de Tarragona

El anfiteatro de la antigua ciudad romana de Tarraco se encuentra extramuros de la ciudad imperial, al pie de la colina donde se asentaba la ciudad, al lado de la playa del "Miracle" y cerca de la antigua Vía Augusta. Anteriormente el lugar estaba ocupado por una necrópolis del siglo I d.C.

Se trata de un edificio público de planta elíptica, destinado a espectáculos de gladiadores, fieras y a veces se usó como lugar de ejecuciones, etc. Los ejes mayor y menor del área central o arena (espacio donde se tenía lugar los espectáculos) son, respectivamente, de 61.5 y 38.5 m. Además presenta unas construcciones subterráneas según dichos ejes, que constituyen lo que se denomina los "fossae", destinadas a la tramoya del espectáculo, y una pequeña capilla dedicada a Némesis por los gladiadores.

Las gradas o "cavea", estaban separadas de la arena por un muro o "podium" y un pasadizo de servicio.

La "cavea" tiene una estructura más o menos asimétrica debido a cambios de técnicas constructivas, ya que el sector occidental se construyó rebajando las gradas en la roca natural, mientras que en la zona oriental se construyó sobre arcos de medio punto. Está dividida en tres sectores o áreas concéntricas, de diferente altura, delimitadas por pasadizos y pequeños muros, que separaban las diferentes clases y estamentos sociales.

En los extremos del eje mayor de la arena había dos puertas de acceso a la misma, el acceso occidental o Porta Triumphalis, y el acceso oriental o Porta Libitinensis. Además había un acceso subterráneo a los "fossae".

Las técnicas constructivas se distribuyen de la siguiente manera (An-5/10):

- Los contrafuertes exteriores están contruidos con "opus quadratum" (sin morteros; si lo hay en las juntas de sillar es de reconstrucción o reparaciones posteriores).
- Los "fossae" están hechos con muros encofrados, alternando con fábricas de sillares de grandes bloques en las esquinas o cruces de dos pasadizos de los "fossae".
- Las gradas meridionales están construidas sobre una base de "opus caementicium", recubiertas por un enlosado hoy casi desaparecido.

- Los muros del podium y de las diferentes separaciones de la "cavea" estaban realizados en "opus vittatum". Actualmente la mayoría son producto de la reconstrucción de los años 70.
- Los arcos del acceso meridional a la "cavea", hechos con "opus caementicium" y algunos muros de aspecto más irregular, con grandes bloques, recuerdan el "opus incertum", descrito en el circo romano de Tarragona por las memorias de excavación del "Taller Escola d'Arqueologia (TEDA. 1990).
- La inscripción monumental que corona el "podium" dedicada a Heliogábalo (218-222. d. C), está realizada con bloques prismáticos verticales que se apoyan sobre sillares alargados. La parte superior de la inscripción se ha cincelado en la cornisa del "podium". También hay vestigios de su enlosado con mármoles.

El Anfiteatro se considera que fue construido en el siglo II d. C. , pero parece que se realizó una importante reforma en el siglo III, en tiempos de Heliogábalo, según consta en la inscripción del podium ya mencionada (Arbeloa, 1989, 1991; Aquilué, Dupré, Massó y Ruiz de Arbulo, 1991).

En el año 259 d. C. son quemados en la arena el obispo Fructuos y sus diáconos. Esto provoca que, posteriormente, fueran construidas sucesivas iglesias conmemorativas en dicho lugar. La primera, una basílica visigoda (siglo VI d. C.), sirvió de fundamento a una mayor de estilo románico en el siglo XII, denominada Santa María del Miracle.

Esta iglesia, con planta en cruz latina y una sola nave central, se mantuvo como convento hasta 1780, que pasó a ser propiedad del estado, y desde 1801 hasta 1908 se convirtió en presidio para los reclusos condenados a trabajos forzados en las obras del puerto. A partir de 1910 pasa a ser propiedad del ayuntamiento de la ciudad.

Los trabajos de excavación del anfiteatro se inician en 1922, y luego se desarrollan de manera muy intensa durante los años que van de 1948 a 1957, bajo la dirección de Samuel Ventura. Paralelamente, la estructura de la antigua cárcel del Miracle va siendo derruida, así como la cubierta de la iglesia y gran parte del revoque moderno que cubría las paredes de la nave central. Desde 1967 hasta 1973 se reconstruye parcialmente el anfiteatro, bajo la dirección del arquitecto A. Ferrant, por encargo de la Dirección General de Bellas Artes. Finalmente cabe citar las excavaciones realizadas por "El Taller Escola d'Arqueologia (TEDA)" del Ayuntamiento de Tarragona, en 1990.

Esta complicada historia hace muy difícil distinguir los materiales originales de los añadidos en las diferentes reparaciones y reconstrucciones. Pero como nuestro objetivo no es histórico sino establecer los procesos de alteración, la antigüedad es de relativa importancia, ya que tampoco buscamos la intensidad y sí, más bien caracterizar los mecanismos de deterioro más significativos, que se desarrollan con rapidez y muchas veces sobre materiales reutilizados que van acumulando las huellas del deterioro a lo largo del tiempo. Aún así nos hemos centrado en áreas con fábricas de sillares, pues concentran las litologías de más interés (facies miocénicas) y presentan un porcentaje importante de material original o antiguo. De la misma forma se seleccionó el interior de la nave central de la iglesia, por su naturaleza petrológica y las especiales características alterológicas que le puede haber inferido su recubrimiento con morteros existentes hasta hace pocas décadas.

5.1.3 "Arc de Berà"

El "Arc de Berà", está situado en la carretera nacional N-340, Barcelona-Tarragona, en el Km. 270. Se trata de uno de los monumentos más significativos del conjunto arqueológico de la antigua ciudad romana de Tarraco.

Según la interpretación de la inscripción situada en la parte alta del arco, ya documentada desde 1525 por Pons d'Icart, este monumento fue construido a la muerte del senador Lucius Licinus Sura, entre los años 102 y 107 d. C, en época del emperador Trajano. Pero estudios arqueológicos más recientes (especialmente la realización de una tesis monográfica sobre el mismo, X. Dupré-1992), parece indicar una época más antigua. En efecto, el estudio paleográfico realizado a partir de la inscripción latina del arquitrabe de una de las fachadas del monumento, unido al análisis arqueológico de la manufactura de determinados elementos arquitectónicos, parecen indicar que fue construido a la muerte de un personaje homónimo y antecesor del anterior, muerto a finales del siglo I a. de C. , en época del emperador Cesar Augusto. Es un arco honorífico, situado a unos 20 Km. de distancia de la antigua capital provincial. No esta claro que marcara un límite territorial, sino que, más bien, parece tratarse de un monumento suburbano, erigido en un punto de valor escenográfico y paisajístico singular, por razones políticas o de prestigio. A pesar de ser una obra civil, no parece que fuera construido por el estado sino por iniciativa privada de la aristocracia local. Probablemente su construcción es coetánea de las obras de reforma de la antigua vía de unión entre Tarraco y la colonia de Barcino (actual Barcelona), que a partir de este momento pasó a denominarse Vía Augusta.

La técnica constructiva es simple. De una base o zócalo de bloques ciclópeos, empotrados en el suelo, arrancan los dos hastiales del arco, contruidos por una fábrica de sillares muy rectos y ajustados entre sí, tipo "opus quadratum", que están labrados y que en su parte superior se desarrollan las cornisas y capiteles correspondientes. Se trata, pues a ambos lados del arco, de un muro macizo, o sin relleno, constituido por sillares de elementos de material miocénico, bien trabados entre sí, sin argamasa. La base son bloques megalíticos de caliza mesozoica empotrados en el terreno, constituido por estratos arenosos de ambiente costero del cuaternario antiguo o del plioceno.

El monumento ha sufrido tres restauraciones importantes, en los años 1788, 1840 y 1936.

En las obras de 1788 se sustituyeron sillares y la parte superior del lado oriental, con el añadido de tres capiteles.

Las obras de 1840 realizadas en honor de la reina Isabel II y del general Espartero, para celebrar la victoria en las guerras carlistas, fueron poco respetuosas y modificaron ampliamente el monumento, especialmente la cornisa superior, en la que se movieron sillares y se labró una nueva cornisa. De esta época es muy probable que se aplicara un recubrimiento pictórico. También se repararon juntas de sillar con la aplicación de morteros modernos, que lógicamente no existían en época romana.

En los inicios de la guerra civil española, se instalaron cargas explosivas, que aunque no llegaron a explotar totalmente, se lesionó gravemente la parte interna del pilar oriental, que se apuntaló y reconstruyó rápidamente por los servicios técnicos de la "Generalitat de Catalunya".

Hasta el inicio de los años sesenta, el tráfico pasaba por debajo del arco, que hoy en día solo lo rodea. Probablemente en esta misma época se hizo otra pequeña restauración.

Como producto de una de estas dos últimas intervenciones durante el presente siglo se aplicó cemento rápido con escaso árido, para sellar fisuras y reparar juntas de mortero, especialmente en el hastial E del arco dañado durante la guerra, lo que ha tenido nefastas consecuencias por la formación de gran cantidad de sales y sobre todo por su interacción con los cloruros y sulfatos.

5.2 UTILIZACIÓN DE MATERIALES Y CRONOLOGÍA DE LAS EXPLOTACIONES

5.2.1 Materiales pétreos utilizados

Los edificios históricos de la obra civil romana de Tarraco, están contruidos con seis tipos de fábricas diferentes:

- "Opus quadratum", sillería en bloques prismáticos de gran tamaño (frecuentemente entorno a 1m de longitud y entre 40 a 60 cm. de ancho y unos 60 cm. de profundo), que normalmente están unidos sin mortero.
- "Opus vittatum", bloques de piedra también de forma prismática similares a ladrillos, con un tamaño máximo que oscila entre los 10 y los 15 cm. de longitud.
- "Opus caementicium", hormigón de cal aérea, con gravas gruesas y arena.
- "Opus incertum", hormigón de cal aérea, con bloques irregulares mezclado con gravas y arenas, que dan una textura irregular.
- "Opus siliceum", bloques ciclópeos encajados, sin mortero.
- "Later Crudus", fábricas de adobe o ladrillo crudo, realizados con pasta cernida.

Excepto esta última fábrica constructiva, el resto utiliza la piedra de cantera como material de uso o elaboración.

Como ya explicamos en la introducción del capítulo 3, nuestro interés se ha centrado en la obra de sillería realizada con "opus quadratum" y su realización o imitación en obras posteriores (Paseo de San Antonio, Iglesia del Miracle), pues son los materiales más alterados y de composición petrológica muy definida (facies miocénicas). A continuación se expone un cuadro (tabla 5.I) que muestra su distribución en los monumentos estudiados.

MONUMENTO	SECTOR	CANTERA	PORCENTAJE
Muralla romana	A: Paseo San Antonio	"Coves del Llorito" "Coves de la Pedrera" "El Mèdol"	90-95% 2-3% 3-5%
	B: Paseo Torroja	"Coves del Llorito"	100%
	C: Baixada del Roser	"El Mèdol" "Coves del Llorito" "Coves de la Pedrera"	90% 3-7% 3-5%
Anfiteatro	A: Sector "A" Acceso meridional	"Coves del Llorito" "El Mèdol" "Punta de la Creueta" "Roda de Berà" "Els Munts"	70% ----> 30%
	B: Sector "B" Iglesia del Miracle	"El Mèdol" "Coves del Llorito" "Punta de la Creueta"	70-80% 15-20% 5-10%
	C: Sector "C" Acceso occidental	"El Mèdol" "Els Munts" "Coves del Llorito"	60% ----> 40%
"Arc de Berà"		"Roda de Berà" CRB1 + CRB2	100%

TABLA 5.1: Obra de sillería

Los valores porcentuales son aproximados, ya que la alteración a veces impide un reconocimiento exacto de la petrología del sillar y es imposible realizar un reconocimiento exhaustivo en lámina delgada. Por eso cuando se señala con una flecha (---->), las cifras se refieren al conjunto de canteras del mismo tipo de facies calcarenita que están por debajo de la flecha, ya que es muy difícil establecer el porcentaje de cada cantera por su semejanza a escala de observación macroscópica.

La identificación y correlación entre cantera y sillar se ha llevado a cabo según dijimos en el capítulo anterior, mediante técnicas petrológicas (que permiten determinar las similitudes de composición y textura) y petrofísicas (especialmente aspectos porosimétricos).

El uso de estas canteras y materiales se basa en criterios muy prácticos: proximidad a la obra en construcción, o existencia de vías de comunicación, tanto terrestres como marítimas. Pero se debe también a su facilidad de empleo en la fábrica constructiva: resistencia (al menos aparente), color y poco peso (densidad aparente). También ha sido tenida en cuenta la facilidad de labrado. Es evidente que los conocimientos empíricos de los romanos tenían sus limitaciones ya que no poseían un amplio bagaje científico suficiente para prever su durabilidad y que, como veremos en capítulos sucesivos es muy diversa y obedece a causas texturales y mineralógicas que necesitan una sofisticada observación microscópica y una serie de análisis muy precisos.

5.2.2 Cronología de las explotaciones

No existen argumentos geológicos ni arqueológicos que permitan saber con precisión la cronología de las explotaciones estudiadas a partir de los datos obtenidos solo en cantera. Pero los estudios realizados sobre los materiales utilizados en la construcción de los edificios históricos reseñados, nos permiten establecer una fecha aproximada del inicio de explotación. Se trata de fechas mínimas que no excluyen otras explotaciones anteriores, actualmente no constatable como edificios históricos. Pero estos datos cronológicos los consideramos muy significativos dada la importancia de los monumentos con los que están relacionados.

Tampoco podemos precisar la duración de una explotación, salvo excepciones como la que indica Del Amo (1981), para "Els Munts", cuyo límite de extracción romana se sitúa al final del siglo IV o principios del V, ya que se relaciona con el colapso y decadencia que sufre la Tarraco Imperial, que es finalmente tomada por los musulmanes entorno al 713-714.

En general, ya en el Bajo Imperio (a partir de los siglos III-IV), y sobre todo a partir de la Edad Media (siglo XII), hay una clara reutilización de la piedra, puesta en evidencia por los desmontes de edificios, reutilización de sillares y expolios de piedras y otros materiales constructivos en excavaciones.

Las canteras empleadas para un fin específico, no solo indican de forma bastante precisa el inicio de su explotación, sino que también acotan bastante su duración. Este criterio, no obstante, no debe generalizarse; así por ejemplo, se han encontrado sillares de la cantera de "La Punta de la Creueta" en el Anfiteatro Romano, lo que indica un uso más prolongado de lo que señala la edad de la Torre de los Escipiones, para la que inicialmente fue utilizada esta cantera de forma casi exclusiva.

Por otra parte, la reutilización de materiales, especialmente durante la Edad Media, hace poco probable la reexplotación de estas canteras; quizás la restauración de la ciudad durante el siglo XII pueda mostrar alguna explotación muy puntual.

Podríamos pues establecer la siguiente cronología para cada una de las explotaciones:

La cantera del "Mèdol"

Dada su utilización en la construcción de torres de defensa de la muralla (por ejemplo la Torre de Minerva: Hauschild 1983), podemos considerar que su uso en la Tarraco romana se inicia con la primera fase constructiva de la muralla (primera fase 218-200 a. C. , según autores) y se explota exhaustivamente durante todo el Imperio. La reexplotación está arqueológicamente documentada por la extracción de sillares de menor medida que los sillares romanos. Especialmente en el área norte, que ya hemos comentado, donde es más irregular y de peor calidad. Probablemente esta extracción postromana se inicia durante la Edad Media.

La cantera de "Les Coves del Llorito"

Su explotación se inicia, con toda probabilidad, con la segunda fase constructiva de la muralla (150-125 a. C.: Aquilue, Dupré, Massó, Ruiz 1991)), cuyo testimonio más fiel lo constituye el

Paseo Torroja y parte del Paseo Arqueológico. La utilización de los materiales de esta cantera en el circo (finales siglo I d. C.) y en el anfiteatro, en los sillares de los contrafuertes de las puertas de acceso (siglo II d. C.), indica que el mayor volumen de extracción se realizó también en los primeros tiempos de la ciudad. Esto tiene sentido si consideramos la dificultad de su explotación en cuevas, sin entibar, con continuos y peligrosos derrumbamientos del techo.

Es más que probable que por las mismas razones técnicas, no fuera reexplotada en la Edad Media. Nos queda la posibilidad de una extracción más tardía durante el siglo XVIII, para la reconstrucción de la muralla en el sector del Paseo de San Antonio. Pero incluso esta posibilidad es discutible ya que se han mantenido muy bien las marcas de extracción al estilo romano, y dado el tiempo transcurrido desde la primera explotación romana los desplomes ya debían haber hecho bastante peligroso su reexplotación. Por otra parte la posibilidad de la apertura de una nueva cantera parece bastante descartable, pues pudiéndose argumentar en su contra las siguientes razones petrológicas:

- Las fábricas dolomíticas estudiadas en las tres "Coves del Llorito", tanto en las que predomina la fábrica idiotípica, como en las que predomina la hipidiotípica, se encuentran repartidas de forma desigual tanto en el paramento romano del Paseo Torroja, como en el Paseo de San Antonio del siglo XVIII. Lo que indica que las tres canteras han sido utilizadas tanto en el paramento romano más antiguo como en el más moderno.
- En concreto las texturas con un predominio más claro de la fábrica idiotípica (tipo CLZ2 - Cueva B y tipo CLZ.7 - Cueva C, ver capítulo 4) con cristales rómbicos zonados, son muy abundantes en el sector del Paseo de San Antonio pero también son muy frecuentes en el Paseo Torroja. Lo que reafirma el criterio ya expuesto del uso de las tres cuevas en los dos lienzos de muralla.
- Un mineral arcilloso muy significativo como es la palygorskita, especialmente abundante en la variedades más arcillosa de la cueva A, también se encuentra en los dos paramentos citados.

Así, pues, es evidente que por razones geológicas es muy difícil argumentar la explotación de una nueva cantera durante la construcción del sector amurallado del Paseo San Antonio durante el Siglo XVIII. Todo parece apuntar que los sillares de dicho sector de la muralla fueron inicialmente extraídos en época romana y posteriormente reutilizados durante la fase de reconstrucción del siglo XVIII.

Cantera "Roda de Berà"

Su uso, casi exclusivo en el arco honorífico del mismo nombre, permite atribuir el inicio de su explotación a los finales del siglo I a.C. , en época de Cesar Augusto. En cambio es muy difícil establecer la duración de su explotación, pues las numerosas reparaciones que ha sufrido el arco, seguramente desde época antigua, se han realizado con el mismo tipo de piedra. Además es evidente su empleo como material constructivo en la propia población de "Roda de Berà". También son posible pequeñas contribuciones en algún monumento de Tarraco, como puede ser el anfiteatro romano.

Cantera "La Punta de la Creueta"

Como en el caso anterior, su limitado volumen de explotación, lo específico de la textura y contenido fosilífero (erizos del tipo "Scutella" y ostreidos enteros), así como el contenido en óxidos de hierro, hacen que el material de esta cantera sea fácilmente identificable en La Torre de los Escipiones, por lo que la fecha de inicio de explotación de aquella coincidiría con la construcción de ésta en el siglo I d. C. La localización de algunos sillares de gran volumen y con estas mismas características petrológicas, en el foso de la arena del anfiteatro (construido durante el siglo II d. C.), permite deducir que hubo alguna explotación posterior, pues su posición estratégica en un cabo facilita el transporte marítimo del material extraído.

Cantera de "Els Munts" - "Platja dels Capellans"

Se trata de un caso muy similar al de "La Punta de la Creueta". Su empleo se justifica, según Del Amo (1981), por la construcción de las termas de la playa y, en menor medida, por la propia Villa dels Munts, cuya construcción se realiza en el siglo I d. C. , en época de Claudio I, según la misma autora.

También, como en el caso de la cantera de "La Punta de la Creueta", se han detectado sillares de esta características petrológicas ("grainstone" de foraminíferos, heterostesginas y anfistesginas, con vetas calcáreas) en los contrafuertes de los accesos del anfiteatro, su fácil acceso marítimo justifica su empleo en este caso.

No diremos nada nuevo sobre el acueducto romano, que no lo incluimos en este estudio por razones técnicas y de espacio, salvo indicar que para su construcción se recurrió a las canteras de "Mas dels Arcs" y a las propiamente llamadas Canteras del Acueducto. Estos yacimientos están en clara relación con esta obra, no solamente durante la construcción sino en numerosas reparaciones posteriores.

"Les Coves de la Pedrera" también han contribuido en algún sillar de la muralla romana y, más raramente, del anfiteatro. Este uso tan limitado, parece indicar que se trata de reparaciones puntuales y bastante posteriores a la construcción de estos edificios monumentales de Tarraco.

La cantera del "Mas del Marqués", puede haberse utilizado muy localmente en algún edificio de Tarraco, dada la similitud petrológica de sus estratos basales con el material de "El Mèdol" (especialmente de la cantera CMM2). Lo mismo puede decirse de la pequeña cantera de "La Platja de l'Arrabasada", cuya litología parece estar presente al menos en algún sillar de la muralla, en el sector del Pretorio, y en los muros externos del circo, al final del Paseo de San Antonio.

5.3 FORMAS DE ALTERACIÓN

(tablas 5.II y 5.III)

Los "mappings" de las formas de alteración se ha realizado mediante dos técnicas distintas, en unos casos señalando las formas mediante letras de un código diseñado siguiendo en parte las

indicaciones de Fitsner (1990) , y en otros mediante tramas , utilizando los programas de ordenador de diseño gráfico.

5.3.1 Muralla romana de Tarragona

5.3.1.1 Sector del Paseo de San Antonio

(An-5/3 y An-5/4)

El extraordinario retroceso superficial, así como la alveolización y arenización asociadas, son las formas de alteración dominantes, que constituyen un caso único en un edificio histórico o monumental en España. Así hay sillares de los que apenas queda un esqueleto residual, con sectores (como el área más cercana al Portal de San Antonio donde es frecuente la pérdida de más del 50% del volumen original del sillar. El lixiviado y la acción mecánica del agua de escorrentía acelera el proceso de degradación, removilizando el material.

Esta destrucción tan acelerada, de la textura superficial de la roca, por la suma del lavado y la alveolización dificulta el desarrollo y estabilización de costras de alteración, que también se arenizan o se desprenden con facilidad.

Estas costras que caen con facilidad por falta de soporte tienen un color grisáceo en general y podemos dividir las en tres tipos:

- costra gris-oscuro
- costra gris con áreas ennegrecidas
- costra gris pulverulenta.

La primera tiene la clara consistencia y naturaleza de una costra de yeso, y se sitúan sobre la superficie ya arenizada y alveolizada del sillar. También pueden rellenar fracturas paralelas a la superficie teniendo una falsa cohesión y desprendiéndose con frecuencia como una piel o molde del relieve de la piedra ("contour scaling"). Esto indica que se trata de una costra interna, que crece hacia dentro y transforma mineralógicamente el sustrato rocoso (Zehnder, 1979).

Las segunda son parecidas a las costra de yeso anteriormente descritas, pero se localizan preferentemente en las repisas y en las zonas de retención de agua. Tiene un aspecto más pulverulento y cuando se humedecen las áreas ennegrecidas adquieren tonos verdosos, indicando su naturaleza líquénica.

Las costras grises más pulverulentas se localizan, preferentemente, en la parte izquierda del Portal de San Antonio. Son de escaso grosor, como una fina película, y tienen muy escasa consistencia. Presentan gran acumulación de depósitos de polvo y suelen ir acompañadas de procesos de descamación y arenización. Además suelen observarse en ellas finas eflorescencias blancas y grumosas, muy reducidas, y el sustrato suele estar profundamente arenizado.

Aparte de las costras hay otras formas que pueden pasar más inadvertidas en un primer examen. Son la fina descamación, que con cierta frecuencia va asociada con pequeños nódulos salinos de color blanco, y que pueden dar lugar a lo que denominamos "picado". Ambas indican también una acción muy activa de las sales solubles, que favorecen la disgregación mecánica de la roca.

Mención aparte merecen otras dos formas que se observan, casi exclusivamente, en esta parte de la muralla:

- Las costras periféricas de sillar
- Las costras carbonatadas o endurecimientos superficiales

Ambas formas son más duras y compactas que el interior del sillar y presentan tonos más oscuros o marrónceos. Su consistencia favorece la erosión diferencial que las hace resaltar sobre el resto de la superficie arenizada, generando como una aureola o banda periférica que, a veces, queda como un esqueleto residual si el retroceso es muy acusado.

5.3.1.2 Sector del Paseo Torroja

Este extenso paramento que va desde el cruce con el Paseo de San Antonio hasta la entrada del Paseo Arqueológico, puede subdividirse en tres zonas:

- a- La primera zona es un reducido trozo de paramento que hace esquina con el Pasco de San Antonio. Mucho más bajo que el resto, ya que apenas alcanza algo más de 3 m. de altura, sobresale varios metros sobre la planta del resto de la muralla romana. Corresponde a los restos de un antiguo fortín de origen medieval.
- b- Hacia el oeste, y a lo largo de unos 20 m., se sitúa el segundo tramo que tiene base megalítica. Ha sufrido pérdidas y demoliciones parciales en su parte media superior, lo que ha originado la sustitución de la fábrica de sillería romana original por otra de mampostería irregular, recubierta por un fino revoque, actualmente bastante alterado.
- c- El tercero, más extenso, y occidental corresponde al resto de la muralla del Paseo Torroja, también con base megalítica.

Zona a

(An-5/5)

La heterogeneidad petrológica de los sillares determina, claramente, la distribución de las formas de alteración.

Los sillares constituidos por el litotipo "Llorito", presentan un retroceso superficial moderado, con descamación, decostración y "picadura" intensa. Es importante señalar que gran parte de este "picado" esta causado por el lixiviado diferencial de eflorescencias blancas, en forma de

miconódulos, frecuentemente asociados a las áreas con descamación. Este "picado" es, en consecuencia, un conjunto de microalveolos o moldes vacíos de las eflorescencias salinas.

Algunos de estos sillares presentan depósitos de polvo, lo que les confiere un aspecto grisáceo, similar a las costras grises pulverulentas ya descritas en el Paseo de San Antonio.

El resto de los sillares son del litotipo "Les Coves" y otros, más escasos, son del litotipo "Mèdol". Apenas sufren retroceso superficial, pero presentan recubrimientos por costras y/o polvo, con tonos grisáceos. Además presentan diversos grados de picado.

Los sillares más bajos de este paramento están más alveolizados, algunos con un moderado retroceso superficial. Algún bloque presenta costras biogénicas verdosas, especialmente los de la cornisa superior, y se observan restos de "pintadas" actuales en la segunda y tercera fila de sillares.

Zona b

(An-5/6)

La fábrica original de sillares es de composición muy homogénea, y está constituida de forma prácticamente exclusiva por el litotipo "Llorito", aunque el grado de alteración varíe a lo largo del paramento.

El extremo oriental, así como las filas de sillares de la mitad superior y más occidentales, están mucho más alterados que el resto del muro ya que sufren una alveolización y un retroceso superficial moderadamente intenso. También en estos sectores la descamación, y en menor medida la decostración, es importante.

Algunos sillares presentan costras y/o capas de polvo grisáceas. Localmente estas costras tienen un aspecto gris oscuro, y se superponen a una superficie alveolizada. Tienen, por tanto, las mismas características que las costras oscuras de yeso observadas en el sector del Paseo de San Antonio.

Los sillares inferiores y hasta media altura, presentan costras líquénicas grises (*Verucaria sp.*, *Dirina masseliensis*, *Lecania sp.*, ver capítulo 8), que se diferencian de los otros tipos de costras del mismo color, generadas por procesos de contaminación y sulfatación, por presentar tonos más claros y verdosos y una superficie más compacta y de aspecto agrietado.

Los sillares superiores, así como la fábrica de mampostería, presentan un recubrimiento por costras líquénicas negras (*Lecania sp.*, *Peltula euploca*, ver capítulo 8) y depósitos de polvo.

Las juntas de sillar no tienen mortero, pero muchas de ellas, especialmente las de las áreas antes citadas (más alveolizadas), están muy alteradas, debido a la acción mecánica del agua de escorrentía. Este efecto del agua se suma en algunos sillares a una desplazación y/o exfoliación convexa, que afecta preferentemente las caras laterales de los bloques del sillar. Además de estos factores hay que añadir la acción de las palomas que, sobre todo en las partes altas del muro, aprovechan estas deterioradas juntas para instalar sus nidos, dando lugar a cuevas de una cierta magnitud, con diámetros de 20 a 30 cm.

Zona c

(An-5/7)

Como en la zona anterior, la composición de la fábrica es homogénea y representa una de las áreas que mejor conserva la estructura original romana, estando constituida por el litotipo "Llorito".

La intensidad de la alteración es inferior a la de otros sectores descritos hasta hora. La pérdida de volumen y el retroceso superficial sólo son intensos en determinadas áreas del muro, que se localizan en la mitad superior. No obstante, en ellas, la desplazación es intensa y va acompañada de

otras formas menores de descamación y decostración. La acción mecánica del agua se manifiesta claramente, en la formación de acanaladuras que aprovechan preferentemente las juntas de sillar alveolizadas. Como en el caso de la zona b, las palomas han aprovechado estos huecos, produciendo numerosas cavidades.

Lo que destaca de esta zona es el frecuente recubrimiento, de distribución irregular y aspecto parcheado, que ha generado el desarrollo de costras liquénicas, con las especies ya reseñadas en el apartado anterior .

Las costras liquénicas, negras y de aspecto pulverulento, se localizan preferentemente en la parte superior del muro.

Suelen contener notable cantidad de polvo y no son incrustantes. En varios sillares de la zona media e inferior pueden coexistir y solaparse con otras, grises y más claras, también de naturaleza liquénica, e incluso con otras grises oscuras de sulfatación.

En contraposición a las costras negras, las liquénicas de tonos más claros tienen un marcado carácter endolítico, y no poseen capas de polvo o de productos de contaminación; cuando se desprenden lo hacen en gruesas placas compactas, dejando la superficie de la piedra arenizada. Su distribución es más parcheada y menos extensa que la costra liquénica negra y se localiza preferentemente en las superficies más sobresalientes del paramento, aprovechando la rugosidad de los sillares alterados, donde es mayor la retención del agua de escorrentía.

En consecuencia, el grado de alteración en el Paseo Torroja es muy inferior, en conjunto, al que presenta el Paseo de San Antonio, aunque la composición petrológica sea prácticamente la misma. Esto se debe substancialmente a dos razones:

- La diferente orientación de ambos paramentos
- La distinta técnica constructiva y la consecuente estructura arquitectónica.

La primera razón explica el desarrollo de costras liquénicas, dada la orientación norte del paramento y su consiguiente umbría. También explica que las sales marinas sean menos abundantes. Lo que no explica, por si sola, es la diferencia en el grado de deterioro, ya que el litotipo "Llorito" es el principal componente.

La técnica constructiva con zócalo megalítico (que favorece el drenaje), la estructura interna sin argamasa de mortero de cal y con contenido elevado de sales (yeso), y la ausencia de construcciones intramuros, serían la clave de esta diferencia que, como veremos, se ve confirmada por el estudio de otras zonas de la muralla romana como La Baixada del Roser, y por las medidas termohigrométricas efectuadas en el interior del muro de algunos sectores.

5.3.1.3 Paseo de "La Baixada del Roser"

(An-5/9)

Durante una fase de intervención de urgencia sobre este sector del tramo inferior de la muralla, realizado por el "Taller Escola de Restauració de la Muralla" (TERM), en 1993, se realizó un "mapping" de las formas de alteración (An-5/8), previo al trabajo de intervención, que asesoramos desde el punto de vista técnico.

Este estudio se centró en la fábrica de sillares tipo "opus quadratum" con un total de unos 245 sillares. Por la frecuencia observada y por su significado como mecanismos de deterioro, se selecciona dieciséis formas de alteración. De ellas las más abundantes son:

- Costras gris oscura, gris azulada y negra liquénica.
- Depósitos de polvo
- Arenización
- Picado

También afectan a extensas áreas:

- Alveolización y cavernas
- Pátinas anaranjadas

Localmente, en algún sector del muro, además existen restos de morteros adheridos y costras liquénicas. Algunos sillares presentan fisuras y desplazaciones que dan lugar a desprendimientos importantes y que fueron el principal motivo de la intervención.

La descamación es muy escasa y solo se detecta en los sillares más altos, casi siempre asociado a las facies calci-dolosilita y que corresponden a sillares de sustitución producto de reparaciones posteriores.

En las fotos de este sector de muralla (An-5/9) se observa la parte intervenida, de color más claro, y la original más oscura.

Las costras negras de yeso y los depósitos de polvo cubren la mayor parte del paramento, debido a la especial incidencia del tráfico rodado unido a la elevada humedad y baja insolación de esta estrecha calle.

La naturaleza petrológica de la mayoría de los sillares (tipo "Mèdol") y la acción de sales, explica la frecuencia de sillares con picaduras o arenizados. Pero el desarrollo de alvéolos, y sobre todo de cavernas, no solo se deben a esta acción, sino al efecto mecánico del lavado del agua y a las palomas que han instalado sus nidos, sobre todo en la parte alta del muro. Así pues hay algunos sillares con un elevado índice de retroceso superficial, pero no de forma tan generalizada y acusada como en el sector del Paseo de San Antonio.

La humedad del paramento es especialmente elevada en las repisas y en juntas de sillar, con filtraciones internas. Esto permite que se desarrollen costras liquénicas que, a diferencia de otras partes de la muralla, son predominantemente negras pues además es importante la proporción de polvo.

La intervención puso también al descubierto otro tipo de costras grises, de tonos azulados, que se localizan preferentemente en la parte baja de este paño de pared, especialmente sobre los bloques megalíticos y en áreas próximas a juntas de sillar que gotean las aguas de escorrentía. Su

distribución parece tener una clara relación con la percolación y el lixiviado interno de la muralla, y son más compactas e incrustantes que las costras de yeso habituales. Como veremos posteriormente, su naturaleza es mixta, con varias capas de yeso y calcita.

Es más difícil explicar la relativa abundancia de sillares fisurados y con desplazación en grandes lajas paralelas a la superficie externa. Su geometría parece indicar esfuerzos de descarga, de origen estructural. Una posible explicación puede encontrarse en los desplomes que sectores cercanos del paseo Arqueológico sufrieron a principios de siglo XX, y que fueron provocados por el vaciado interno de la muralla. En todo caso, es indudable que se rompe el equilibrio tensional y aparecen fisuras como consecuencia de la rotura total o parcial de la roca de los sillares. En este sentido, existen dos factores que favorecen la fisuración: uno la marcada laminación, de origen sedimentario, que presenta el litotipo "Médol", procedente de la parte norte de la cantera (ver capítulo 3) y otro el debilitamiento de su textura por la alteración y la humedad interna del paramento, que luego comentaremos con más detalle.

Otro aspecto singular, en la "Baixada del Roser", es la presencia de una pátina anaranjada que aparece en amplios sectores del muro. Se trata de un recubrimiento artificial, muy frecuente en edificios históricos de Tarragona, incluso de distintas épocas, por lo que no podemos asegurar ni su edad, ni la técnica empleada. El color parece ser debido a la aplicación de un pigmento con agua de cal o técnicas similares, cuya mineralogía fundamentalmente son óxidos de hierro, lo cual se confirmó por difracción de rayos X.

Finalmente hemos de hacer mención de los restos de morteros de cal adheridos a la superficie de algunos sillares. Estos pueden tener varios orígenes, pero casi con toda seguridad estarían asociados a algún tipo de construcción antigua, adosada a la pared del muro, como señalan las marcas de vigas de madera que hay en algunos bloques.

5.3.2 Anfiteatro romano

Dado que nuestro objetivo no era estudiar el monumento propiamente dicho, sino observar y evaluar los procesos de alteración que sufren determinados litotipos, nuestros estudios se centraron en los tres sectores A, B y C, de características específicas concretas.

- Sector A: Caracterizado por la presencia de sillares tipo "opus quadratum" de los contrafuertes exteriores y de las arcadas del acceso meridional a la "cávea" (En la memoria de la excavación del Taller Experimental de Arqueología (TEDA) se denomina sector "ACA").
- Sector B: Es la parte de la iglesia románica "Nuestra Señora del Miracle", constituida por sillares de los muros internos y de las columnas adosadas de la nave central. (En la memoria de la excavación antes citada, es el lado O y SO del sector "ABA", áreas II y III).
- Sector C: Constituido por los sillares tipo "opus quadratum" de los contrafuertes exteriores de la puerta principal, o "Porta Triumphalis" de acceso a la arena por el lado occidental (Pertenece al sector "AAW" de la memoria de excavación).

Sector A

(An-5/11 y An-5/12)

Su litología es muy heterogénea, a causa de las sucesivas reposiciones que desde tiempos históricos han sufrido estos contrafuertes. Ello es debido a las extremas condiciones climáticas que sufre este sector, pues dada su orientación, cara a mar y a pocos metros de la playa, existe un notable deterioro que requiere la substitución periódica. Hay por tanto una gran diversidad de litotipos y procedencias: Llorito, "Mèdol", "Coves de la Pedrera", "Punta de la Creueta" y "Els Munts".

Como en todos los casos observados en el área monumental de Tarragona, los mayores grados de alteración y retroceso superficial están relacionados con la composición petrológica. Así los sillares constituidos con el litotipo "Llorito", sufren grandes pérdidas de volumen, que en los sillares superiores de los contrafuertes puede ser superior al 50% en volumen.

La alveolización y el picado son las formas más frecuentes y afectan a casi todos los sillares, o sea prácticamente a todos los tipos de litologías presentes, aunque con diferente intensidad.

Las rocas de grano más fino, como los litotipos "Llorito" y "Coves de la Pedrera" y en menor medida "Els Munts", sufren descamación intensa y arenización superficial. Las superficies superiores de estos contrafuertes, o las paredes más resguardadas de las corrientes de aire, presentan depósitos de polvo grisáceo, que en algunas épocas del año toman un aspecto más blanquecino, debido a la presencia de eflorescencias. En algunos puntos este depósito tiene la consistencia de una fina costra de textura pulverulenta que, cuando se desescama, deja una superficie profundamente arenizada con criptoeflorescencias.

La erosión diferencial ha acentuado las vetas calcáreas de algunos sillares (Litotipo "Munts") o la laminación (Litotipo "Mèdol"), lo que indica la activa corrosión que ejerce la acción combinada del agua, el viento y las sales sobre este sector tan expuesto a las corrientes de aire (entre ellas, las brisas marinas).

Además, debido al insuficiente drenaje del terreno, algunas de estas eflorescencias y manchas de humedad señalan el efecto de una intensa ascensión capilar.

Sector B

A diferencia de los otros sectores donde hay mayor presencia del litotipo "Llorito", aquí lo predominante es el litotipo "Mèdol", con algún sillar procedente de la "Punta de la Creueta", especialmente en la base de la basílica visigótica sobre la que fue construida esta iglesia románica.

La alveolización y el picado son las formas más frecuentes. Algunos sillares presentan retroceso superficial en general poco intenso o moderado, excepto el litotipo "Llorito", que lo tiene más intenso, especialmente si se trata del sillar inferior, ya que sufre los efectos de una intensa ascensión capilar y su consecuente ataque salino, produciéndose descamación y arenización.

Lo más significativo de este sector de la nave central de la iglesia son las abundantes eflorescencias blancas o amarillentas, que se observan en juntas de sillar y en el interior de los alvéolos de la roca. Suelen ser más abundantes al principio del verano y en otoño, o después de una época de lluvias. Tienen una textura acicular, botroidal o finamente granular, y raramente forman nódulos. Parecen tener una clara preferencia por el litotipo "Llorito", especialmente si hay descamación.

El origen de estas eflorescencias es algo controvertido. Sin negar la importancia de los aportes atmosféricos o marinos, así como la intensa ascensión capilar en algún sector del paramento, la causa de su abundancia creemos que está relacionada con los morteros de junta utilizados en las reparaciones de las últimas décadas y con un revoque antiguo, cuyos restos aun son visibles en algún sector de la iglesia. Hasta las primeras décadas de este siglo, este hecho tiene mucha importancia, sobre todo si consideramos que gran parte de este revoque parece contener antigua cal hidráulica, cuya alteración podría explicar algunos de los minerales de las eflorescencias, detectados por difracción de rayos X (hidróxidos de sodio y calcio; capítulo 7).

También es muy destacable la presencia de un tipo de costras, muy singulares, sobre los sillares inferiores con litotipo "Llorito", se trata de una fina costra marrón, muy adherida, de superficie rugosa con límites festoneados por eflorescencias blancas y amarillentas. Además, sobre su superficie también hay eflorescencias botroidales blancas, que se han desarrollado sobre una superficie de alteración, consecuencia del intenso retroceso que sufre este tipo de sillares.

Así mismo, se observa la formación de costras periféricas de sillar, con una erosión diferencial muy acusada. Algunas también se desarrollan sobre sillares de biocalcarenita. En los sillares inferiores se detectan costras carbonatadas, similares a las ya descritas en el Paseo de San Antonio, que forman una cierta coraza superficial, y que la erosión diferencial pone de manifiesto.

Los sillares de las filas superiores presentan, como en casi todos los sectores del edificio, un recubrimiento por costras biogénicas grises.

Sector C

(An-5/13, An-5/14, An-5/15 y An-5/16)

Los cuatro contrafuertes de sillares que componen este sector, son petrológicamente más homogéneos que los contrafuertes del sector A, pero también han sufrido numerosas reparaciones y sustituciones; eso sí, reutilizando sillares encontrados durante las excavaciones arqueológicas.

Los sillares inferiores de estos contrafuertes están compuestos por el litotipo "Llorito" y los superiores por biocalcarenitas procedentes de la cantera de "Els Munts" (con elevado contenido de foraminíferos y numerosas vetas calcáreas).

Los sillares del litotipo "Llorito" presentan descamaciones múltiples, con retroceso superficial moderado y abundantes depósitos de arenización. Estas formas de desprendimiento presentan, asociados, numerosos micronódulos salinos de color blanco, dando a la superficie un aspecto granulado, como ya describimos en el Paseo Torroja. También este tipo de nódulos salinos se encuentran por debajo de las escamas y placas, como criptoeflorescencias, arenizando la superficie interna de la roca.

La alveolización es, en cambio, muy generalizada, pero afecta con intensidad desigual, los diferentes litotipos y sillares. En algunos casos estos alvéolos son profundos (más de 4 cm. de hondo).

La erosión diferencial hace que aumente la rugosidad superficial y, unida a una intensa picadura, resalta las vetas calcáreas de los sillares del tipo "Els Munts".

La parte superior de los contrafuertes y las repisas y escalones de la fábrica de sillares están recubiertos por una costra líquénica gris (*Dirina masseliensis* y *Verucaria sp.*) moteada en negro por otras colonias de líquenes (género *Lecania sp.*) y algas. Sobre este biorecubrimiento, hay, en ciertos sectores, depósitos de polvo, de aspecto grisáceo. Los contrafuertes situados en zonas de mayor umbria tienen un recubrimiento más extenso de costras biogénicas y presentan frecuentemente el crecimiento de plantas superiores en sus fisuras y juntas de sillar, con el

consiguiente efecto mecánico que esto supone. El efecto mecánico del agua, así como la percolación, es importante. Se observan zonas blanquecinas, producidas por el efecto del lavado, así como juntas de mortero lixiviadas. Por otra parte también hay ascensión capilar, que es un importante vehículo de sales, aunque la pendiente natural del terreno hace que este efecto sea menos intenso que en el sector A. En cambio el efecto ascendente de la humedad, desde las repisas o escalones de los sillares, es importante y sin duda ha contribuido al aumento de la descamación. En conjunto puede decirse que el grado de deterioro que observamos, aunque importante, es inferior al que observamos en el sector A.

5.3.3 "Arc de Berà"

El material de fábrica de este arco procede, en su mayoría, de la cantera CRB1, aunque con distintas texturas.

Los diferentes grados de alteración observados se deben a factores extrínsecos, ambientales o inducidos por otros materiales de la propia obra, como son los morteros de junta.

Podemos dividir el monumento en 7 sectores o paramentos distintos:

- Fachadas principales: Paramentos NE (lado Barcelona) y SO (lado Tarragona).
- Fachadas laterales (o fachadas menores): Paramento SE (cara mar) y Paramento NO (cara montaña).
- Paramentos interiores del arco: Hastial SE (mira al NO) y hastial NO (mira al SE).
- Bóveda del arco.

Fachada NE (lado Barcelona)

(An-5/17. F-1 y F-2)

Esta fachada presenta un recubrimiento, muy extenso y variado, de costras biogénicas, debido a su orientación norte, que da lugar a umbría y favorece la humedad ambiental.

En la porción del hastial SE, esta cara del edificio, predominan los tonos blanco-grisáceos, pero con numerosas áreas ennegrecidas, así como algunas de tonos verde-amarillentos. En cambio la porción del hastial NO tiene tonos más oscuros, aunque presente un moteado de varios colores (blanco, verde-amarillento y anaranjado).

Estos colores y tonos se deben a la combinación de cuatro componentes:

- Costras negras de contaminación ambiental
- Costras liquénicas (con especies de varios colores)
- Costras blancas de oxalatos
- Pátinas cromáticas anaranjadas

Las costras biogénicas están constituidas por una comunidad de líquenes (integrada por las siguientes especies):

- Dirina masseliensis* (color blanco grisáceo)
- Lecania sp.* (color muy oscuro. casi negro)
- Caloplaca sp.* (color amarillo)
- Xantoria parietina* (color amarillo)

También, de forma ocasional y muy localizada, se detecta la presencia de comunidades de algas clorofíceas.

Estas costras biogénicas suelen llevar asociado un sustrato de oxalatos (según indican los difractogramas de rayos X; ver capítulos 7 y 8), penetrante y encostrado en la roca, que se hace más patente cuando mueren los líquenes, pues éstos dan una lámina reseca y acartonada que destaca sobre la superficie blanquecina y pulverulenta del sustrato.

También se observan que algunas áreas tienen tonos anaranjados, que corresponden a una pátina cromática de distribución irregular. Esta pátina se reconoce en el hastial NO, en las proximidades de esta fachada, y sobre todo en los bloques megalíticos del zócalo y sillares próximos de la parte inferior del arco. El estudio de todos estos recubrimientos está detallado en el apartado 8. 3.

La picadura y la rugosidad superficial son las formas de alteración no orgánicas más frecuentes en este muro. La alveolización está poco desarrollada, salvo en el zócalo y en los sillares más bajos, dónde también se localizan algunas eflorescencias blancas de sulfatos, cloruros y carbonatos, pero en conjunto el retroceso superficial es escaso. Las costras negras de contaminación se solapan y confunden con las líquénicas del mismo color; a esto hay que añadir los depósitos de partículas de polvo, que son bastante extensos. Finalmente hay que hacer notar la fisuración de sillares, que se observa en el hastial SE; esto puede explicarse fácilmente por los daños sufridos por esta parte del arco durante el año 1936, durante la guerra civil española, que obligaron, incluso, a su apuntalamiento.

Fachada SO (lado Tarragona)

(An-5/18. F-1 y F-2)

En total contraste con la fachada opuesta el recubrimiento líquénico es muy escaso; en cambio el grado de alteración es mucho mayor, debido especialmente a la intensa alveolización y disgregación que sufren los sillares, principalmente en la mitad inferior así como en las molduras de los capiteles superiores.

Se observa, así mismo, que el hastial SE es el más degradado por los efectos de la alveolización y el retroceso superficial, pero su mayor intensidad se localiza bajo la cornisa inferior y en algunas áreas a media altura. Esta alveolización va acompañada de disgregación granular, eflorescencias blancas y de depósitos de arenización. La mayor parte de los sillares presenta rugosidad superficial y picaduras, así como depósitos de polvo negro procedentes de la contaminación. También algún sillar presenta desconchaduras y desprendimientos de pequeños fragmentos.

El trozo de Hastial NO, de esta fachada sur, sufre parecidos procesos, que también se identifican en los sillares inferiores, pero hay que resaltar que aquí es más patente la acción mecánica del agua de escorrentía, que ha producido el ensanchamiento desmesurado de algunos alvéolos, por lo que presentan un aspecto cavernoso. Esto se debe probablemente, al mal diseño de la cornisa durante la restauración del siglo XIX que favorece el goteo. Además existen filtraciones a través del interior del muro, causadas por el agua pluvial que se infiltra desde la parte superior del arco a través de las deterioradas juntas de los sillares.

Lo más destacable de estos sillares alveolizados, o de algunas juntas de mortero, es la presencia de abundantes eflorescencias blanquecinas, muy higroscópicas, de aspecto granular y a veces en nódulos dentro del mortero, que tienen un marcado desarrollo cíclico estacional, presentando el máximo al final de la primavera (mayo - junio), probablemente debido a la intensa evaporación preveraniega, del agua infiltrada y acumulada a lo largo de las estaciones húmedas. La peculiar mineralogía será objeto de estudio en los capítulos 7 y 8.

La pátina cromática anaranjada, con diversos tonos y grados de conservación es muy importante en esta fachada. Presenta una distribución irregular o parcheada, de aspecto similar a la de la cara opuesta pero con diversos tonos y texturas que indican la posibilidad de la existencia de varias capas de recubrimiento pictórico.

Fachadas menores SE y NO

(An-5/19. F-1 y F-2, An/520. F-1 y F-2)

Los paramentos laterales, o fachadas menores, pueden asimilarse, por la semejanza de sus formas de alteración, a cada una de las fachadas principales. Así, el paramento NO, presenta un abundante recubrimiento de costras biogénicas, pero con predominio de la costra líquénica blanco-grisácea (*Dirina massiliensis*) y pátinas blanquecinas de oxalatos. En su parte inferior se observan costras negras y depósitos de polvo negruzco producto de la contaminación. Además suelen llevar asociados incipiente alveolización y retroceso superficial.

El paramento SE tiene un elevado índice de deterioro, con formas de alteración similares a las de la fachada sur. La alveolización es muy intensa y, como en casi todos los casos, es más frecuente en la mitad inferior del paramento, Esto va unido, generalmente, a un importante retroceso superficial. Pero lo más significativo de este sector son la abundancia de las eflorescencias y los depósitos de arenización, que se localizan preferentemente en el interior de los alvéolos y en las juntas de mortero. También son abundantes los depósitos de polvo negruzco y las costras negras tiene una distribución muy limitada e irregular. Todas estas formas indican claramente que esta zona del edificio es la que sufre con más intensidad los efectos del tráfico rodado, la contaminación en general y cierto microclima húmedo que produce la sombra de las plantas, así como la acumulación de sales por filtraciones y lixiviado de las partes altas del monumento, a cuyo contenido se suma la presencia de las sales de los morteros.

Los paramentos internos del edificio (hastiales) en general están menos alteradas que los exteriores, especialmente el hastial SE (que mira a la montaña), que fue en gran parte reconstruido, en 1936, por la Generalitat de Catalunya. En cambio el hastial NO (que mira a mar), está más deteriorado, con alveolización y retroceso superficial por arenización, que son muy intensos en los sillares inferiores, y presenta eflorescencias y depósitos de polvo negruzco. Las pátinas y costras

negras son frecuentes y llegan hasta sillares de la zona alta del muro. Presenta, por tanto, una gran similitud con el paramento SE, ya que ambas tienen la misma orientación.

El hastial SE solo presenta alguna alveolización incipiente en su zona inferior, y sobre todo una gran diversidad de morteros de junta, algunos con eflorescencias, pero no tan desarrolladas como en los otros casos descritos.

En la bóveda se observa un bandeado de zonas blancas y oscuras, producto de la escorrentía de las aguas pluviales y su evaporación fraccionada, y algunos depósitos de polvo y costras líquénicas oscuras.

5.4 MEDIDAS TERMOHIGROMÉTRICAS INTERNAS DE ALGUNOS SECTORES DE LA MURALLA ROMANA

Para determinar la importancia de la humedad interna de la muralla, como factor extrínseco de alteración, que pudiera explicar la aceleración del proceso en determinadas áreas de la misma, se realizaron una serie de medidas de tipo termohigrométrico en el interior del muro, tanto en los sillares de piedra como sobre la argamasa de relleno (tabla 5.IV).

La técnica utilizada es un método electroquímico, basado en la medida de constantes dialécticas, que tiene su origen en el humidímetro diseñado por "Centre d'Etudes des Bâtiments et des Travaux Publics (CEBTP)" (Martín Pérez 1990), pero que la casa suiza NOVASIMA ha mejorado notablemente con el diseño de una nueva sonda de carácter electroquímico sin los inconvenientes de las primeras con sales de litio. Su principio físico de medida se basa en las variaciones que la humedad ambiental produce sobre la resistencia de un electrolito higroscópico, muy específico y preciso, de composición patentada, que permite medidas exentas de histéresis, lo que da una precisión de $\pm 1\%$ de humedad relativa. La temperatura se mide por una resistencia tipo NTC, integrada en la célula de medida, con un margen de error (según el fabricante) de ± 0.2 °C. Por otra parte el aparato automatiza el tratamiento de datos mediante la incorporación de un microprocesador. En concreto, se ha utilizado el aparato NOVASIMA MS1 (MIK 3000), con sonda lápiz para muros. Este tipo de instrumento calcula siete parámetros climáticos o ambientales diferentes según la norma DIN 50010.

El rango de humedades mesurables está limitado por la naturaleza de la célula de tipo electrolítico. El límite inferior es el 6% de humedad, ya que por debajo de esta temperatura el electrolito cristaliza, y el límite superior es el 98 % de humedad, ya que por encima de este valor se pueden producir condensaciones.

La sonda era introducida en una cavidad de 10-12 mm. de radio y de profundidad variable entre 15-22 cm., según el grosor conservado de sillar. Después de su sellado se esperaba la estabilización de la medida durante algún minuto, y se tomaban las lecturas medias que automáticamente calculaba el "software" del aparato, en forma escalonada cada 10, 20 y 40 segundos. Se midieron también la temperatura y humedad relativa ambiental, como valor de referencia externo al muro.

Se seleccionó como área principal de estudio la zona del Paseo de San Antonio, próxima al Portal del mismo nombre, por su estado de degradación, su petrología dominante (Calcisiltita del Llorito) y la técnica constructiva con relleno de argamasa. También se realizaron mediciones en "La Baixada del Roser", con el objetivo de comprobar la validez de la técnica y las variaciones de

humedad que se podían presentar, dado que este paramento era totalmente diferente, tanto en su litología (Calcarenitas tipo "Mèdol") como en estructura arquitectónica (sin relleno interno y con zócalo megalítico, que favorece el drenaje).

Las medidas se tomaron a lo largo de tres columnas verticales (a 2.7 y 9 m. respectivamente del portal) en el Paseo de San Antonio y de una columna en "La Baixada del Roser", desde la base hasta la máxima altura. Los puntos sondeados dentro de cada columna no son equidistantes entre sí, pues el estado ya comentado de algunos sillares, con gran pérdida de volumen, lo hacía inviable.

De los resultados expuestos en la tabla 5.IV, se deduce lo siguiente:

La humedad interna (H) de la piedra de los sillares de la muralla romana en la zona del Paseo de San Antonio, es muy elevada y mucho más que la superficial del sillar y la ambiental o externa. En promedio, está por encima de los valores de otras zonas de la muralla, como "La Baixada del Roser".

Valor medio "Paseo San Antonio": H = 81, 2 %
Valor medio "La Baixada del Roser": H = 66, 08 %

El mortero de cal de relleno interno de la muralla, si corresponde a puntos próximos, tiene unos valores de t y H similares a los de la piedra, como por ejemplo, en la columna 2 a 7 m. del portal, y a una distancia de unos 4 m. en vertical, tenemos los siguientes valores:

posición 912	(argamasa)	t = 29, 2	H = 83%
posición 810	(sillar)	t = 29, 3	H = 82, 5%

Esta humedad interna del muro es independiente de la humedad y temperatura externas o ambientales y apenas se ve afectada por las oscilaciones del ciclo diurno. Por ejemplo, entre los puntos 2 y 3 de la segunda columna a escasos metros del suelo y la ambiental tomada al pie de dicha columna a unos 7 m. del portal.

- Humedad ambiental: entre 50.5% y 59.1%
- Humedad interna de sillar: entre 86% y 88%
- Mínima diferencia interna-ambiental: + 28.9%
- Máxima diferencia interna-ambiental: + 35.5%

Sólo las temperaturas internas de la piedra parecen poder correlacionarse, parcialmente, con estas oscilaciones exteriores; por ejemplo:

- t interna oscila en la tercera columna (a 9 m. del portal), en un día, entre 28.1 y 32.4 °C.
- t ambiental oscila en el entorno de esa área del muro, en un día, entre 27.8 y 31.6 °C.

La distribución de los valores obtenidos en el Paseo de San Antonio indica la presencia de tres áreas:

- una zona cercana al suelo que presenta un alto grado de humedad (alcanza hasta la 5 fila de sillares, unos 2 m. de altura).
- una zona media donde desciende bruscamente la humedad (entre las filas 9 y 18, esto es la zona comprendida entre 4.5 y 9 m. de altura).
- una zona alta cercana a las terrazas del cinturón de ronda superior donde se alcanza los máximos valores de humedad (entre la fila 18 y el cinturón de ronda, esto es la zona comprendida entre los 9 m. y unos 12 m. de altura del final del muro).

Esta distribución es algo diferente en el caso de "La Baixada del Roser". Ciertamente que se produce un incremento notable de humedad en la zona más alta del muro, de forma similar al Paseo de San Antonio; pero la parte baja del mismo, que descansa sobre el zócalo megalítico, presenta unos valores de humedad bastante similares en el conjunto del muro, pero mucho más bajos que en el otro sector, y sobre todo se diferencia de aquel en que no hay un descenso brusco en la zona media.

La existencia de habitaciones, como espacios huecos dentro del interior de la muralla, en el sector del paseo de San Antonio, explicaría esta diferencia de porcentaje de humedad, que existe entre los dos sectores, en los sillares situados a media altura.

Todas estas observaciones nos llevan a la conclusión de que la humedad de la muralla, en la zona de Paseo de San Antonio, está fundamentalmente relacionada con un flujo procedente del interior del muro, ya que la ascensión capilar tiene un efecto importante, pero limitado hasta una determinada altura. Por supuesto, esto no explica por sí solo los elevados valores detectados. Existe, posiblemente, un factor petrológico añadido, debido al dominio del litotipo "Llorito" en este sector, cuyas características favorecen la absorción y retención de agua, como luego veremos en los ensayos para caracterizar su comportamiento hídrico. Pero hemos de señalar que el mortero de cal también tiene un elevado nivel de humedad, por lo que tampoco la naturaleza de los sillares explica por sí sola el grado de humedad. Así, pues, todo parece indicar que esta humedad tiene un origen interno.

Por otra parte es difícil determinar el origen y las causas de este flujo, que probablemente sea múltiple y de efecto acumulativo. La distribución de valores observada indica que una de las fuentes principales son las filtraciones de agua procedentes de las aguas pluviales, que recogen las terrazas superiores del paseo de ronda y sus desagües, sin descartar otras fuentes adicionales, como pueden ser las posibles pérdidas de las cañerías de las casas del interior de la muralla. Por si fuera poco existen dos factores de carácter topográfico y arquitectónico que pueden haber favorecido la acumulación interna de humedad. El primero es la inclinación hacia la zona del Portal, que tiene la base de la muralla, como consecuencia de adaptarse a la pendiente topográfica, pero su efecto real es, cuanto menos, dudoso. El segundo es más importante, ya que es evidente, después de una observación detenida del paramento, que el deterioro de las juntas de sillar ha facilitado la penetración del agua hacia el interior. Además, la inclinación del perfil superior de la muralla lo favorece.

La compleja y anómala circulación de agua, que como consecuencia de todos estos factores presenta el muro, influye de manera decisiva en el proceso de secado. Aunque como consecuencia de la orientación y proximidad al mar, el aporte de humedad atmosférica es considerable, está no es la fuente principal. A este respecto, pueden existir dos maneras principales de secado en el sillar, ambas radiales: una centrífuga y otra centrípeta. Creemos que, en nuestro caso, se trata de la primera.

El proceso de evaporación, forzado por el flujo interno, es radial centrífugo, avanzando el secado del centro a la periferia. Esto produce un lixiviado interno de la piedra y un transporte de disoluciones salinas hacia la periferia del sillar, lo que tiene consecuencias alterológicas muy importantes, sobre los procesos de disolución selectiva de las fábricas dolomíticas, y el transporte de iones de magnesio hacia la periferia del sillar (ver capítulo 9). Esta forma de secado fue comprobada por la distribución de las humedades superficiales medidas en algunos sillares, ya que tienen valores más elevados de humedad en la periferia que en el centro del sillar.

El flujo de evaporación durante el secado de la piedra es, por tanto, bastante asimilable al proceso de percolación radial, estudiado experimentalmente por Baudracco (1979) en rocas graníticas fisuradas, pero de sentido opuesto.

DISTRIBUCIÓN DE LAS FORMAS DE ALTERACIÓN		
MURALLA ROMANA DE TARRAGONA	SECTOR PASEO SAN ANTONIO	COSTRA-GRIS OSCURO COSTRA GRIS CON ÁREAS ENNEGRECIDAS COSTRA GRIS PULVERULENTA COSTRA PERIFÉRICA DE SILLAR COSTRAS CARBONATADAS SUPERFICIALES RETROCESO SUPERFICIAL MUY INTENSO ARENIZACIÓN DESCAMACIÓN NÓDULOS SALINOS EFLORESCENCIAS MULLIDAS LIXIVIADO Y ACCIÓN MECÁNICA DEL AGUA
	PASEO TORROJA	ZONA A DESCAMACIÓN DESCOSTRACIÓN PICADO Y MICROALVÉOLOS NÓDULOS SALINOS RETROCESO SUPERFICIAL MODERADO DEPÓSITOS DE POLVO COSTRAS GRISES PULVURULENTAS COSTRAS
		ZONA B COSTRAS GRISES OSCURAS DEPÓSITOS DE POLVO ALVEOLIZACIÓN - JUNTAS DE SILLAR MACROALVÉOLOS Y CAVERNAS - NIDOS PALOMAS DESPLACACIÓN COSTRAS LIQUÉNICAS GRISES COSTRAS BIOGÉNICAS NEGRAS

DISTRIBUCIÓN DE LAS FORMAS DE ALTERACIÓN

		ZONA C	DESPLACACIÓN INTENSA RETROCESO SUPERFICIAL DESCAMACIÓN DESCOSTRACIÓN DEPÓSITOS DE POLVO ACANALADURAS ALVEOLIZACIÓN - JUNTAS SILLAR COSTRAS LIQUÉNICAS GRISES COSTRAS BIOGÉNICAS NEGRAS COSTRAS GRISES DE YESO
	"BAIXADA DEL ROSER"		COSTRAS GRISES OSCURAS COSTRAS GRISES AZULADAS COSTRA BIOGÉNICA NEGRA DEPÓSITOS DE POLVO ARENIZACIÓN ALVEOLIZACIÓN CAVERNAS DESPLACACIONES FISURACIÓN PATINAS ANARANJADAS
ANFITEATRO ROMANO	SECTOR A: ACCESO MERIDIONAL		RETROCESO SUPERFICIAL INTENSO ALVEOLIZACIÓN DESCAMACIÓN ARENIZACIÓN PICADO DEPÓSITOS DE POLVO COSTRAS GRISES PULVURULENTAS EFLORESCENCIAS ABUNDANTES EROSIÓN DIFERENCIAL (CIERTOS LITOTIPOS)
	SECTOR B: IGLESIA ROMÁNICA DEL MIRACLE	DEL	ALVEOLIZACIÓN DESCAMACIÓN ARENIZACIÓN INTENSA PICADO DEPÓSITOS DE POLVO COSTRAS GRISES PULVURULENTAS RETROCESO SUPERFICIAL POCO INTENSO EFLORESCENCIAS BLANCAS Y AMARILLAS COSTRAS MARRONES CON EFLORESCENCIAS COSTRAS PERIFÉRICAS DE SILLAR EROSIÓN DIFERENCIAL COSTRAS BIOGÉNICAS GRISES COSTRAS CARBONATADAS SUPERFICIALES
	SECTOR C: ACCESO OCCIDENTAL		DESCAMACIONES DESCOSTRACIONES NÓDULOS SALINOS MICROALVÉOLOS ARENIZACIÓN ALVEOLIZACIÓN EROSIÓN DIFERENCIAL COSTRAS LIQUÉNICAS GRISES DEPÓSITOS DE POLVO ÁREAS DE LAVADO RETROCESO SUPERFICIAL

DISTRIBUCIÓN DE LAS FORMAS DE ALTERACIÓN

"ARC BERÀ"	DE	FACHADA NE	<p>COSTRAS NEGRAS CON YESO COSTRAS BIOGÉNICAS (LÍQUENES Y ALGAS) COSTRAS BLANCAS DE OXALATOS PÁTINAS CROMÁTICAS ANARANJADAS PICADURAS ALVEOLIZACIÓN POCO INTENSA DEPÓSITOS DE POLVO FISURACIÓN (HASTIAL E)</p>
		FACHADA SW	<p>ALVEOLIZACIÓN INTENSA DISGREGACIÓN Y ARENIZACIÓN CAVERNAS PERCOLACIÓN Y ACCIÓN MECÁNICA DEL AGUA PICADURA GENERALIZADA RETROCESO SUPERFICIAL EROSIÓN DIFERENCIAL DEPÓSITOS DE POLVO NEGRUZCO COSTRAS NEGRAS CON YESO DESCONCHADURAS EFLORESCENCIAS NÓDULOS SALINOS (preferentemente en morteros) PÁTINAS CROMÁTICAS</p>
		FACHADA NW	<p>COSTRAS BIOGÉNICAS (LÍQUENES Y ALGAS) COSTRAS BLANCAS DE OXALATOS PÁTINAS CROMÁTICAS ANARANJADAS PICADURAS COSTRAS NEGRAS CON YESO DISGREGACIÓN Y ARENIZACIÓN ALVEOLIZACIÓN</p>
		FACHADA SE	<p>PERCOLACIÓN Y ACCIÓN MECÁNICA DEL AGUA PICADURA GENERALIZADA RETROCESO SUPERFICIAL EROSIÓN DIFERENCIAL DEPÓSITOS DE POLVO NEGRUZCO COSTRAS NEGRAS CON YESO DESCONCHADURAS EFLORESCENCIAS NÓDULOS SALINOS (preferentemente en morteros) ALVEOLIZACIÓN INTENSA DISGREGACIÓN Y ARENIZACIÓN</p>
		FACHADA INTERIOR QUE MIRA AL SE (HASTIAL OESTE)	<p>EFLORESCENCIAS NÓDULOS SALINOS (preferentemente en morteros) ALVEOLIZACIÓN INTENSA DISGREGACIÓN Y ARENIZACIÓN PICADURA GENERALIZADA RETROCESO SUPERFICIAL</p>
		FACHADA INTERIOR QUE MIRA AL NW (HASTIAL ESTE)	<p>ALVEOLIZACIÓN FISURAS EFLORESCENCIAS ARENIZACIÓN</p>

TABLA 5.II: Distribución de las formas de alteración

FORMAS RELACIONADAS CON EL TIPO DE SUSTRATO ROCOSO	
Litotipo "Médol"	Alveolización Picadura Arenización Erosión diferencial /porosidad móldica
Litotipo "Llorito"	Descamación Desplacación Alveolización Arenización Pústulas o nódulos salinos Erosión diferencial (moldes de fósiles) Costras periféricas de sillar Eflorescencias magnésicas

FORMAS RELACIONADAS CON FACTORES EXTRÍNSECOS O DEL ENTORNO
Costras gris oscuras (con yeso) Costras grises pulverulentas Costras líquénicas grises Costras líquénicas negras Costras blancas de oxalatos Eflorescencias (en general, sales solubles)

Nota:

- Siempre se ha de tener en cuenta, no obstante, que aunque estén generadas inicialmente por un agente o factor externo, la predisposición e interacción con el sustrato es la que en definitiva produce la aparición de una forma de alteración determinada, así por ejemplo la sulfatación, no se desarrolla con la misma intensidad en todos los litotipos y sus efectos son diferentes, ya que en un tipo de roca produce la formación una costra de yeso y en otras rocas puede favorecer la dedolomitización. Por otra parte las formas de alteración tienen una distribución y una intensidad diferente según el monumento, esto es según sea la ubicación o la orientación del paramento, incluso la técnica constructiva puede influir en la distribución o en la intensidad con que se desarrolle una forma de alteración.

TABLA 5.III: Formas relacionadas con el tipo de sustrato rocoso y con factores extrínsecos o del entorno

LOCALIZACIÓN		MATERIAL	PROF. (cm)	t (°C)			H (%)			
				A	B	C	A	B	C	
PASEO DE SAN ANTONIO	PRIMERA COLUMNA (2m del Portal)	1. (104)	S	20		34.5			83.4	
		2. (301)	S	18		36.5			83.4	
		3. (303)	AR	6		34.2			80.4	
		4. (502)	S	20		33.6			79.2	
		5. (702)	S	11		34.5			73.5	
		6. (903)	S	16		32.5			79.2	
		7. (1104)	S	12		31.7			79.1	
		8. (1304)	S	15		33.1			81.8	
		9. (1606)	S	17		33.2			84.5	
		10. (1811)	S	20		33.1			85	
		11. (20-Z)	S	15		30.6			89.3	
	SEGUNDA COLUMNA (7m del Portal)	1. (110)	S	20	18.1	27		87	86.6	
		2. (311)	S	17	19.5	27.6		86.6	88.4	
		3. (511)	S	12	17.9	29.6		88.2	85	
		4. (810)	S	16	18.8	29.3		85.6	82.5	
		5. (912)	AR	22	19	29.2		87.9	83	
		6. (11-A)	AR	22	19.8	29		88.4	83	
		7. (13. -C)	S	15	21.1	30.7		85.1	85.9	
		8. (16-F)	S	12	20.8	31.1		85.7	85.1	
		9. (18-F)	S	22	20.2			89		
		10. (20-J)	S	18	18.7			90.7		
	TERCERA COLUMNA (9m del Portal)	1. (111)	S	16	19.2	28		82.9	79.9	
		2. (312)	S	19	19.4	27.9		85.5	88.7	
		3. (513)	S	20	18.9	29.6		88.5	83.7	
		4. (813)	S	20	19.2	29.7		89.5	84.2	
		5. (11-B)	S	14	20	32.4		84	72.4	
		6. (13-D)	AR	23	21.9	29		73	73.8	
		7. (15. -E)	S	20	22.5	31.9		55.5	56.1	
		8. (17-G)	S	22	18			68.7		
		9. (19-I)	S	22	17,9			89.6		
		10. (21-K)	S	22	19.2			91.1		
	"BAIXADA DEL ROSER"	PRIMERA COLUMNA	1. (142)	S	16			28.1		61.5
			2. (198)	S	16			28.2		59.8
3. (256)			S	14			28.2		60.1	
4. (292)			S	20			28.3		63.4	
5. (352)			AR	20			28.3		67.5	
6. (903)			AR	18			28.5		84.2	

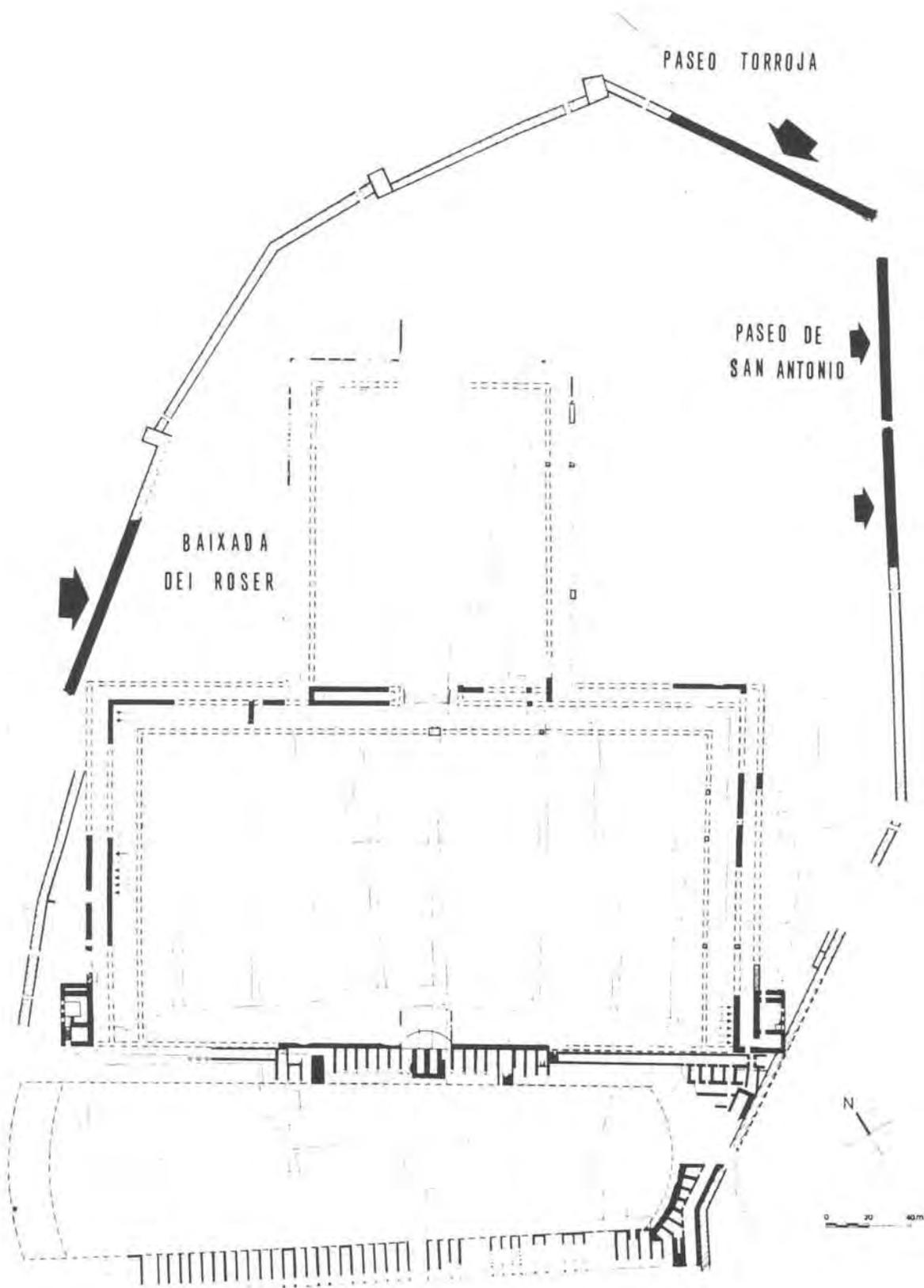
CONDICIONES AMBIENTALES:

- A (10/6/92): T: 22, 5 H%: 71
- B (22/7/92): T: 30, 2 H%: 50, 5
- C (23/7/92): T: 27, 8 H%: 63, 7

Nota:

- Localización: se indica el número de sondeo, empezando por la base del muro y el número de sillar correspondiente, dentro de cada hilera de bloques.
- Material: se indica la naturaleza del material, sillar (S) o argamasa de relleno interno del muro (AR).
- Profundidad: señala la máxima profundidad del sondeo en centímetros, donde se ha practicado las medidas termohigrométricas.
- A, B y C: sobre un mismo sondeo se han realizado medidas en diferentes días, con condiciones ambientales diferentes, lo que se refleja en dos valores distintos (A y B) sobre un mismo punto del muro. Obsérvese que aunque hay lógicas diferencias entre ambas medidas, se mantienen dentro de un parecido orden de magnitud.

TABLA 5.IV: Resultados de los sondeos termohigrométricos

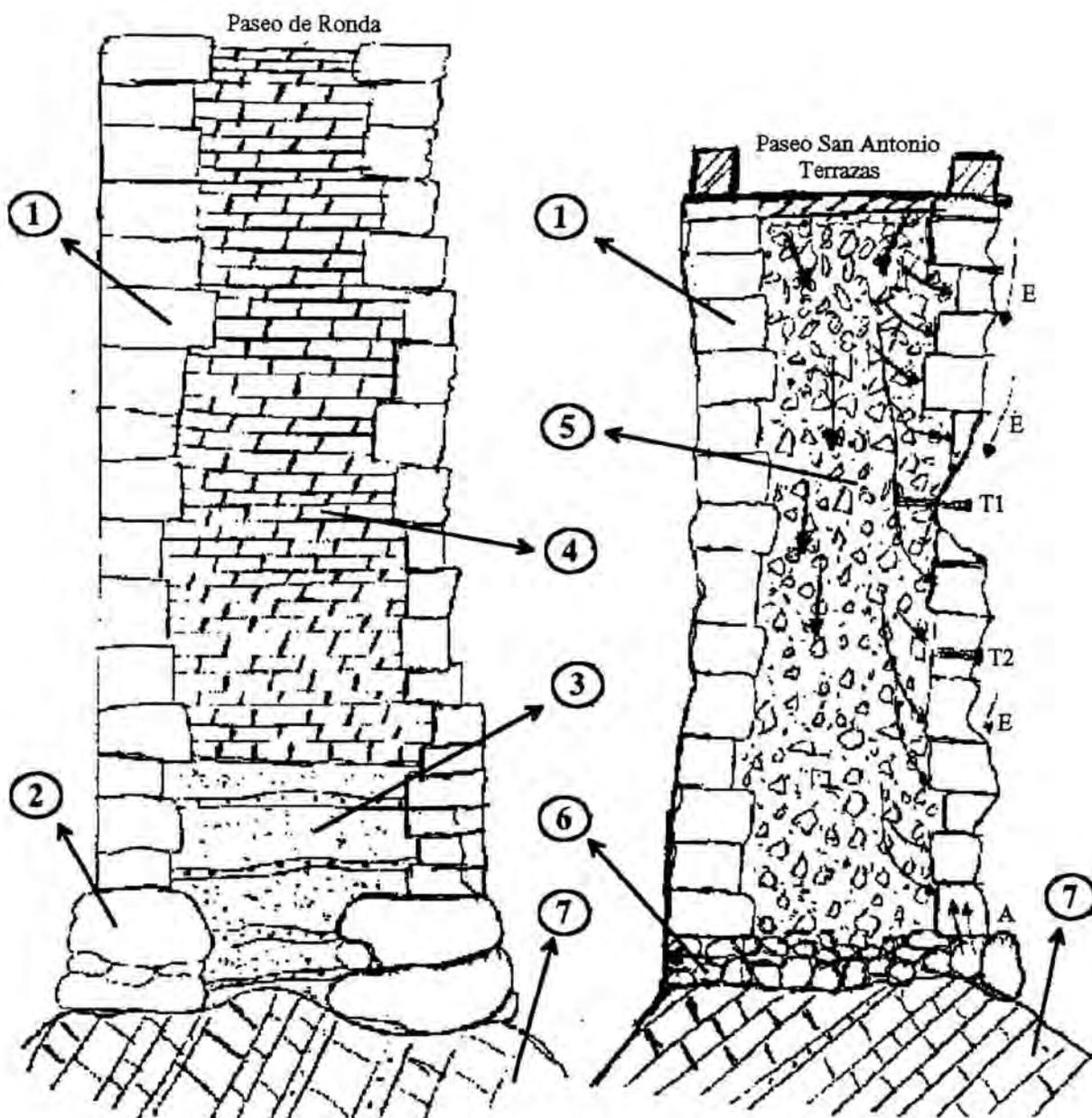


Esquema, en planta, del perímetro de la muralla de Tarragona (según TEDA, 1990), donde se señalan los sectores estudiados

SECCIÓN MURALLA

Técnica constructiva: Romana

Técnica constructiva: Siglo XVIII

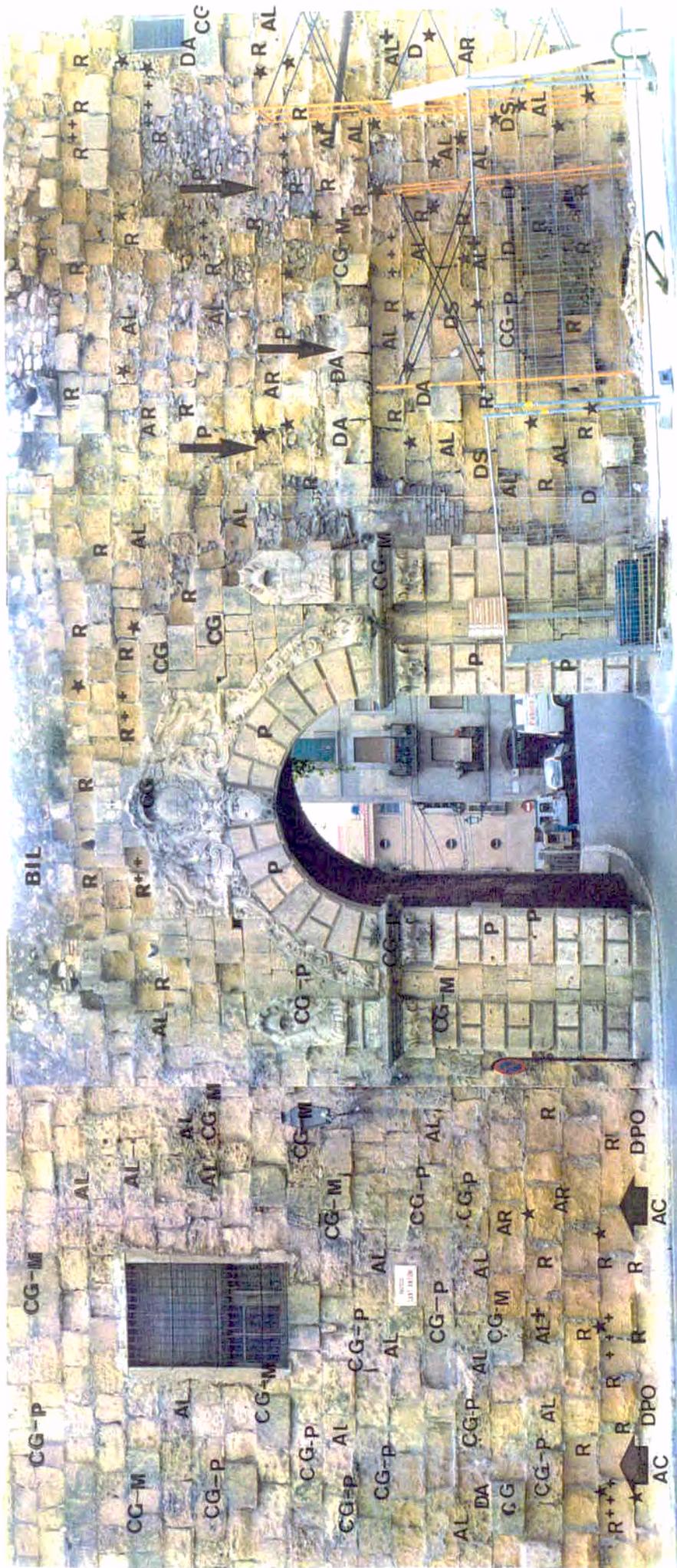


- ① Sillar tipo "Opus quadratum"
- ② Zócalo megalítico "Opus siliceum"
- ③ Base interna de relleno con arena y piedras sin cal
- ④ Relleno de adobe romano "Later crudus"
- ⑤ Argamasa de mortero de cal
- ⑥ Zócalo
- ⑦ Base geológica

-  Percolación interna
-  Ascensión capilar
-  Escorrentía superficial

Medidas termohigrométricas internas:

-  T
- T1 => argamasa
- T2 => sillar



Muralla de Tarragona, Sector Portal de Sant Antoni

- P: Picado
- CG: Costra gri
- CG-P: Costra gris pulverulenta
- CG-M: Costra gris con áreas ennegrecidas
- R: Retroceso superficial
- R⁺: Retroceso medio (E < 20 mm)
- R⁺⁺: Retroceso máximo (E > 20 mm)
- P↓: Percolación superficial
- AL(*): Alveolización, ("+" significa superior al 50%)
- AR: Arenización
- DA: Depósitos Arenización
- DS: Descamación
- DPO: Depósitos de polvo y detritus
- AC: Ascensión capilar
- *= CPS: Esqueletos periféricos de sillar
- BIL: Crecimiento algal



Muralla de Tarragona. Sector izquierdo del Portal de Sant Antoni

- | | | | |
|-------------------|------------------------------------|---------|----------------------------------|
| CG-P: | Costra gris pulverulenta | AR: | Arenización |
| CG-M: | Costra gris con áreas ennegrecidas | DA: | Depósitos Arenización |
| R: | Retroceso superficial | AC: | Ascensión capilar |
| P↓: | Percolación superficial | *= CPS: | Esqueletos periféricos de sillar |
| AL: | Alveolización | BIL: | Crecimiento algal |
| AL ⁺ : | Alveolización superior al 50% | D: | Descostración |



Muralla de Tarragona. Primer paramento del Paseo Torroja

CG:	Costra gris	ALM:	Microalveolización
CG-P:	Costra gris pulverulenta	DS:	Descamación
R:	Retroceso superficial	DM:	Descostración múltiple
P↓:	Percolación superficial	EN:	Eflorescencias nodulosas
AL:	Alveolización	F:	Fisuras



Muralla de Tarragona. Segundo paramento del Paseo Torroja

CG-P: Costra gris pulverulenta	ALMA: Macroalveolo	D: Descostración	DP: Desplacación
PT: Percolación	AR: Arenización	DM: Descostración múltiple	CBN: Costra liquénica negra
AL: Alveolización	AL: Alveolización	DN: Desconchadura	CBG: Costra liquénica gris

Muralla de Tarragona. Zona "C" del tercer paramento del Paseo Torroja

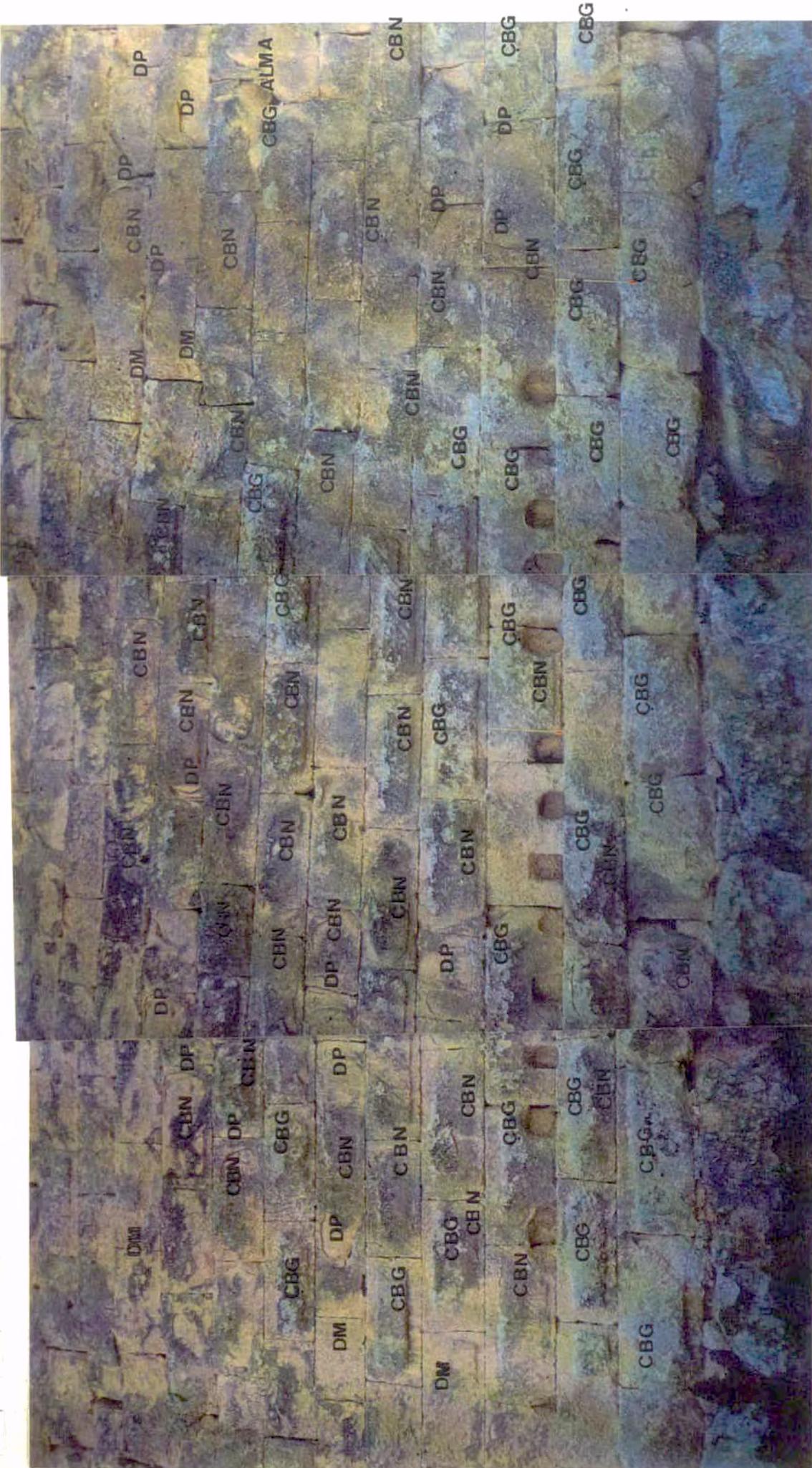
ALMA: Macroalveolo

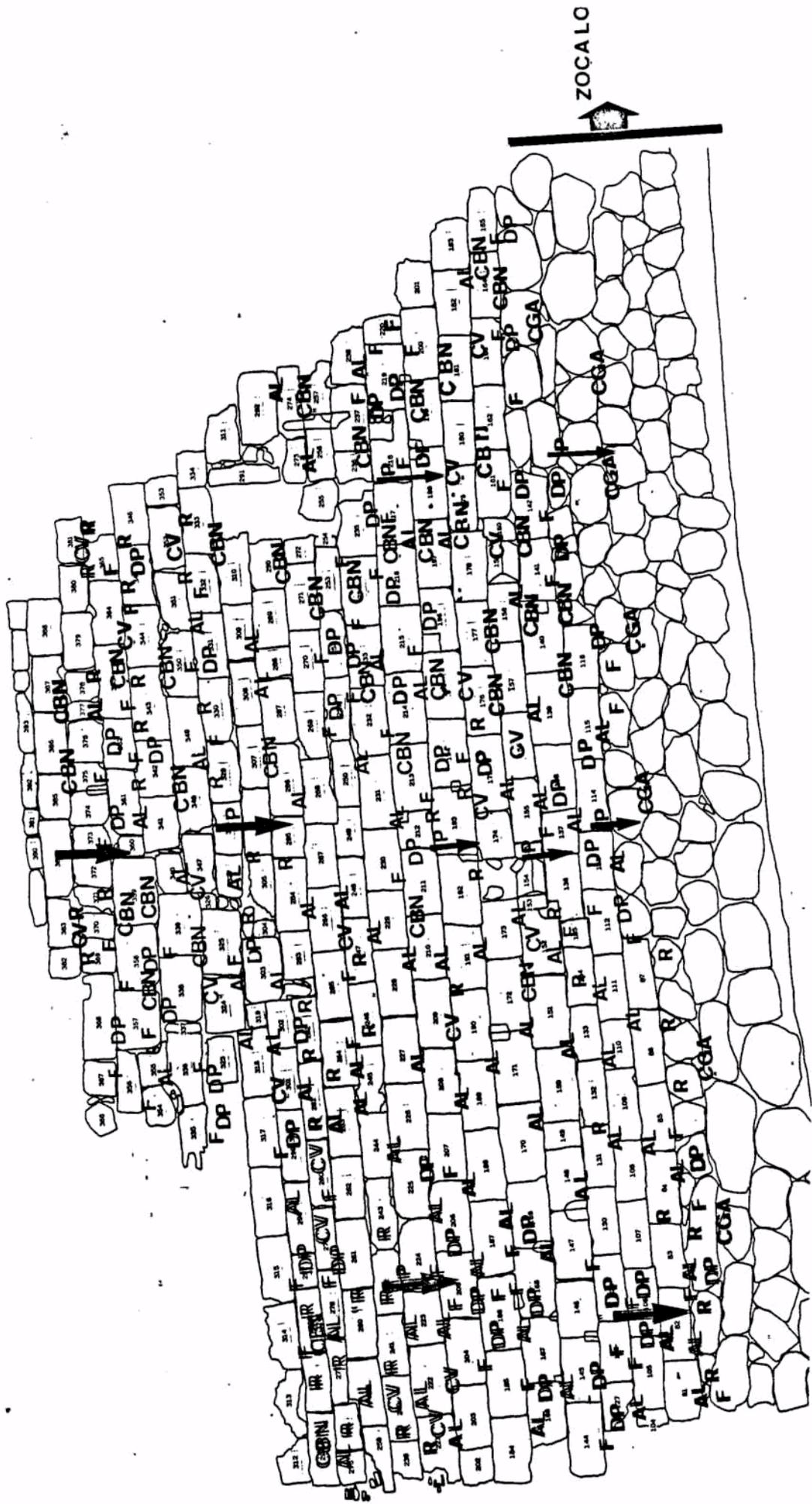
DP: Desplacación

CBG: Costra liguénica gris

DM: Descostración múltiple

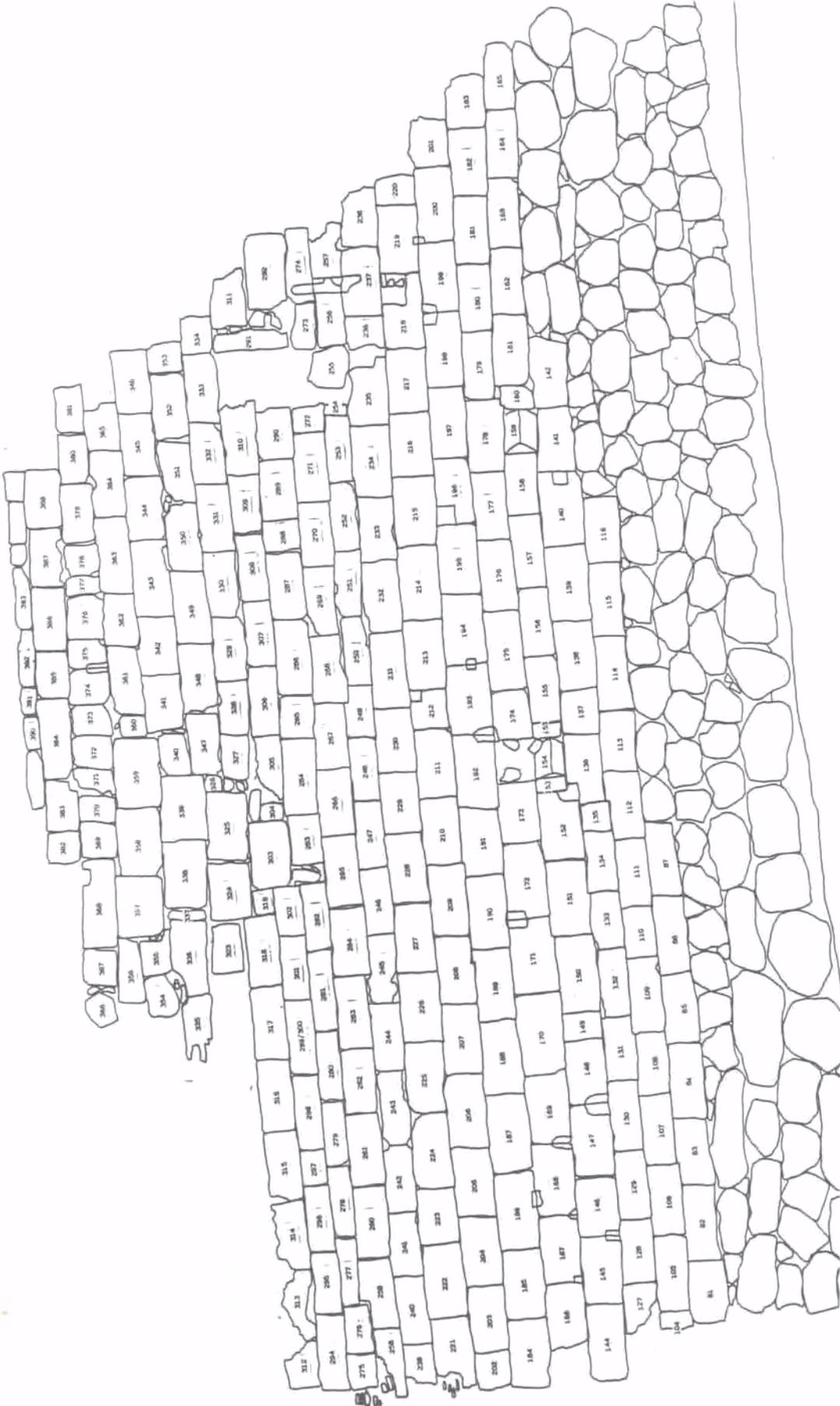
CBN: Costra liguénica negra





Muralla de Tarragona. Baixada del Roser. Resumen del mapping elaborado en colaboración con el TERM (1993)

- CGA: Costra gris azulada
- R: Retroceso superficial
- DP: Desplacación
- CBN: Costra líquénica negra
- F: Fisuras
- AL: Alveolización
- CV: Cavernas



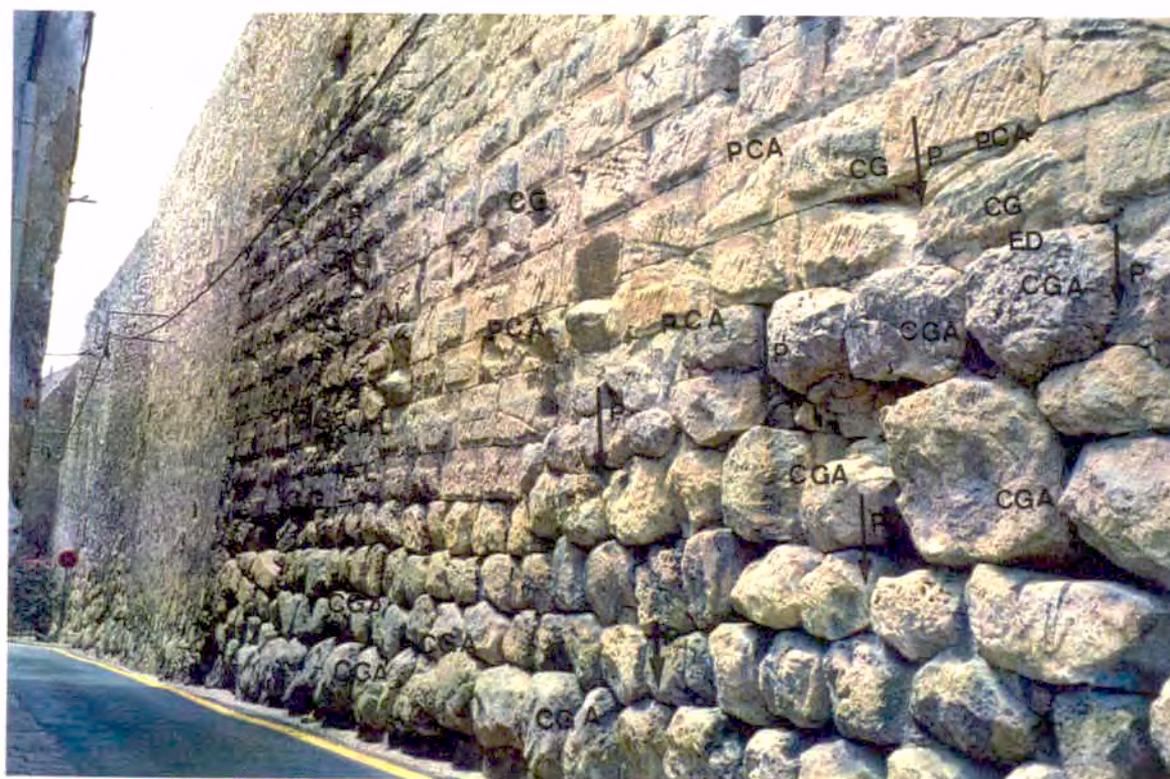
Muralla de Tarragona. Baixada del Roser. Resumen del mapping elaborado en colaboración con el TERM (1993)

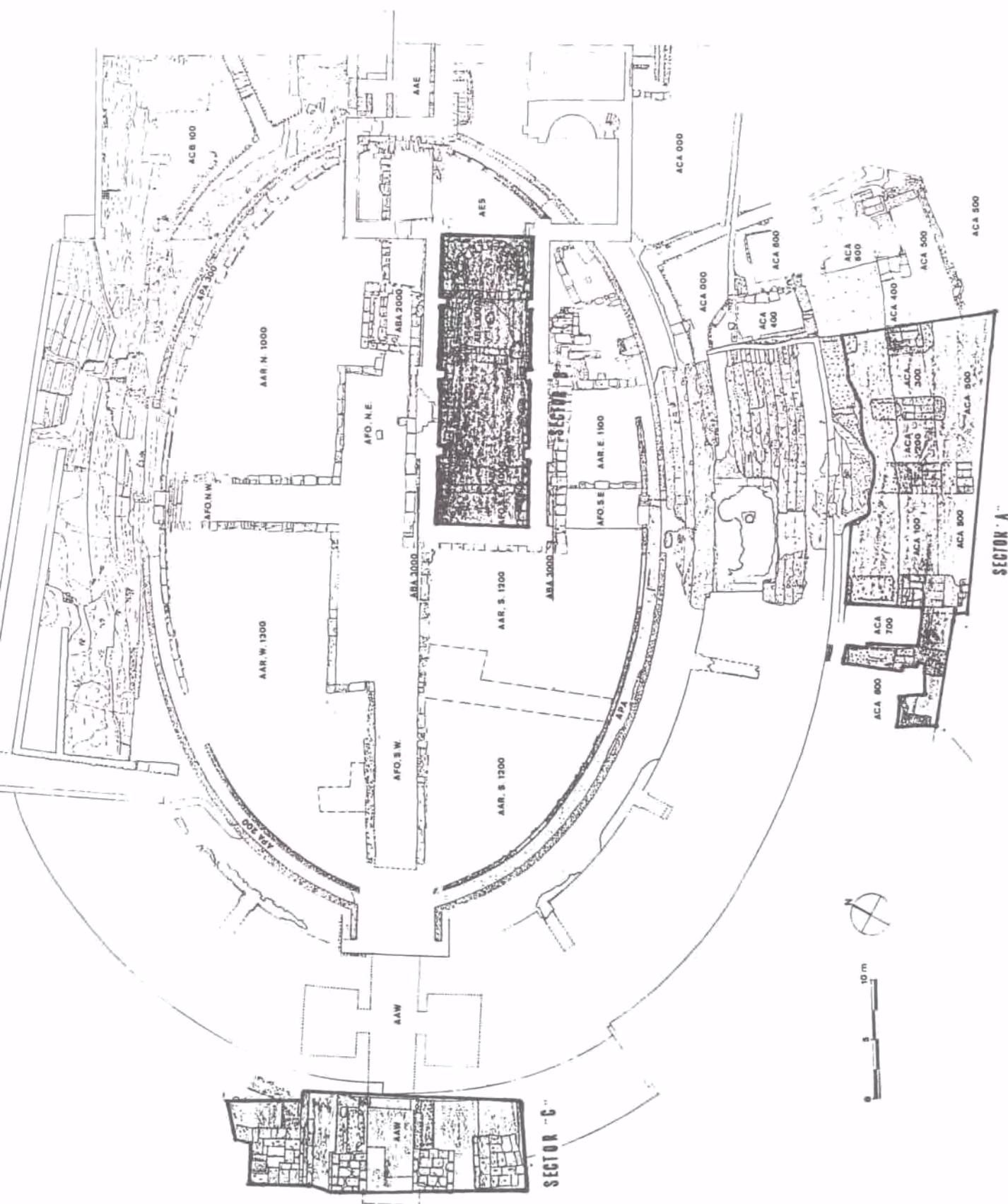
- CGA: Costra gris azulada
- R: Retroceso superficial
- DP: Desplacación
- CBN: Costra líquénica negra
- P↓: Percolación
- AL: Alvealización
- CV: Cavernas
- F: Fisuras



Muralla de Tarragona. Baixada del Roser. Tras una campaña parcial de limpieza (TERM 1993), aún se aprecian las costras gris azuladas y las pátinas anaranjadas

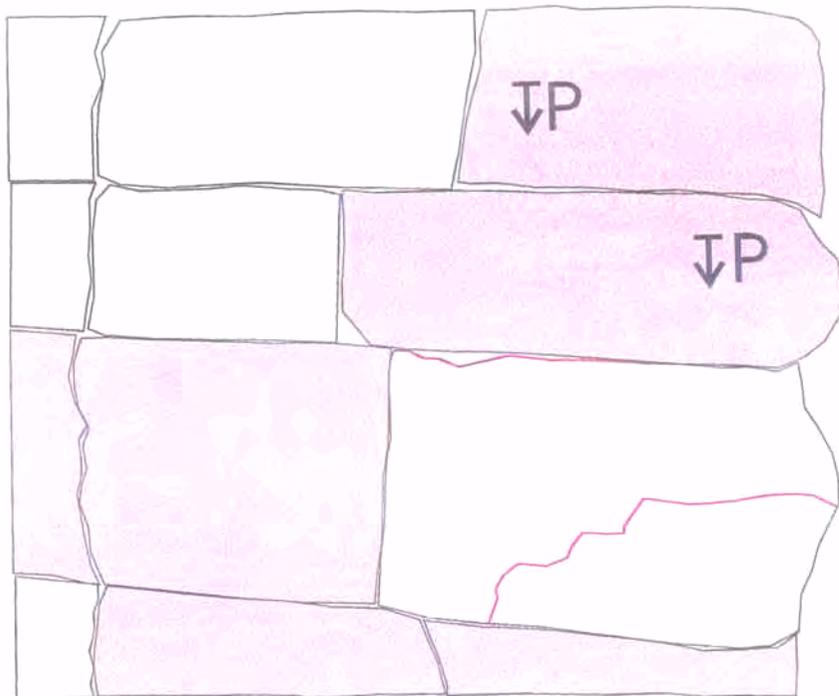
CG: Costra gris	R: Retroceso superficial	AL: Alveolización
CGA: Costra gris azulada	DP: Desplacación	
P↓: Percolación	PCA: Pátinas cromáticas anaranjadas	





Esquema, en planta, del Anfiteatro Romano (según TEDA, 1990)

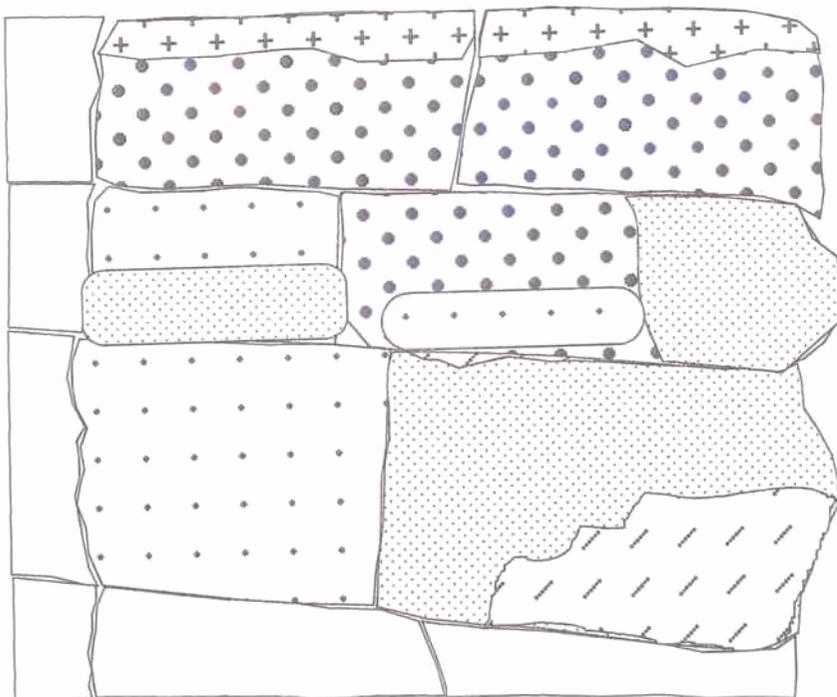
Sector "A" Acceso meridional (Contrafuertes)



 Retroceso superficial

 Fisuras

 Percolación



 Depósitos de polvo/arena

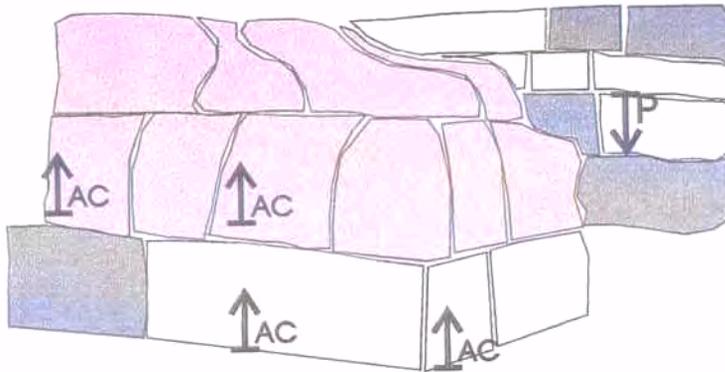
 Picado

 Zonas arenizadas

 Alveolos

 Descamación/descostración

Sector "A" Acceso meridional (Contrafuertes)

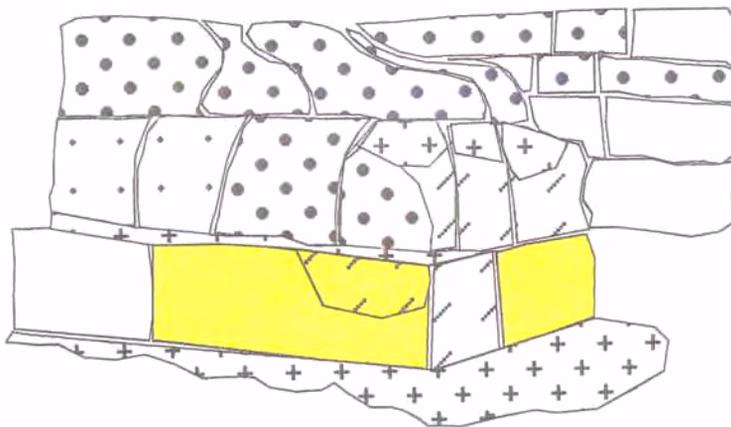


 Retroceso superficial

 Costra gris

 Percolación

 Ascensión capilar



 Depósitos de polvo/arena

 Zonas arenzadas

 Alveolos

 Zonas descamadas/descostradas

 Eflorescencias

ANFITEATRO ROMANO

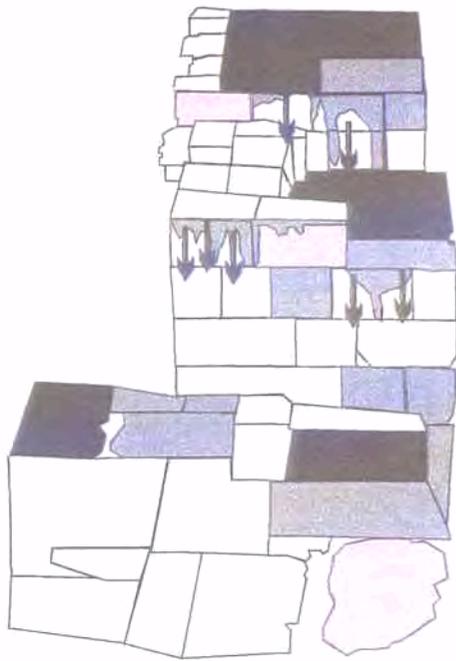


An-5/11 Sector "A": Acceso meridional



An-5/12 Sector "A": Acceso meridional

Sector "C" Acceso occidental (Contrafuertes)

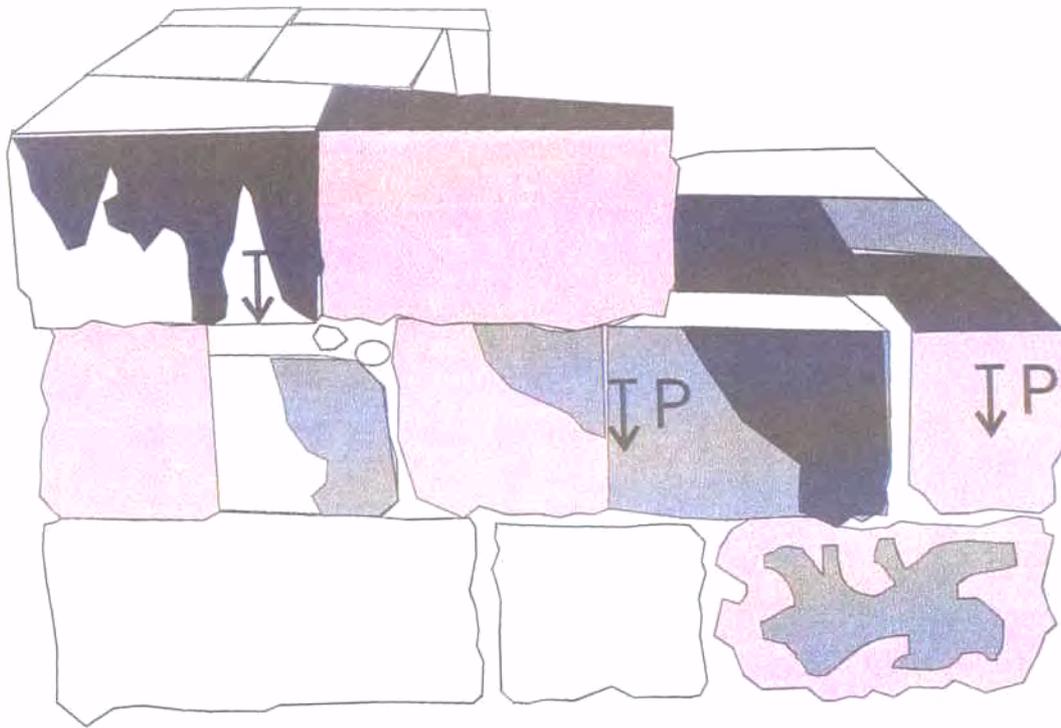


-  Costra biogénica negra/gris
-  Costra gris
-  Percolación
-  Retroceso superficial/erosión diferencial

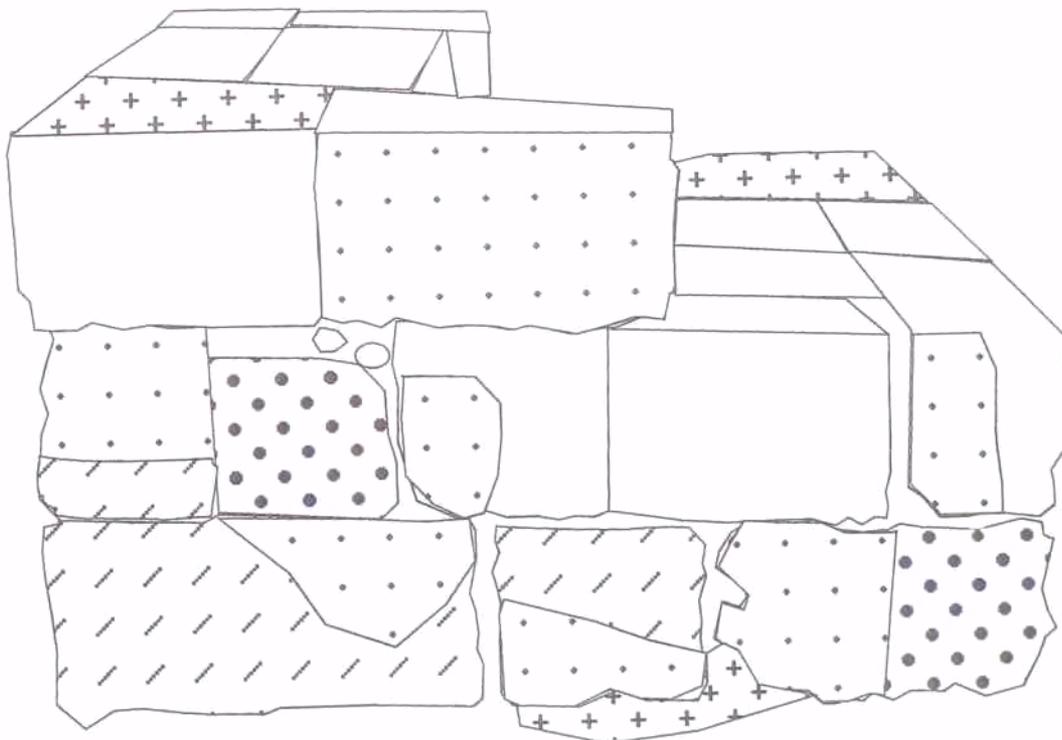


-  Depósito de polvo/arena
-  Zonas arenizadas
-  Alveolos

Sector "C" Acceso occidental (2º Contrafuerte)



-  Costra biogénica negra/gris
-  Costra gris
-  Percolación
-  Retroceso superficial/erosión diferencial



-  Depósitos de polvo/arena
-  Zonas arenizadas
-  Alveolos/cavernas
-  Zonas descamadas/descostradas

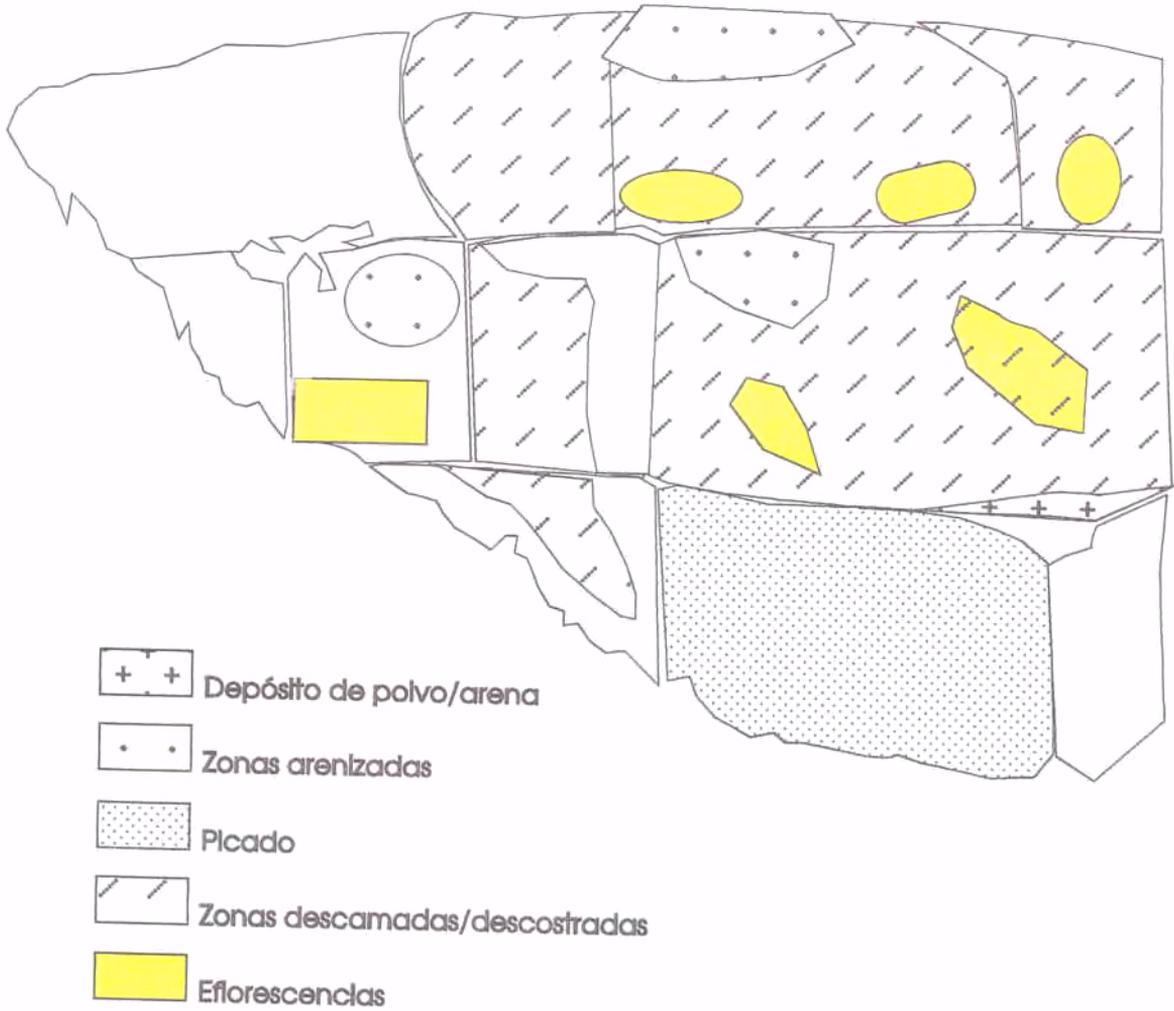
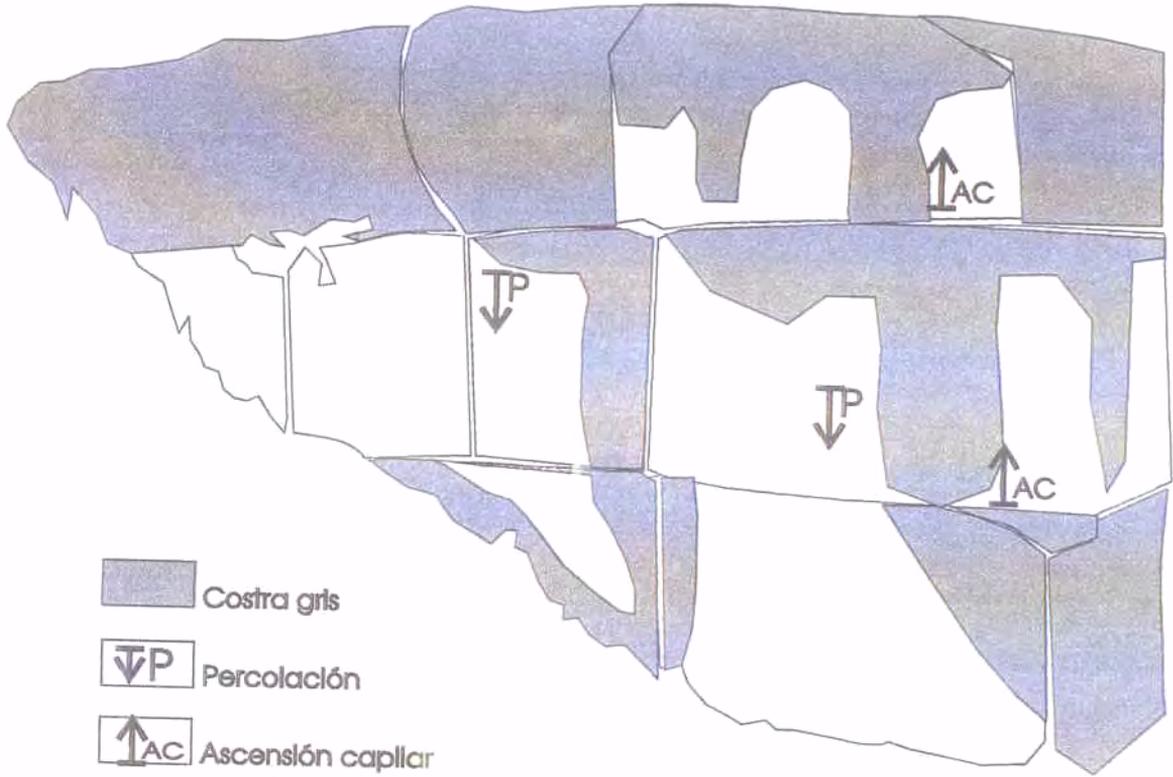
ANFITEATRO ROMANO

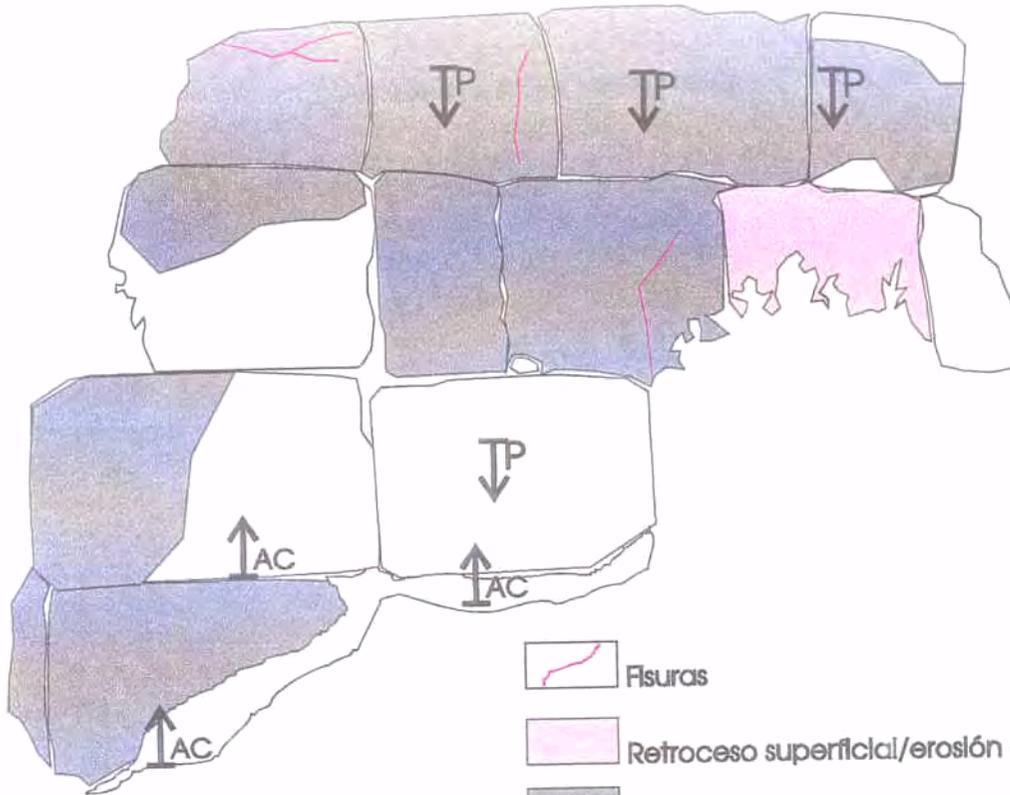


An-5/13 Sector "C": Acceso occidental

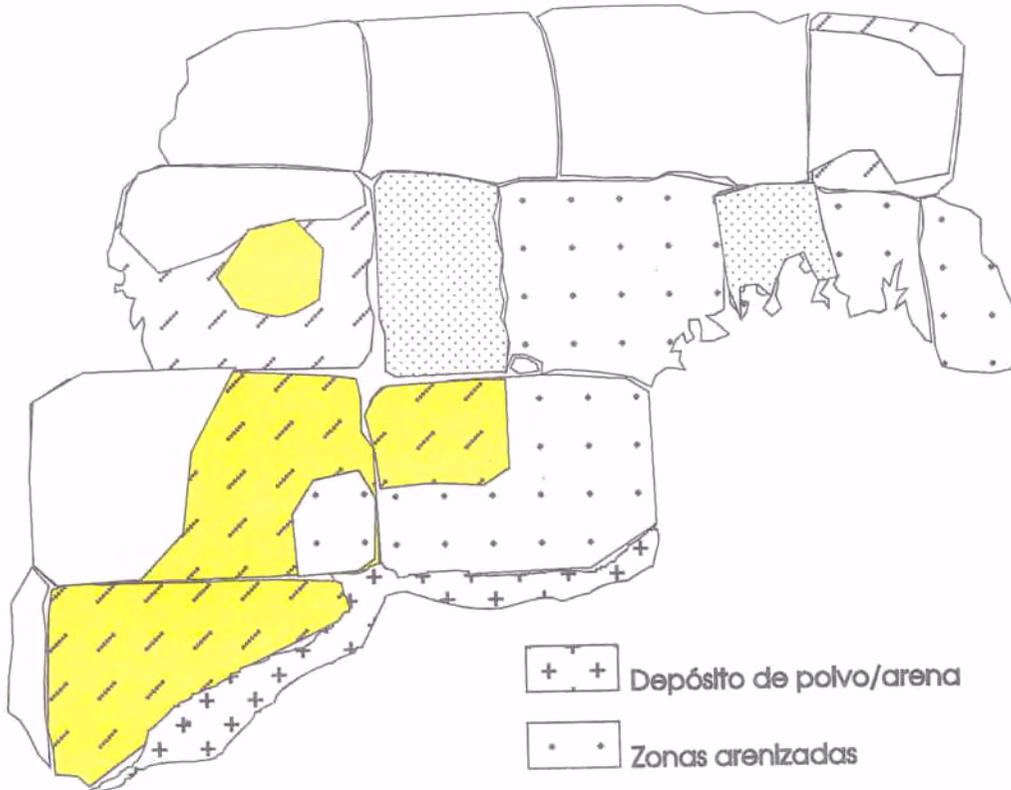


An-5/14 Sector "C": Acceso occidental





-  Fisuras
-  Retroseso superficial/erosión diferencial
-  Costra gris
-  Percolación
-  Ascensión capilar



-  Depósito de polvo/arena
-  Zonas arenizadas
-  Plcado
-  Zonas descamadas/descostradas
-  Eflorescencias

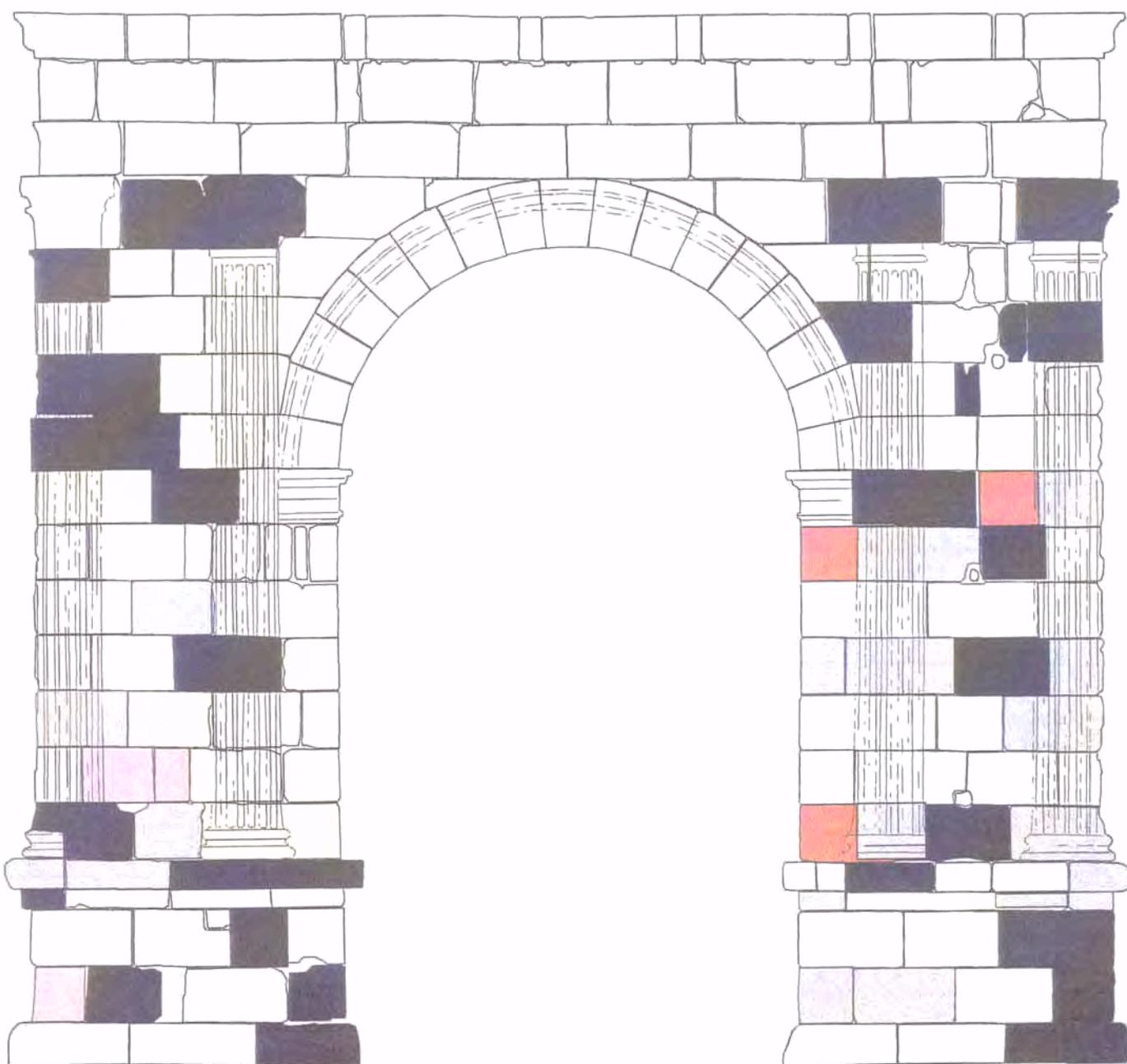
ANFITEATRO ROMANO



An-5/15 Sector "C": Acceso occidental

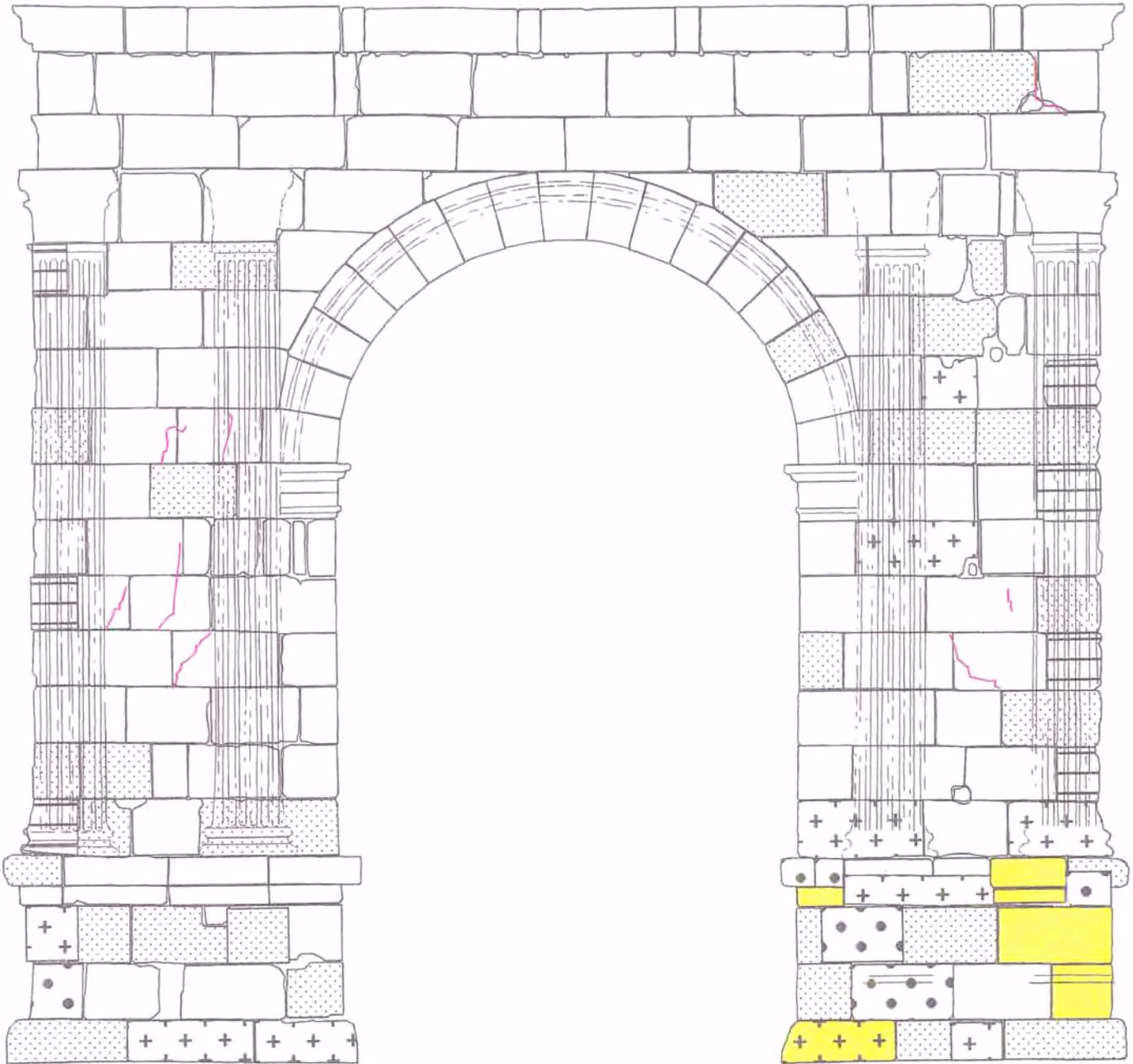


An-5/16 Sector "C": Acceso occidental



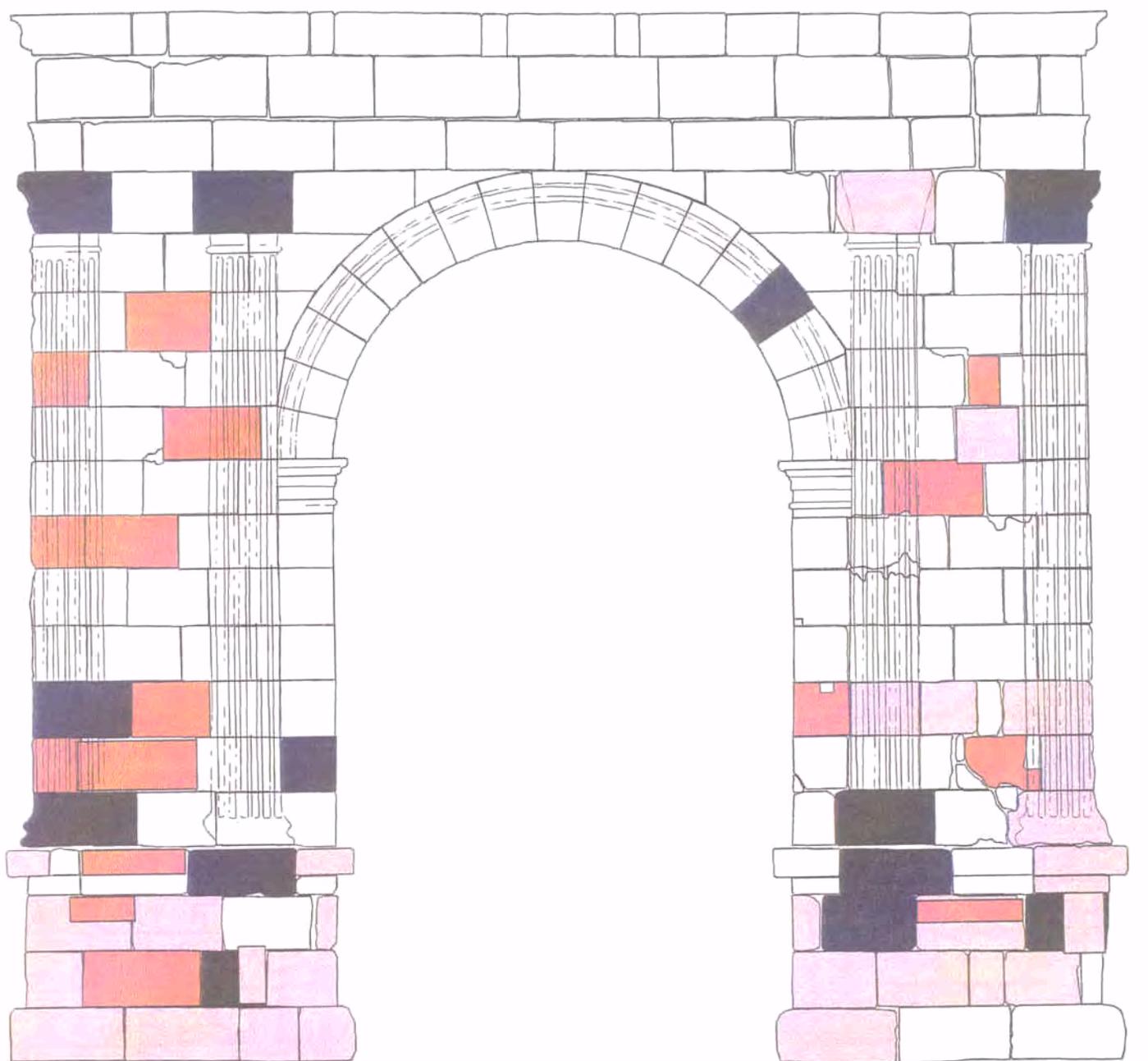
- Costra biogénica negra/gris
- Costra biogénica blanca
- Pátina cromática anaranjada
- Pátina de oxalatos blanco-grisácea
- Retroceso superficial/Erosión diferencial

Alzado Nord-Este del "Arc de Berà". Sección según Dupré (1992)



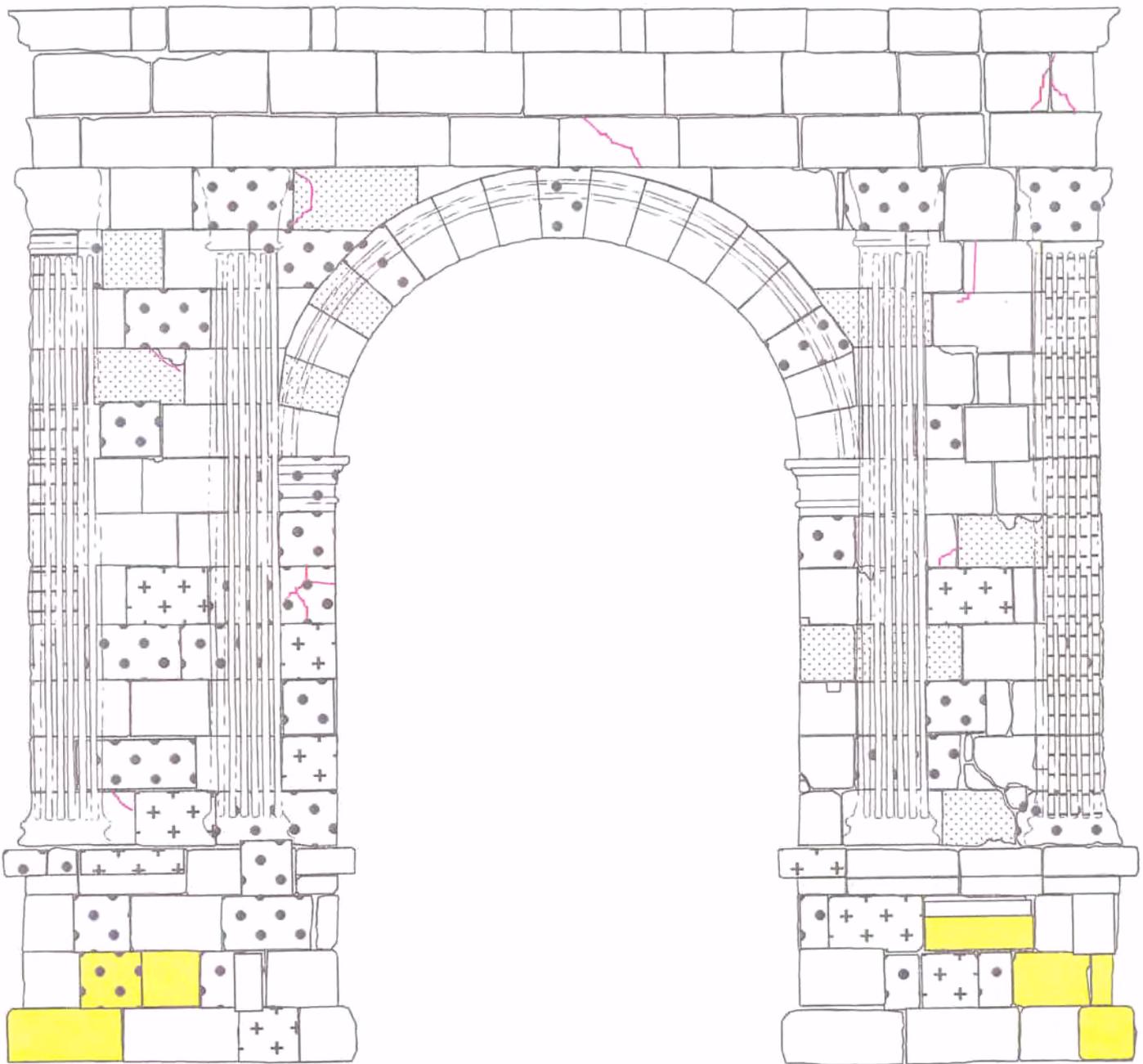
-  Fisuras
-  Eflorescencias
-  Depósitos de polvo/arena
-  Picado
-  Alveolos
-  Desconchadura/desplacación

Alzado Nord-Este del "Arc de Berà". Sección según Dupré (1992)



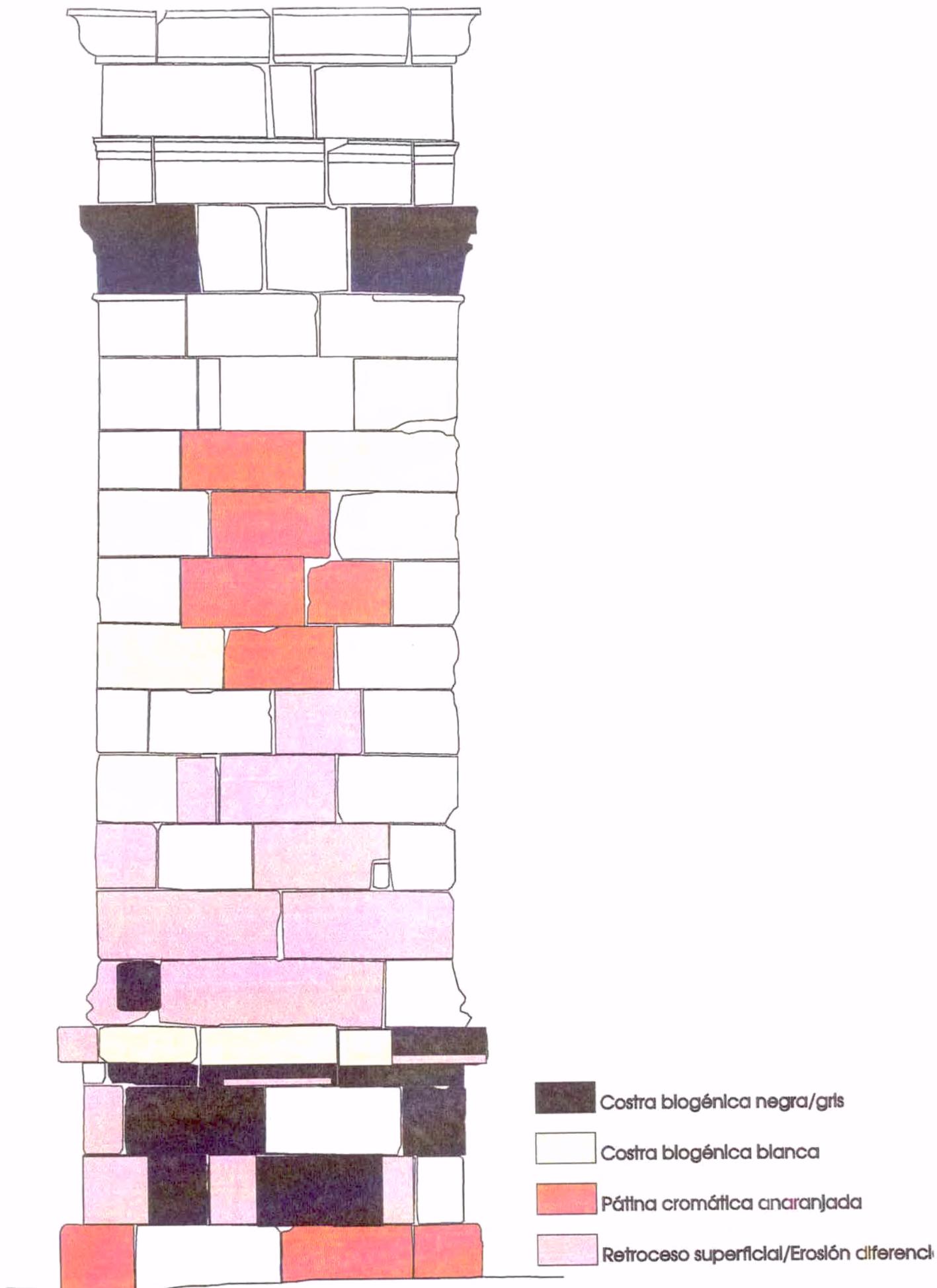
- Costra biogénica negra/gris
- Pátina cromática anaranjada
- Retroceso superficial/Erosión diferencial

Alzado Sud-Oeste del "Arc de Berà". Sección según Dupré (1992)

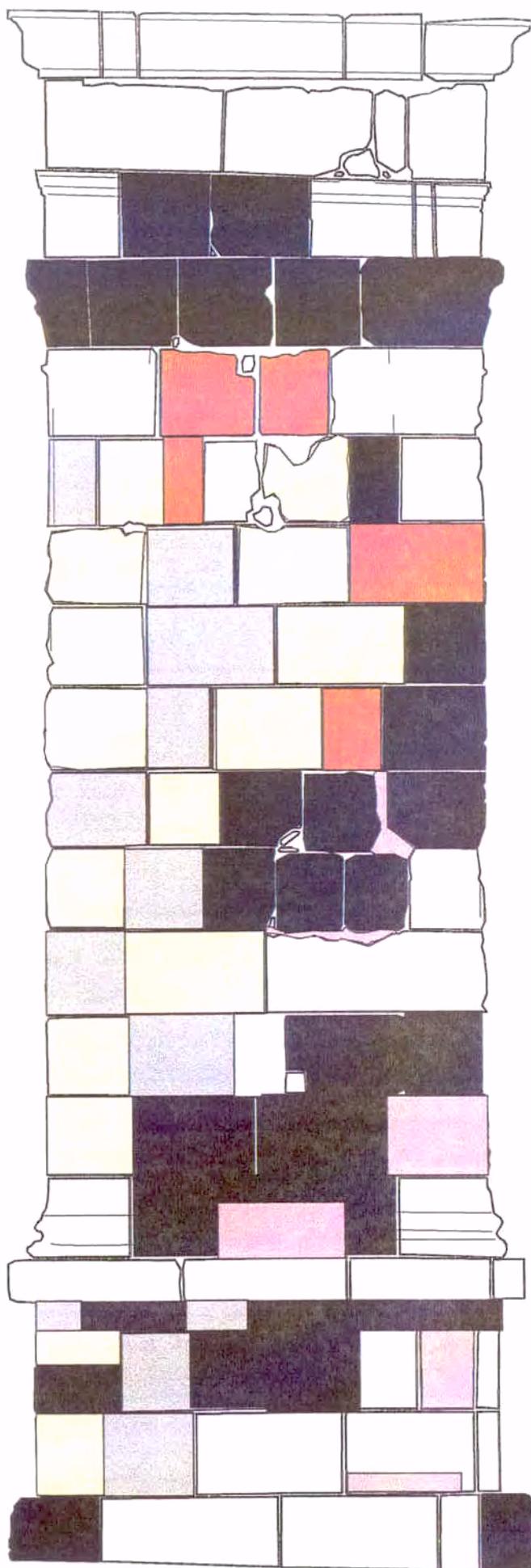


-  Fisuras
-  Eflorescencias
-  Depósitos de polvo/arena
-  Picado
-  Alveolos
-  Desconchadura/desplacación

Alzado Sud-Oeste del "Arc de Berà". Sección según Dupré (1992)

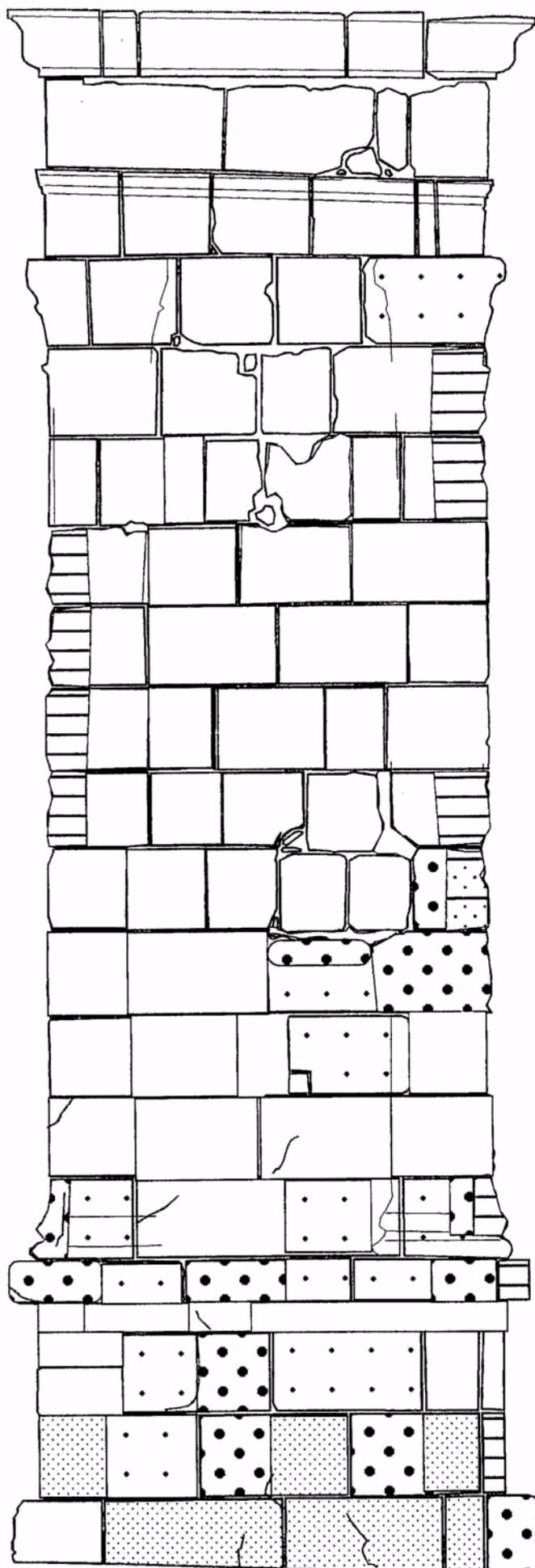


Alzado Sud-Este Exterior del "Arc de Berà". Sección según Dupré (1992)



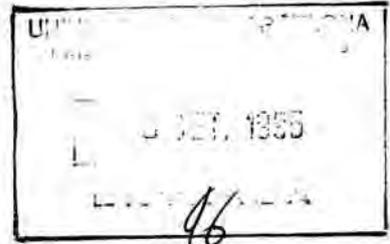
- Costra biogénica negra/gris
- Costra biogénica blanca
- Pátina cromática anaranjada
- Pátina de oxalatos blanco-grisácea
- Retroceso superficial/Erosión diferencial

Azado Nor-Oeste Exterior del "Arc de Berà". Sección según Dupré (1992)



-  Fisuras
-  Desconchadura/desplacació
-  Plcado
-  Alveolos
-  Zonas arenizadas

Alzado Nor-Oeste Exterior del 'Arc de Berà'. Sección según Dupré (1992)



6 PARÁMETROS PETROFÍSICOS Y ALTERABILIDAD DE LOS LITOTIPOS SIGNIFICATIVOS

6.1 INTRODUCCIÓN

Se han seleccionado cinco canteras de las cuales se han extraído los materiales que, de forma clara, han contribuido decisivamente a la ejecución material de las obras romanas más significativas, tanto por volumen aportado como por la representatividad del monumento. Son las siguientes:

FACIES CALCARENITA

- "El Mèdol"
- "Els Munts" ("Platja dels Capellans")
- "Roda de Berà"

FACIES CALCI-DOLOSILTITA

- "Les Coves de la Pedrera"
- "Les Coves del Llorito"

Estas canteras como ya se ha indicado han suministrado la mayor parte de la obra de sillería de los monumentos estudiados: "Arc de Berà", Muralla de Romana y Anfiteatro Romano de Tarragona.

El objetivo que perseguimos es determinar en primer lugar los parámetros básicos petrofísicos, especialmente los relacionados con el comportamiento frente al agua, así como establecer la relación existente entre ellos y las características mineralógicas y texturales definidas en los apartados anteriores.

Una vez estudiadas estas propiedades y evaluados tales parámetros se determina experimentalmente la alterabilidad de estos materiales.

Teniendo en cuenta que el agente químico más agresivo son las sales solubles porque las variaciones de volumen que experimentan estas sales en sus fases hidratadas, son muy importantes, se ha llevado a cabo en el laboratorio un envejecimiento artificial, acelerado por medio de ciclos de cristalización de sulfato sódico.

Los parámetros que obtenemos más frecuentemente se exponen en el cuadro siguiente:



ENSAYO	PARAMETROS PETROFISICOS
DENSIDADES	
Metodo picnometrico Composición mineral porcentual (XRD)	Densidad particulas solidas: ds Densidad mineral: dm
Absorción de agua al vacío Inyección de mercurio	Densidad de la masa impermeable d (i, H ₂ O)
POROSIDADES	
Metodo picnometrico Absorción de agua al vacío Porosimetría de mercurio	Porosidad total: nt Porosidad accesible: no Porosidad cerrada: nc
Porosimetría de mercurio	Porosidad abierta o libre: n. ab Porosidad atrapada: n. at Macroporosidad: n. macro Microporosidad: n. micro
PROPIEDADES HIDRICAS	
Succión capilar	Coefficiente de succión capilar: CAC
Absorción de agua al vacío	Contenido final de agua en saturación: Ws%
Absorción de agua al vacío + Desorción libre de agua	Contenido final de agua: WD Grado de saturación final: Sr. D (evaporación)
Absorción libre de agua	Contenido final de agua: WA Grado de saturación final: Sr. A
Hinchamiento	Coefficiente de expansión lineal e% (ex%, ey%, ez%)
ALTERABILIDAD	
Ciclos de cristalización de sales	Pérdida de masa ΔM (i)
PROPIEDADES MECANICAS	
Compresión simple o uniaxial	Resistencia a la compresión: σ C Deformación lineal: ε Módulo de Young: E
Tracción indirecta (brasileño)	Resistencia a la tracción: σ t
Ultrasonidos	Velocidad ondas longitudinales en muestra seca: Vp. s Velocidad ondas longitudinales en muestra saturada: Vp. w Índice de incremento de velocidad en muestra saturada: Ip

6.2 POROSIDAD, VOLUMEN Y DENSIDAD

6.2.1 Conceptos

La porosidad en un material es la relación existente entre el volumen de poros y el volumen de sólidos. Como los poros varían de tamaño y forma, y no siempre están conectados entre sí (o no son accesibles), el valor final que se obtiene de la porosidad depende del método elegido para determinar los volúmenes, con lo cual puede no haber una identidad entre la porosidad real y la que nosotros determinamos (porosidad más o menos efectiva). Por otro lado, la porosidad real puede no tener apenas incidencia en determinados procesos, pues la forma de los poros y los agentes externos serán más responsables de un fenómeno concreto de deterioro que el valor absoluto de la misma porosidad. Por eso es imprescindible conocer cuales son los volúmenes (porcentaje de la porosidad total) cuya influencia sea decisiva para los mecanismos de deterioro.

Existe una gran diversidad de procesos, conceptos y nomenclaturas alrededor de esta cuestión. Cuando es necesario medir y caracterizar la porosidad, se hace también necesario definir previamente los distintos volúmenes que intervienen en su cálculo.

El volumen total de roca (V_t) es igual al volumen de la fase mineral (V_m) o partículas sólidas (V_s), que en materiales pétreos es prácticamente equivalente, más el volumen total del espacio poroso (V_v)

$$V_t = V_s + V_v \quad (1) \qquad V_s \equiv V_m \quad (\text{en rocas})$$

El Volumen total de espacio poroso (V_v) es igual al volumen de poros accesible por los fluidos (V_n) más el volumen de los poros cerrados (V_c)

$$V_v = V_n + V_c \quad (2)$$

El volumen impermeable (V_i) es igual al volumen de la masa mineral (V_m), o de las partículas sólidas (V_s), más el volumen de poros cerrados (V_c).

$$V_i = V_s + V_c \quad (3)$$

El volumen de los poros accesibles (V_n) es igual al volumen de los poros abierta (V_{ab}) más el volumen de los poros atrapantes (V_{at}). Definimos como poros atrapantes aquellos que permiten la entrada a presión de ciertos fluidos, como el mercurio, pero no permiten la salida de los mismos.

$$V_n = V_{ab} + V_{at} \quad (4)$$

De estas cuatro expresiones fundamentales podemos extraer otra más desarrollada del volumen total de poros en función de los distintos volúmenes.

$$V_t = V_s + V_v = V_s + V_n + V_c = V_s + V_{ab} + V_{at} + V_c$$

Una vez aclarado el significado de estos términos podríamos establecer una serie de parámetros según la nomenclatura de la ISRM (Alonso 1986).

Densidad mineral (d_m): equivale numéricamente al "peso específico" seco de un suelo (Lambe 1969), aunque al emplear en su cálculo la magnitud masa, se trata en realidad de una densidad. Se define:

- $d_m = M_0/V_m$ (Kg/m^3)
- M_0 = Masa roca seca
- V_m = Volumen de la masa mineral o sólida.

Densidad de la roca seca o densidad aparente (d_{ap}):

- $d_{ap} = M_0/V_t$
- M_0 = Masa roca seca
- V_t = volumen total de la roca

Densidad de la masa impermeable (d_{i, H_2O}):

$$d_{i, H_2O} = \frac{M_0}{(M_3 - M_2) - V_n} = \frac{M_0}{M_0 - M_2}$$

- M_0 = Masa roca seca
- M_3 = Masa de la roca saturada por agua, pesada al aire.
- M_2 = Masa saturada y pesada sumergida en agua. (Pesada hidrostática)
- V_n = Volumen de los poros accesibles.

Porosidad total (n): volumen de espacios vacíos (V_v) por unidad de volumen total de roca seca (V_t), expresado en tanto por ciento

$$n(\%) = (V_v/V_t) * 100$$

Porosidad accesible (n_o): en algunos artículos escritos se habla de porosidad abierta al definir la porosidad en función del volumen ocupado por un fluido determinado. Consideramos que este termino se presta a confusión y que más bien debiera hablarse de porosidad accesible ya que solamente parte de los huecos se hallan bien comunicados entre si y permiten la libre circulación de los fluidos, en contraposición a la porosidad atrapante, la cual solo inicialmente permite que los fluidos sean accesibles, pero luego no permite su salida.

Así pues, con el símbolo "no" nos referiremos siempre a la porosidad accesible, siendo la porosidad abierta o circulante un porcentaje de la porosidad accesible.

$$n_o(\%) = (V_n/V_t) * 100$$

6.2.2 Determinación de la densidad de la fase sólida o mineral y de la fase impermeable

Para determinar la densidad de la fase sólida o mineral, puede emplearse el conocido método del picnómetro, con lo que se obtiene la densidad de la roca, o bien, a partir de la composición mineral porcentual, se halla una densidad teórica. En el mejor de los casos, la determinación empírica y la teórica, tendrían que coincidir.

La determinación de la masa impermeable de la roca puede hacerse tras saturar con agua al vacío, o bien mediante porosimetría de mercurio.

6.2.2.1 Densidad de la fase sólida

Método Picnométrico

Se ha seguido la norma 7001 UNE para calcular el peso específico de suelos secos, y el ensayo 3. 3 de la RILEM-comision 6 PAN.

El objetivo es conseguir la densidad de una forma muy precisa, eliminando todas las posibles errores que se producen en otros métodos debidas a la imposibilidad de medir la porosidad cerrada. Se ha realizado las siguientes operaciones:

- Cuarteo
- Molturado
- Cribado en un tamiz (No-100 ASTM) $d < 0.149$ mm.
- Pesada del picnómetro vacío: P1
- Pesada del picnómetro enrasado en agua destilada: P2
- Pesada del picnómetro con muestra seca y molturada: P3
- Pesada del picnómetro con muestra y enrasado en agua destilada: P4

Se mide la temperatura del agua antes de cada determinación y se obtiene la densidad del agua correspondiente a esa temperatura, mediante la lectura de las tablas adjuntas a la norma ya citada.

Con estos datos se calcula el volumen de la muestra seca, lo que equivale al volumen de la masa sólida y su peso. El cociente entre ambos es pues la densidad de la masa de las partículas sólida (ds)

Volumen masa sólida (V_s)

$$V_s = \frac{P_2 + P_3 - P_1 - P_4}{\text{Densidad del agua (en función de la temperatura)}}$$

Peso de la masa sólida (P_o) = $P_3 - P_1$

El peso de la masa mineral (P_o) nos permite hallar la masa mineral (M_o), según densidad del agua.

Finalmente hallamos la densidad de la masa de las partículas solidas mediante la siguiente expresión:

$$ds = \frac{M_o}{V_s} \text{ (gr/cm}^3\text{)}$$

- ds=densidad de la masa de las partículas solidas
- M_o =masa mineral
- V_s =volumen de la masa de las partículas solidas

Se ha realizado cuatro picnometrias como mínimo por muestra, y se ha seleccionado una o dos muestras por cantera según los niveles más significativos, lo que ha permitido determinar la densidad de los 5 litotipos seleccionados tras el estudio estratigráfico y petrológico (ver capítulo 3).

Composición mineral porcentual: densidad mineral teórica

Como ya se ha explicado en el capítulo (3. 3. 2) se ha obtenido la composición mineral de cada tipo de roca por difracción de rayos X, utilizando patrones de referencia (tabla 3.II). A partir de estos datos, la densidad teórica mineral es la densidad media ponderada (dm. XRD), expresada en tanto por ciento, según la siguiente expresión:

$$dm.XRD = \sum_{i=1}^n C(i) d(i)/100$$

donde:

- dm. XRD: densidad media ponderada
- C (i) = concentración porcentual de cada uno de los minerales que componen la roca, identificados por difracción de rayos X. (tabla 3.II)
- d (i) = densidad de cada mineral (a veces es un intervalo de valores).

Las densidades teóricas de los minerales detectados por difracción de rayos x, que han servido para el calculo de la densidad teórica de cada roca, vienen expuestos en la tabla siguiente:

calcita	2.72
dolomita	2.85
cuarzo	2.65
hematites	5.26
gochita	4.37
ortosa	2,57 - 2,54
illita	2.88
kaolinita	2.6
palygorskita	2.3

TABLA 6.I: Densidades de los distintos minerales, en gr/cm³

6.2.2.2 Densidad de la masa impermeable

Todos los métodos que se basan en la absorción de un fluido, como absorción de agua al vacío, o de su penetración forzada como la inyección de mercurio, sirven para medir, aunque con diferente aproximación la porosidad accesible (no%) y se puede determinar la densidad de la masa impermeable. Pero al existir un volumen de poros cerrados o no accesibles, la densidad obtenida por estos métodos, aunque muy próxima, siempre será teóricamente inferior a la densidad obtenida por el método picnométrico, que también se denomina densidad absoluta (Hoffmann, Ensayo 3. 3, comisión 6-PAN-RILEM 1968.)

Como antes se ha indicado existen dos métodos indirectos para calcular la densidad de la masa impermeable: mediante saturación al vacío y con porosimetría de mercurio.

Determinación de la masa impermeable por saturación al vacío

Las muestras que han sido saturadas en agua mediante absorción al vacío, permiten hallar esta densidad "impermeable al agua ", por diferentes pesadas correspondientes a la masa saturada al aire (M₁) y la masa sumergida (M₂), según la expresión (A):

$$d(i, H_2O) = \frac{M_0}{(M_3 - M_2) - V_n}$$

- M₀: masa en seco
- M₁: masa saturada de agua al vacío
- M₂: masa saturada sumergida
- V_n: volumen de la porosidad accesible

La densidad de la masa impermeable es igual al cociente entre la masa en seco y el volumen de la masa impermeable. Pero este volumen impermeable es el resultado de restar al volumen total de la muestra ($M_3 - M_2$), el volumen de la porosidad accesible (V_a).

Desarrollando estas igualdades y teniendo en cuenta que la porosidad accesible es igual a la masa saturada (M_3) menos la masa en seco (M_0), podemos llegar a otra expresión más simplificada de la densidad de la masa impermeable.

Si, $V_a = M_3 - M_0$ entonces $(M_3 - M_2) - V_a = (M_3 - M_2) - (M_3 - M_0) = M_0 - M_2$
 Luego podemos expresar el cociente anterior (A) de la forma siguiente:

$$d(i, H_2O) = \frac{M_0}{M_0 - M_2}$$

Los resultados pueden verse en la tabla 6.II.

Determinación de la masa impermeable por porosimetría de mercurio

Por razonamientos muy similares al método de pesada hidrostática, podemos establecer la densidad de la masa impermeable pero en este caso en vez de agua se emplea mercurio. Los actuales sistemas informáticos incorporados a los porosímetros de mercurio ya deducen este valor de forma automática expresándolo como "bulk density" corregida.

La densidad de la masa impermeable al mercurio viene expresada por un cociente entre la masa de la muestra en seco (P_2) y la diferencia de volúmenes total (V_t) y accesible al mercurio ($V_n(Hg)$). Esta diferencia es, lógicamente el volumen total ocupado por el mercurio tras la primera inyección.

$$d(i, Hg) = \frac{P_2}{V_t - V_n(Hg)}$$

El volumen total de la muestra (V_t) se obtiene mediante el cociente:

$$V_t = \frac{P_1 + P_2 - P_3}{d.Hg}$$

Donde:

- P1: pesada del dilatómetro lleno mercurio
- P2: peso muestra seca
- P3: peso del dilatómetro lleno y con muestra inyectada tras el ensayo
- d. Hg: densidad del mercurio
- Vn (Hg): volumen total de mercurio penetrado, esto es el volumen de poros accesible, o volumen de poros ocupados por el mercurio

Los resultados pueden verse en la tabla 6.II.

6.2.3 Resultados de la determinación de densidades

CANTERA	dm (Picnometría)	dm (XRD)	d (i, H ₂ O)	d (i, Hg)
"Cov. Llorito"	2730	2720	2680	2690
"Cov. Pedrera"	2820	2840	2770	2990
"Roda Berà"	2720	2720	2700	2710
"Els Munts"	2710	2720	2650	2585
"El Medol"	2730	2720	2690	2640

TABLA 6.II: Densidades de las rocas más comúnmente usadas. Todos los valores están expresados en Kg/m³, según las recomendaciones de la RILEM

La densidad de las partículas solidas o densidad mineral que viene dada por el método picnométrico (dm. Picnometría) y la deducida a partir de la composición porcentual por difracción de rayos x (dm. XRD), se denomina densidad absoluta, y sus resultados son bastante coincidentes.

La densidad de la masa impermeable obtenida tanto por absorción de agua (d. i, H₂O) como por inyección de mercurio (d. i, Hg), suelen ser algo inferiores a la densidad mineral (dm), como ya hemos comentado, ya que no toda la porosidad es accesible a estos fluidos.

El valor de la tabla 6. II correspondiente a "Les Coves de la Pedrera" obtenida por porosimetría de mercurio (d (i, Hg) =2990 Kg/m³) no solo no coincide con los otros valores si no que es superior a la densidad mineral. Este resultado es debido probablemente a problemas instrumentales en la inyección de mercurio, dada la elevada porosidad de la roca.

Así pues estas densidades de la masa impermeable podemos decir que caracterizan el material en función de su composición mineral, con diferentes grados de aproximación según el método empleado, a diferencia de las que se denominan densidades aparentes, que están en función de su porosidad.

6.3 ESTUDIO DEL ESPACIO POROSO

6.3.1 Metodología

La terminología empleada para clasificar los tipos de porosidad en carbonatos es la de Choquette y Pray (1970), que a su vez es la más habitual en los estudios petrológicos. Esta misma

clasificación, modificada por Longman (1982), es la que ya hemos utilizado al describir laminas delgadas de los materiales de cantera (ver capítulo 3).

En este sentido ya se ha realizado un notable estudio tanto cualitativo como cuantitativo sobre las facies arrecifales del Mioceno de la cuenca del Penedés (Permanyer, 1983), estudiando la distribución de los diferentes tipos de poros en estas facies sedimentarias arrecifales.

Nuestro objetivo, en cambio es diferente ya que se centra en el aspecto porosimétrico y geométrico de la red porosa, esto es la distribución del tamaño de poro o sus accesos y el grado de comunicación entre sí.

Estas características de la red de poros ejerce un control importante sobre la circulación y retención de fluidos, por tanto sobre la humedad, factores fundamentales en los procesos de deterioro de materiales pétreos, (Montoto, 1983; Eibert y Ordaz, 1985; J. Alonso, 1986).

La correlación entre el sistema poroso y la alterabilidad ha sido ampliamente desarrollada en trabajos monográficos. Cabe citar especialmente los de Torracá (1988), Stambolov y otros (1976), que se centran en el estudio del efecto hidrofílico y absorbente de las superficies porosas, y en los mecanismos de penetración del agua desde la superficie.

Otros estudios en cambio han puesto más interés en las relaciones que existen entre la geometría de la red porosa y los fenómenos capilares, que determinan la circulación interna de fluidos (Wardlaw 1976).

Pero independientemente de estas aplicaciones de los estudios porosimétricos, nuestro objetivo inicial es el estudio de las características de la red de poros. En este sentido interesa clarificar, previamente, dos aspectos: las divisiones del espectro porosimétrico, y los tipos de métodos y técnicas de estudio de la porosidad

A- Divisiones del espectro porosimétrico: en cuanto al espectro porosimétrico, pueden establecerse diferentes categorías, que fundamentalmente dependen del procedimiento instrumental que se emplee. Para Prevosteau, Ragot y Sima (1970) estas categorías o rangos, serían las siguientes:

- Infraporosidad: diámetro de poro inferior a 0.03 μm .
- Microporosidad: diámetro de poro comprendido entre 0.03 y 7.5 μm .
- Macroporosidad: diámetro de poro superior a 7.5 μm .

B- Técnicas de estudio de la porosidad: las técnicas de estudio de la porosidad son bastante variadas. Estudiando la bibliografía existente, hemos observado que los métodos más usuales son los que se basan en la impregnación, succión capilar de agua, adsorción de gases e inyección de mercurio. Un resumen de los procedimientos más habituales, se expone a continuación.

6.3.1.1 Métodos basados en la impregnación

Exclusión Cromatográfica (Halasz, Vogel, 1978)

El método consiste en una penetración forzada, bajo una presión de 10 MPa de un líquido cromatográfico. La observación se realiza con luz ultravioleta y se correlaciona con otros métodos (porosimetría de mercurio). Solo mide micro e infraporosidad (de 0.4 a 0.0001 μm).

Luminiscencia cinética (Zakharov, Grishaeva, Aleskovskic; 1975)

Así mismo se basa en la penetración forzada de un líquido luminiscente (tryplaflavina), cuya luminiscencia se extingue por reacción con el oxígeno. De la cinética de esta reacción se extraen conclusiones sobre la distribución de poros, en las bandas del espectro porosimétrico correspondientes al micro y al infraporo.

Impregnación con sustancias fluorescentes (Montoto, Rodríguez Rey y otros, 1987)

Igualmente hay penetración forzada, en la red porosa, de sustancias luminiscentes, con posterior observación microscópica en varias gamas del espectro, especialmente en microscopía óptica de fluorescencia. El contaje estadístico o tratamiento digital de imagen permiten la evaluación final de la porosidad.

Inmersión en líquidos de baja viscosidad (Kuz'min, Postnikov 1969)

Se utiliza diversos tipos de líquidos, tales como, Xyleno, tetracloruro de carbono solo o mezclado con hexadecano (Wilkinson, 1974). Se cuantifica por pesada el líquido penetrado, y se establecen parámetros simples, aunque no proporciona un espectro porosimétrico completo. Se utiliza, sobre todo para medir materiales muy microporosos.

6.3.1.2 Métodos hídricos

Porometría por succión capilar de agua. (De Castro, 1975; Martín Pérez, 1990)

Según la descripción del ensayo I. 4 RILEM 25 PEM, esta técnica supone la realización de tres ensayos diferentes:

- Placa de succión: mide un espectro de poro de 2973 a 2.97 μm , $t = 20\text{ C}^\circ$, pF entre 0 y 3.
- Membrana de presión: mide un espectro de poro de 2.97 a 0.19 μm , $t = 20\text{ C}^\circ$, pF entre 3 y 4.2.
- Desecador al vacío: mide un espectro de poro de 0.09 a 0.0003 μm , $t = 20\text{ C}^\circ$, pF entre 4.5 y 7.

La porosimetría de succión permite establecer el diámetro, el volumen de poros y la distribución de tamaños. El procedimiento se basa en la determinación del agua retenida por el material bajo la aplicación de diferentes presiones de succión (pF).

La succión, es medida durante el ensayo como una altura h , pero representa la presión negativa que retiene el agua en los poros. A medida que la muestra se seca el agua es confinada por succión capilar en poros cada vez de menor diámetro.

Esta presión (pF) varía de forma continua con el grado de humedad de la muestra desde cero (materiales saturados de agua), hasta miles de cm. de agua, para los secos, por eso se utiliza una

escala logarítmica, que relaciona la altura medida (h) y la presión de succión (pF), mediante la siguiente expresión: $pF = \log_{10} h$

La porometría de succión mediante los tres ensayos mencionados mide un amplio intervalo desde $pF = 0$ a 7, partiendo siempre de un estado de saturación de agua a 20 C° y controlando en su proceso de secado su peso y la altura h de succión correspondiente.

El diámetro de poro se obtiene por una relación ya tabulada entre h (en cm.) y la presión de succión pF y entre este último parámetro y el tamaño de poro, expresado en micras.

El volumen de poro se deduce a partir de las sucesivas pesadas, del contenido de agua correspondiente y de la densidad de la muestra.

6.3.1.3 Métodos basados en la adsorción de gases

Adsorción - desorción isotérmica de gas - sólido (Dubinin, 1968, 1973, Allen 1974, Gregg y Sing 1982)

Se basa en la adsorción de gases, (nitrógeno, mezclas de helio - nitrógeno), según la ecuación denominada de BET (Brunauer, Emmett y Teller, 1938).

El ensayo tiene lugar a baja temperatura (hasta -195 C°) para favorecer la absorción física respecto a la absorción química. Se utiliza para estudiar la infraporosidad y los microporos menos accesibles al mercurio. En general cubre el espectro de porosidad entre 0.0005 a $0.03\ \mu\text{m}$.

6.3.1.4 Adopción de técnicas óptimas en rocas porosas: inyección de mercurio y absorción al vacío

A la vista de los métodos expuestos, puede verse que no existe una técnica instrumental que cubra todo el espectro o rango posible de tamaños de poro. En este sentido los ensayos de succión en placa, membrana y bajo desecador parecen abarcar un amplio espectro, pero son muy lentos y con serias dificultades en el control instrumental. En la practica industrial y de investigación normativa de materiales, predominan dos tipos de técnicas: Una de adsorción de gas - sólido y otra de porosimetría de mercurio.

La técnica de adsorción de gas-sólido, con la ecuación tipo BET, es útil para los tramos inferiores de la microporosidad y la infraporosidad, es decir el intervalo de 0.0005 a $0.03\ \mu\text{m}$.

La porosimetría de mercurio (con un microporosímetro), sin llegar a permitir la medida de poros tan pequeños, abarca, no obstante la gama de poros comprendida entre 7 y $0.0037\ \mu\text{m}$, lo cual equivale a medir una buena parte de la microporosidad y teóricamente algo de la infraporosidad. Cuantifica por tanto los rangos o volúmenes de poro que especialmente controlan la circulación y almacenamiento de fluidos, principalmente del agua.

Así pues se observa que existe un tipo de técnicas, que se centran en la infraporosidad o microporosidad muy fina, lo cual no es adecuado para nuestros objetivos, otras que no dan un

espectro continuo, ni dan información sobre el grado de comunicación de los poros, y finalmente hay otras que dan buenos resultados pero con un montaje instrumental muy complejo y sujeto a errores.

Por todo ello hemos elegido las técnicas de mayor sencillez, que han sido aceptadas en este campo de investigación por la práctica y sus buenos resultados, en el estudio de las rocas porosas. Se trata, en definitiva, de la porosimetría de mercurio (Wardlaw, 1976; Pellerin, 1980) y de la absorción al vacío.

En nuestro caso, el objetivo que se persigue es la determinación, en cada caso y por medio de la técnica más adecuada, de los parámetros siguientes:

- Porosidad accesible: Absorción al vacío, Porosimetría de Hg.
 - Distribución de rango de poro: Porosimetría de Hg.
 - Porosidad atrapada: Porosimetría de Hg.
 - Porosidad libre o circulante.: Porosimetría de Hg.
 - Porosidad total y cerrada: Picnometría + Absorción al vacío
-
- La porosidad accesible, se cuantifica por la penetración o absorción de fluidos, tales como el agua en vacío o mercurio.
 - La porosidad libre y atrapada y la distribución de rango de poro, se determinan a partir de la inyección y el retroceso en un porosímetro de mercurio.
 - La porosidad cerrada (n_c) o sin acceso a fluidos, representa un porcentaje de volumen tan pequeño que en muchos casos, puede considerarse despreciable. En otros casos, no obstante, puede ser muy importante (travertinos, ciertos basaltos, pumitas) no obstante se puede calcular a partir de los datos obtenidos en los ensayos picnométricos y por absorción de agua al vacío. En efecto, si restamos del volumen de la masa impermeable (V_i) el volumen de la masa de las partículas sólidas (V_s) se obtiene el volumen que corresponde a la porosidad cerrada (ecuación A).
El volumen de la masa impermeable es el resultado de dividir la masa en seco (M_0) de la probeta ensayada por absorción de agua al vacío, por su densidad aparente (d_{ap}) (ecuación B).
El volumen de la masa sólida (V_m) se obtiene al dividir la masa en seco (M_0) de esa probeta por la densidad de las partículas sólidas (d_s) que hemos obtenido por el método picnométrico (ecuación C).

$$V_c = V_i - V_s \rightarrow n_c = \frac{V_c}{V_i} (A)$$

Donde:

- V_i : volumen total de la muestra y V_c : Volumen cerrado

$$V_i = \frac{Mo}{d.ap} (B)$$

$$V_m = \frac{Mo}{ds} (C)$$

Sustituyendo los valores de V_i y V_m en la ecuación A, tenemos:

$$V_c = \frac{Mo}{d.ap} - \frac{Mo}{ds}$$

Y pasando a la porosidad cerrada:

$$nc = \frac{V_c}{V_t} = \frac{\frac{Mo}{d.ap} - \frac{Mo}{ds}}{V_t} = \frac{Mo}{V_t} * \left(\frac{1}{d.ap} - \frac{1}{ds} \right)$$

6.3.2 Estudio por porosimetría de mercurio del espacio poroso de los litotipos seleccionados

6.3.2.1 Introducción

Este método permite estudiar el sistema poroso mediante una inyección isotérmica e isobárica de mercurio, basada en la elevada tensión superficial de éste ($Hg = 480 \text{ dinas/cm}^2$ a $t = 25 \text{ C}^\circ$), lo que impide que el líquido moje (ángulo de menisco del líquido $Hg = 140^\circ$). Para que penetre en un material poroso debe ser forzado mediante presión.

Esta técnica fue inicialmente diseñada por Purcell (1949). Al demostrarse que esta penetración no era destructiva (Burdine 1950 y Dumore, Schols 1974) se favoreció un rápido desarrollo tecnológico.

La condición de penetración del mercurio en un capilar o poro cilíndrico, es que la presión de inyección sea igual a la presión capilar. En estas condiciones de inyección, mediante una función matemática sencilla se relaciona las sucesivas presiones ejercidas en cada momento del ensayo con el radio de poro penetrado y el volumen de mercurio inyectado, lo cual permite determinar la distribución del rango de acceso al poro.

Si asimilamos la red porosa estudiada con una red de poros cilíndricos, la ecuación inicial de Laplace (que relaciona la presión capilar con la tensión superficial, el ángulo del menisco del líquido y el radio de poro) se simplifica notablemente.

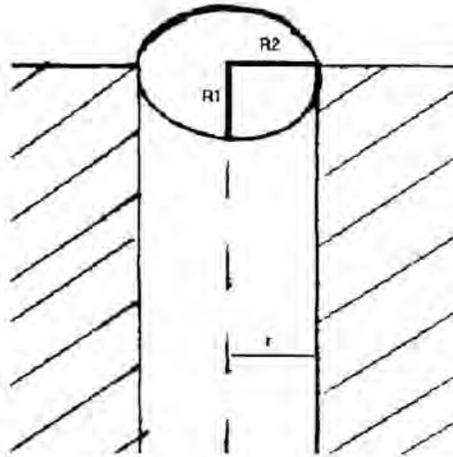


Fig. 6.1: Relaciones entre una gota de Hg(R_2 , R_1) y un capilar cilíndrico de radio r

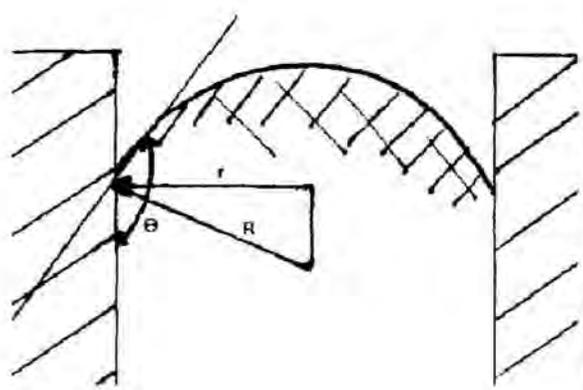


Fig. 6.2: Relaciones entre el ángulo de menisco (Θ) y los radios de la gota de Hg(R) y del capilar (r)

En la fig. 6.1 se muestra un tubo capilar cilíndrico de radio r , y una gota de mercurio definida por sus radios mayor (R_2) y menor (R_1). La ecuación Young-Laplace, toma en este caso la forma:

$$\Delta P = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

Donde:

- ΔP : es la diferencia de presión entre las caras cóncava y convexa de la superficie fluida, y se denomina la presión capilar, y se expresa en N/m^2 en el sistema internacional.

- σ : es la tensión superficial, que no es una presión sino una fuerza por unidad de longitud, se expresa en N/m, según el sistema internacional.

Si los radios fuesen iguales, se trataría de una superficie esférica y la ecuación anterior sería:

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{R}$$

Si además, se considera el ángulo del menisco, Θ , según la fig. 6.2, tenemos:

$$R = \frac{r}{\cos \Theta}$$

Con lo cual sustituyendo el valor de r , ΔP vendría expresado como:

$$\Delta P = \frac{2\sigma \cos \Theta}{r}$$

En el caso del mercurio, a una temperatura de inyección entre 20 y 25 C°, σ tiene un valor entorno a las 480 N/m según Ritter y Drake (1949) para casi todos los materiales y un Θ entorno a 140° (puede oscilar entre 135 y 150°, según el material), con lo cual la expresión anterior se simplifica aún más:

$$\Delta P = - 736/r \text{ N/m}^2 \text{ (Pa)}$$

En la practica operativa, expresado esta cantidad en dinas/cm² y dado que el diámetro de los poros es del orden de micras, la presión capilar vale, aproximadamente:

$$\Delta P = \frac{7,5}{r} \text{ dinas/cm}^2$$

6.3.2.2 Método operativo

El proceso seguido se basa en la norma I. 5 Rilem 25 PEM.

Se extrae mediante una perforadora dotada con una pequeña corona muestras cilíndricas de 11 mm. de diámetro y 22 mm. de altura.

La muestra se seca en estufa durante 24 horas a una temperatura de 60°C, posteriormente se enfría en desecador durante 2 h, se rotula y se pesa (P_2).

Se ha utilizado el sistema de macro y microporosímetro Carlo Erba serie 200 y el nuevo porosímetro 2000WS de la misma casa comercial, pertenecientes al Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo.

El macroporosímetro de la serie 200 mide un rango de poro comprendido entre 62.5 y 6.7 μm , llegando a un vacío parcial de 100 mmHg. Este aparato, mediante un doble circuito de desgasificación, permite medir los macroporos, haciendo una regulación manual del retroceso, desde la condiciones de máximo vacío parcial hasta las condiciones de presión atmosférica, en saltos discontinuos en los que se obtiene una lectura de la altura del menisco del capilar de mercurio.

El microporosímetro de la misma serie 200 mide un rango de porosidad comprendido entre 6.7 a 0.0037 μm , mediante una inyección de mercurio bajo presión, que partiendo de la atmosférica alcanza los 200 MPa (2000 Kg/m²).

La muestra desecada y pesada (P_2), se introduce en el dilatómetro de vidrio del macroporosímetro, y se realiza el vacío parcial ($P = 10^{-2}$ mmHg), dejándolo en esta situación durante unas 12 o 15 h para que se desgasifique.

Posteriormente se pesa la muestra con el dilatómetro lleno de mercurio (P_3) y se introduce en el autoclave del microporosímetro.

La muestra una vez realizado el ensayo, se extrae del dilatómetro y se pesa (P_4)

Se anota en las mediciones del ensayo el peso del dilatómetro de vidrio vacío (P_1).

Los datos obtenidos se introducen los datos obtenidos en una hoja de cálculo. Dichos cálculos incluyen las correcciones debidas a la compresibilidad del mercurio, por comparación con un ensayo en blanco (sin muestra o con una probeta de muy escasa porosidad) y los efectos de la altura del capilar de mercurio en los rangos de porosidad iniciales del ensayo debidos a la baja presión aplicada, (Pellerin, 1980; Alonso, 1986).

Los datos que se introducen son:

- Las alturas de menisco del capilar de todas las inyecciones de mercurio realizadas.
- Las cuatro pesadas P_1 , P_2 , P_3 y P_4 .

Los parámetros obtenidos son:

- El volumen total (V_t) y las densidades de la muestra:
 - Densidad de la masa impermeable (d_i , Hg)
 - Densidad aparente. (d , ap)
- La porosidad accesible al mercurio. (no)
- La porosidad abierta (n. ab) y atrapante (n. at)
- La macro y microporosidad (n. macro, n. micro)

Los volúmenes y densidades se obtienen mediante el método picnométrico similar al del agua explicado en el apartado 6. 2. 2, pero en este caso con mercurio como fluido hidroestático.

La porosidad accesible (no) es el volumen de porosidad equivalente al volumen total de mercurio penetrado (V_n , Hg), obtenido tras la primera inyección y suele expresarse como un tanto por ciento del volumen total de la muestra (V_t).

$$no\% = \frac{V_n(Hg)}{V_t} * 100$$

- V_{ab} : es el volumen de la porosidad libre o abierta y corresponde al volumen de mercurio penetrado en la segunda inyección.

- V_{at} : es el volumen correspondiente a la porosidad atrapante y se obtiene por diferencia de las dos anteriores: $V_{at} = V_v - V_{ab}$

La Macroporosidad es el volumen de porosidad que corresponde a un radio de acceso superior a $7.5\mu\text{m}$.

La Microporosidad: es el volumen de porosidad correspondiente a un radio de acceso inferior a $7.5\mu\text{m}$.

Ambos parámetros se obtienen a partir de la primera inyección, estableciéndose en la curva acumulativa o de distribución de poros, la separación entre micro y macroporosidad como se vera seguidamente.

6.3.2.3 Gráficas

La distribución de los rangos de radio de acceso al poro pueden representarse mediante dos tipos de gráficas (fig. 6.3). La primera es una curva acumulativa del volumen de mercurio introducido en la muestra hacia valores crecientes de tamaño de poro que, lógicamente depende de la presión aplicada y ésta a su vez, del radio de acceso al poro. La segunda es un histograma que representa los porcentajes de volumen de mercurio, igualmente introducidos en la muestra en función de los tamaños característicos del acceso a los poros.

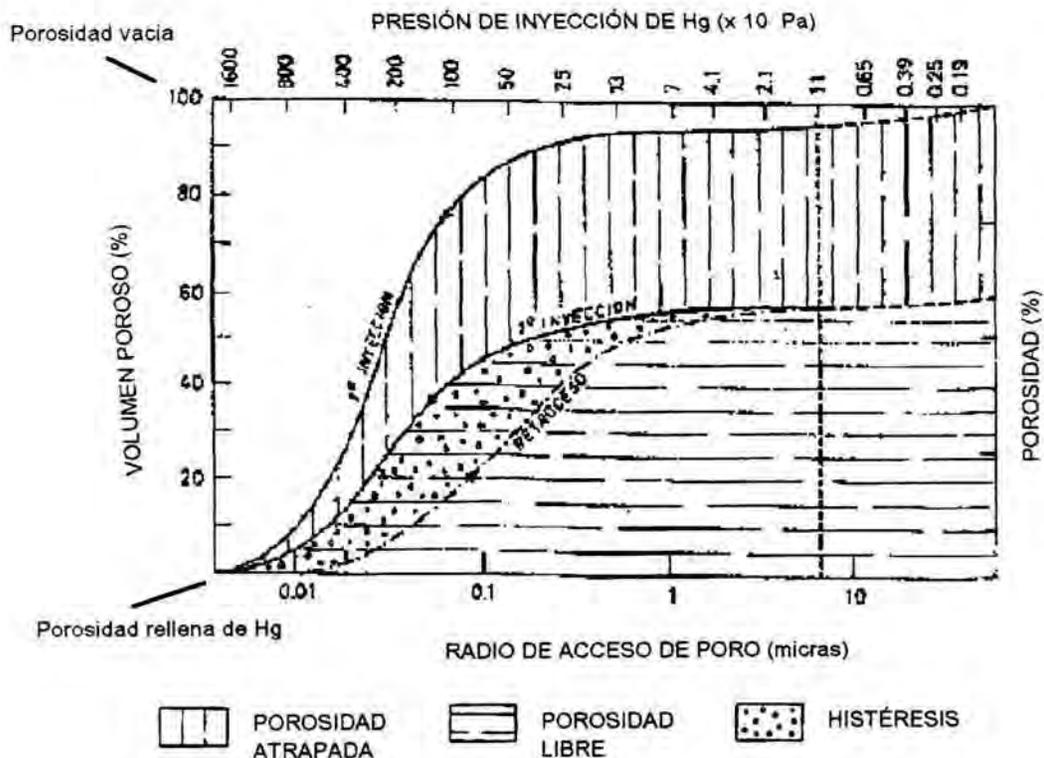


Fig. 6.3: Curva porosimétrica genérica: volumen poroso penetrado en función de la presión de inyección ejercida sobre el Hg. Distribución de la porosidad en función del tamaño de acceso de poro (Alonso, 1986)

En ambas gráficas, el volumen de mercurio se representa en ordenadas y se ha procedido siguiendo las recomendaciones de Bousquie (1978) y Alonso (1986).

Si en el eje de ordenadas se representa los porcentajes acumulados de volumen de mercurio que ha penetrado en la muestra, estos serán equivalentes al volumen acumulado de poros. Por otra parte si la presión se relaciona con el radio del poro mediante la expresión: $\Delta P = r / 7.5$, al disponer en abscisas las presiones tendremos también el radio de acceso al poro que corresponde a su volumen en ordenadas. Teniendo en cuenta, lógicamente que a menor radio de acceso será necesario aumentar la presión para forzar la entrada de mercurio.

De esta manera puede construirse tres curvas que representan cada una de ellas, la primera inyección de mercurio bajo presión, el retroceso del mercurio con descenso controlado de la presión y la segunda inyección que reproduce las condiciones de la primera.

Estas curvas tienen en general recorridos diferentes, dadas sus distribuciones, pudiéndose ver que en cada ordenada coexisten tres valores diferentes de volumen acumulado para una misma presión de inyección, esto es para un mismo tamaño de radio de acceso al poro. Esta situación se debe a que en el retroceso, parte del mercurio no sale de los poros (porosidad atrapante), con lo cual la cantidad que penetra en la segunda inyección es menor. Consecuentemente, la forma, la pendiente y la separación de las tres curvas, constituyen datos importantes para una correcta interpretación, especialmente del tipo y grado de comunicación entre poros, por lo que debe considerarse a estas curvas un verdadero espectro porosimétrico de las muestras.

En los histogramas se representa el porcentaje del volumen de poros en función de cada clase o intervalo de rango del diámetro de acceso al poro, con lo cual se pone en evidencia la gama de tamaños más representativos.

Pero la interpretación de los histogramas debe realizarse correlacionándose sus resultados con las tipologías y tamaños de poro y sus accesos, observados tanto en microscopía óptica como en microscopía electrónica de barrido, pues la técnica tiene unas limitaciones instrumentales estudiadas por Pellerin (1980), cuyos puntos principales son los siguientes:

- Se mide un radio de acceso que en la realidad puede corresponder a diferentes tamaños y formas de poro, dado que el tamaño de acceso no tiene porque coincidir con el radio interno del poro.
- Un poro puede tener varios accesos, pero con esta técnica de inyección se mide solo el de mayor radio de acceso, dado el orden de penetración de mayor a menor que produce el aumento gradual de la presión de inyección
- La comunicación entre varios poros viene condicionada por el de menor radio de acceso en muchos casos, tal y como estudió Pellerin (1980), en la investigación de las causas de la histéresis geométrica.

6.3.2.4 Histéresis y retroceso de la inyección de mercurio

Como ya hemos comentado, en la porosimetría de mercurio se observa, en una misma muestra, una histéresis que se traduce en una diferencia del contenido de mercurio inyectado, para una misma presión y rango de poro, tanto entre la primera inyección y el retroceso, como entre este y la segunda inyección. Esto da lugar a las diferencias de trazado ya comentadas entre las tres curvas, que son debidas a dos procesos distintos (fig. 6.3).

El primero consiste en una retención del mercurio en la red porosa durante el retroceso, que retarda su extrusión hacia presiones más bajas que las de inyección. La segunda causa es que, durante la segunda inyección, el mercurio no puede penetrar en los poros que aun permanecen llenos y no se vaciaron durante el retroceso, haciéndolo solamente en los poros vacíos.

Pero estos dos fenómenos se deben, a su vez, a la combinación, en diverso grado y según la naturaleza y textura de la muestra, de otros dos factores:

- La forma de comunicación entre poros de distinto volumen y diferente radio de acceso, que se denomina histéresis geométrica.
La investigación realizada por Pellerin (1980) sobre estos factores de carácter más geométrico o textural, no solo demuestra su incidencia en los espectros y curvas porosimétricas, sino que además explica algunos casos en que es posible deducir los tipos de comunicación entre poros, a partir del trazado de la curva de retroceso, (Arnould, Pellerin y otros 1980).
- La histéresis verdadera debida al cambio en el ángulo de contacto del mercurio durante la extrusión (Lowell, 1980). Generalmente se admite que este ángulo en la intrusión, esta entre 130° a 140°, pero en la extrusión se supera este valor, por razones termodinámicas complejas.

Ambas formas de histéresis se pueden diferenciar por el recorrido de la segunda curva de inyección. La superficie comprendida entre las dos curvas de inyección corresponde al volumen de la histéresis geométrica. En cambio el área comprendida entre la segunda inyección y el retroceso de la primera corresponde a la histéresis verdadera.

Resultados de los ensayos porosimétricos se muestran en la siguiente tabla:

Litotipo	Muestra	Porosidad					Radio de acceso.
		Total (no%)	Macro (%)	Micro (%)	n. ab (%)	n. at (%)	Moda (µm)
"MEDOL"	CMX	23.95	8.92	15.03	11.06	12.8	40/1
	CMY 1.1*	15.8	0.3	15.45	4.5	11.2	2/0,2
"RODA DE BERA"	textura LCRB2.2	15.32	0.59	14.74	5.23	10.09	7
	textura LCRB1.1*	24.41	0.15	24.25	8.34	16.07	1
"ELS MUNTS"	MuntsVII-Y	34.89	27.44	7.45	22.66	12.23	19
	EMVII-Y*	38.74	28.18	10.55	2.97	35.77	12
"LES COVAS DE LA PEDRERA"	CCO3LA	46.01	7.08	38.93	19.85	26.16	7
"LES COVAS DEL LLORITO"	CL2.5A2	21.04	0.23	20.81	2.68	18.36	1/0,5
	CL3Y-A*	26.4	2.31	24.08	2.83	23.5	2

- no%: porosidad accesible al mercurio, expresada en tanto por ciento, (porosidad total determinada con mercurio).
- macro%: fracción porcentual de porosidad con un radio de acceso superior a 7.5 μm .
- micro%: fracción porcentual de porosidad con un radio de acceso inferior a 7.5 micras.
- n. ab%: fracción porcentual de porosidad libre o efectiva.
- n. at%: fracción porcentual de porosidad atrapante.
- Moda (μm): clases de radio de acceso de poro más frecuentes en el histograma.

Nota:

- En las muestras marcadas por un asterisco (*) los valores de la porosidad abierta y atrapada son aproximados pues se han deducido de la curva de retroceso sin segunda inyección.

TABLA 6.III: Parámetros porosimétricos (porosímetro CARLO ERBA serie 2000 y 2000 WS)

6.3.2.5 Resultados e interpretación

(tabla 6.III y An-6/1 a An-6/25)

Debe considerarse que los materiales sedimentarios carbonatados que se han estudiado presentan, a veces una gran variabilidad en sus características texturales, incluso dentro de la misma cantera.

En el anexo An-6/1.F-1 y F-2 se expone un esquema de los gráficos correspondientes a los ensayos realizados por porosimetría de mercurio.

Los valores obtenidos pueden considerarse, en conjunto bastante representativos del material extraído, pero no de una manera absoluta o exacta, pues la dispersión de valores de porosidad que puede darse es a veces muy amplia; por eso se ha intentado caracterizar los litotipos más significativos, lo cual exponemos a continuación.

Cantera "El Médol"

(An-6/2 a An-6/6)

De las dos variedades texturales estudiadas de esta cantera, una muestra es de baja porosidad (no = 15%) y otra de media porosidad (no = 24%), y presentan una distribución polimodal, con predominio de la microporosidad. La porosidad atrapante es mayor en la variedad de baja porosidad.

Se han de tener en cuenta las siguientes características texturales de este litotipo:

- Porosidad móldica predominante con algo de tipo "Vug"

- Cemento "drusy" relleno parcialmente y de forma desigual los poros móldicos.
- Bioclastos y matriz micrítica abundante

Estas características explican el elevado porcentaje de porosidad y su carácter polimodal, ya que la porosidad móldica es inicialmente heterométrica, pero esta característica se acentúa por la distribución tan irregular del cemento "drusy".

Con microscopio óptico se observa que predomina la macroporosidad; en cambio en el espectro porosimétrico es al revés. Consideramos que esta contradicción, unida a la abundancia de la porosidad atrapante, se debe también al predominio de la porosidad móldica y a la distribución del cemento ya comentada, que produce que muchos macroporos estén comunicados por pasos estrechos, en forma de cuello de botella (Peter, Ragot y Sima, 1970), lo que produce que el radio de acceso sea muy inferior al radio del interior del poro.

En la variedad de baja porosidad la moda es también de menor radio de acceso; esto se debe a la existencia de un mayor porcentaje de matriz micrítica y una consiguiente reducción del porcentaje de porosidad móldica.

Canteras de "Roda de Berà"

(An-6/7 a An-6/11)

Se han estudiado los dos tipos de texturas que se encuentran en las dos canteras CRB2 y CRB1 (ver capítulo 3), 1 a textura LCRB2. 2 (no = 15, 32%) y la LCRB1. 1 (no = 24, 1%). En ambos casos predomina la microporosidad, así como la porosidad atrapante, pero LCRB2. 2 tiene una moda del rango de acceso al poro (7 μm) mayor que LCRB1. 1 (1-2 μm).

Ambas texturas presentan unas características petrográficas parecidas y se diferencian, fundamentalmente en el grado de cementación. Tienen un carácter marcadamente unimodal debido a la coincidencia de tres factores: pequeño tamaño de grano, que es más o menos uniforme y el predominio de la porosidad interparticular.

La presencia de abundante microesparita como cemento en la textura LCRB2. 2, ha dado lugar a un aumento del tamaño de grano y por tanto a un incremento del tamaño de poro interparticular (7 μm) respecto a la LCRB1. 1 (1-2 μm), donde predomina el componente de tipo micrítico. Por otra parte, esta presencia de microesparita ha hecho que se reduzca la porosidad de la textura LCRB2 con respecto a la LCRB1. 1.

Cantera "Els Munts"

(An-6/12 a An-6/16)

Destaca su elevada porosidad (no = 34-38%), y el predominio de la macroporosidad, que contrasta con el caso anterior, ya que de "visu" no parece que estos dos litotipos sean tan distintos.

El histograma presenta una distribución con una tendencia unimodal y macroporosa puesto que la mayor parte de la porosidad se sitúa entre 19 y 27 micras aproximadamente.

La textura de esta roca carbonatada (packstone-graistone), con escasa matriz y cemento, esta claramente controlada por la abundancia de fósiles de pequeño tamaño, casi exclusivamente de foraminíferos. El predominio de un componente produce como ya comentamos en el caso de la cantera anterior una uniformidad tanto en el tamaño de grano como en el tamaño de poro, si bien este último es de marcado carácter interparticular.

La porosidad tipo "vug" (que se centra especialmente sobre la matriz) y la falta de cemento, incrementan estas tendencias (macroporosidad y similitud de tamaño entre poros) de la red de huecos.

"Les Coves de la Pedrera"

(An-6/17 a An-6/18)

Es el tipo de roca que presenta el mayor porcentaje de porosidad (no = 46.01) de los litotipos estudiados. También es notable el elevado porcentaje de la microporosidad y su marcado carácter unimodal, similar al observado la cantera de "Roda de Berà".

La textura esta dominada por una fabrica hipidiotípica de dolomicroesparita (tamaño de grano próximo a las 10 μm), ya descrita en el capítulo 4, donde predomina la porosidad interparticular o intercrystalina. Además se observa porosidad de tipo "vug". Esta textura provoca un elevado porcentaje de porosidad de carácter microporoso y unimodal. Una textura de tamaño uniforme de microdolomita subeuhédrica tiene una red porosa con geometría similar a la que presenta la microesparita subeuhédrica de grano igualmente uniforme. Si en ambas predomina el mismo tipo de porosidad interparticular, esto explica la similitud de las características porosimétricas entre "Les Coves de la Pedrera" y la cantera de "Roda de Berà" (especialmente la cantera CRB2, donde estas características están más desarrolladas).

Aunque este tipo de textura dolomítica no se corresponde exactamente con ninguna de las estudiadas por Wardlaw (1976) mediante porosimetría de mercurio, hay significativas referencias.

Explica, por ejemplo, la razón por la cual los mosaicos dolomíticos discontinuos, de cristales euhédricos o subeuhédricos, presentan una abundante porosidad interparticular con predominio de los poros polieudrales.

En nuestro caso esta fina fábrica hipidiotípica se acerca bastante al modelo descrito por Wardlaw (1976), y tiene bastantes poros interpartícula del tipo tetraedral de pequeño tamaño y mal comunicados, que representan las clases de menor radio de acceso del espectro porosimétrico (An-6/24).

"Les Coves del Llorito"

(An-6/19 a An-6/23)

Se ha analizado la porosidad de las dos principales tipos de textura de esta cantera:

- Texturas sin fábrica idiotípicas de dolomita, o con escaso contenido (texturas tipo CLZ. 1 y CLZ. 5), que se corresponden con la muestra denominada CL2. 5A2 en porosimetría
- Texturas con predominio de las fábricas dolomíticas y especialmente la idiotípica (Texturas tipo CLZ. 2 y CLZ. 7), que se corresponden con la muestra CL3Y-A de porosimetría. (véase Capítulo 4. 1)

Los resultados nos indican que ambos tipos de texturas tienen una porosidad media (porosidad entre 21 y 26 %) con predominio de la microporosidad y la porosidad atrapante.

El pequeño tamaño de acceso al poro, que tienen en general ambas texturas, se debe a la abundancia de una fina matriz limo-arcillosa, ya que se trata de una calcisiltita

Pero si analizamos con detalle los resultados observamos que las texturas con fábrica idiotípica (muestra CL3Y-A) tiene una mayor porosidad total (no = 26%). La macroporosidad (no macro = 2.31%) representa el 8, 8% de la total. Además la moda de la distribución del rango de acceso ($r = 2 \mu\text{m}$) es en este tipo de texturas algo superior a las texturas con escaso porcentaje de fábrica idiotípica

Estas diferencias se deben a que la presencia de los cristales euhédricos de la fábrica idiotípica da lugar a un aumento del tamaño medio de partícula, y a un aumento del tamaño de poro interparticular. Debido al carácter heterométrico de los cristales y a su irregular distribución, hay a su vez un aumento de la porosidad total, lo cual no se traduce en una mejor comunicación entre poros y por tanto en un incremento de la porosidad abierta. Según se ha observado en microscopía electrónica de barrido, la explicación está en el aumento de poros tipo tetraedral propios de los mosaicos dolomíticos y a una mayor frecuencia de los accesos en forma de cuello de botella en estas de texturas con fábricas idiotípicas (An-6/24. F-1 y F-2 y An-6/25).

6.4 PROPIEDADES HÍDRICAS

6.4.1 Metodología y normativa

Buscamos establecer una relación entre la propiedades hídricas de la roca y los procesos de alteración observados en los edificios históricos constituidos por estos materiales, teniendo en cuenta que estas propiedades hídricas o comportamiento frente al agua están controladas por la textura y en consecuencia por la red porosa de la misma roca.

Los ensayos realizados se han centrado en determinar, la capacidad de absorción capilar, la dinámica de la desorción y la expansividad.

Es difícil caracterizar este tipo de carbonatos debido a que presentan una gran variación textural a lo largo de la sucesión estratigráfica, lo cual genera una dispersión de valores en los ensayos, y

dificulta establecer las correlaciones necesarias entre estos datos empíricos y los que proporciona el estudio petrográfico de los litotipos (véase capítulo 3).

No se ha optado por la fácil solución de establecer nuevos litotipos sino, por el contrario, indicar en cada caso las variaciones texturales y petrofísicas que se advierten.

El objetivo de esta marcha de ensayos es dar valores de referencia para los materiales empleados en los edificios históricos, independientemente del nivel de cantera donde se hayan extraído.

Los ensayos realizados son:

- Succión capilar
- Absorción de agua en vacío
- Desorción libre de agua
- Absorción libre de agua.
- Hinchamiento.

Estos ensayos se hacen siguiendo fundamentalmente la normativa internacional conocida (RILEM, CNR-ICR, ASTM y DIN), introduciendo algunas de las modificaciones y recomendaciones propuestas por el equipo de investigación del Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo (Esbert, Ordaz, Marcos, Alonso. 1985. 1986. 1987. 1991).

Para estas pruebas de laboratorio se han utilizado probetas cúbicas de 5 cm. de arista y algunas de tipo cilíndrico $d = 3.5$ cm. y $L = 6.5$ cm. Se ha utilizado un mínimo de tres probetas por litotipo en cada ensayo.

Ensayos: Características y parámetros obtenidos

A- Succión Capilar

Este ensayo se ha realizado según la norma II. 6 de RILEM de la Comisión 25 PEM (1980). Los parámetros obtenidos tienen un claro objetivo para conocer el comportamiento dinámico de la muestra frente al agua. Se mide el aumento de peso que experimenta una probeta por unidad de superficie, como consecuencia de la cantidad de agua que absorbe por capilaridad en un determinado intervalo de tiempo.

Coefficiente de absorción capilar, viene expresado por:

$$CAC = \frac{\Delta M}{S \cdot t} \left[Kg * m^{-2} * h^{-1/2} \right]$$

Donde:

- $\Delta M = M_t - M_0$: incremento de peso en el tramo rectilíneo de la gráfica, en Kg.

- M_0 : masa en seco inicial, Kg.
- M_t : masa de la probeta para un tiempo t (i) del ensayo, en Kg.
- S : superficie de la cara sobre la que se realiza la succión. en m^2
- t : tiempo a lo largo del cual se ha obtenido el ΔM , en horas. Comprendido en el tramo rectilíneo de la gráfica
- CAC: corresponde a la pendiente del primer tramo rectilíneo de la curva, ya que este tramo rápido representa, según se ha demostrado experimentalmente, la absorción capilar de agua por la red porosa.

B- Absorción de agua en vacío

Se ha realizado el ensayo según las recomendaciones I. 1 y I. 2 de la RILEM, comisión 25 PEM (1980), con algunas de las modificaciones realizadas por J. Alonso (1986).

Tras una desgasificación en seco al vacío y una inmersión en agua, manteniendo dicho vacío (presión parcial entre 0.2 y 0.4 mbar) se calculan los parámetros a partir de las tres pesadas siguientes:

- M_1 =Masa inicial en seco (M_0)
- M_2 =Masa saturada sumergida (pesada hidrostática, M_h)
- M_3 =Masa saturada pesada al aire (M_s).

Los parámetros que se obtienen son los siguientes:

$$no(\%) = \frac{M_s - M_0}{M_s - M_h} * 100$$

- no%: porosidad accesible (efectiva), en tanto por ciento

$$d.ap = \frac{M_0}{M_s - M_h} = \frac{\text{masa de la roca seca}}{\text{volumen total}}$$

- d. ap: densidad aparente

$$d(i, H_2O) = \frac{M_0}{M_s - M_h}$$

ya que representa:

$$\frac{\text{masa de la roca}}{\text{volumen impermeable}}$$

- $d(i, H_2O)$: densidad impermeable

- volumen impermeable = volumen partículas solidas + volumen poros cerrados

$$W_s(\%) = \frac{M_h - M_o}{M_o} * 100$$

- W_s : es el contenido de agua en saturación, expresado en tanto por ciento

Con los datos obtenidos en este ensayo y la densidad mineral ya determinada, se puede calcular la porosidad cerrada y total:

- Se obtiene el volumen de la fase sólida mineral (V_m) a partir de la masa de roca seca (M_o) y la densidad mineral (dm).
Esta densidad mineral se determina de manera muy precisa por el método picnométrico ya explicado, y se comprueba el grado de coincidencia con el valor de la densidad mineral teórica, obtenido a partir de la composición porcentual (en difracción de rayos x).

$$V_m = \frac{M_o}{dm}$$

- Se calcula el volumen impermeable a partir de la diferencia entre masa seca (M_o) y la masa saturada sumergida (M_h); ya que representa el volumen aislado no accesible (porosidad cerrada) más el volumen de partículas solidas.

$$V_i = M_o - M_h$$

- El volumen de poros no accesible a los fluidos (V_c), se obtiene pues al restar del volumen impermeable (V_i) el volumen de la masa mineral (V_m):

$$V_c = n.c = V_i - V_m$$

Entonces la porosidad cerrada se obtiene según la siguiente expresión:

$$nc = \frac{V_i - V_m}{V_t} = \frac{(M_o - M_h) - M_o/dm}{M_s - M_h}$$

- Finalmente la porosidad total o absoluta se obtiene por la suma de la porosidad cerrada ($n.c$) y la porosidad accesible ($n.o$).

$$n = nc + no$$

Los resultados pueden verse en la tabla 6.IV

C- Desorción libre de agua

Este tipo de ensayo se ha realizado, basándose en las normas CNR-ICR, Normal F1 86/52 y II. 5.

Debido a la dificultad de mantener unas condiciones constantes de humedad-temperatura, que condicionan el sensible proceso de evaporación, se diseñó un dispositivo con una cúpula de plástico transparente. En su interior se efectuaba el ensayo de desorción, regulando la temperatura ($T = 25$) de una resistencia calefactora con un termostato.

De forma similar al proceso de absorción libre se controla el peso (en este caso pérdida) a lo largo del tiempo, y se calculan los siguientes parámetros.

Contenido final en agua: WD

$$WD = \frac{M_i - M_o}{M_o}$$

- M_i : masa de la probeta en cada tiempo de medida i
- M_o : masa inicial

Grado de saturación final: Sr. D

$$Sr.D = \frac{M_i - M_o}{M_s - M_o} * 100$$

- M_s : masa en saturación (absorción en vacío)

D- Absorción libre de agua

Se ha realizado el ensayo siguiendo la norma Normal 7/81 (CNR-ICR), controlando la ganancia en peso (M_i) de las probetas embebidas en agua, durante el tiempo t . El ensayo tiene una duración de 12 días. Aunque a los 2 o 3 días la mayor parte de los litotipos estudiados ya alcanza valores próximos a su saturación.

Se calculan: el grado de saturación que hemos obtenido, (SrA), y el contenido de agua absorbido respecto al tiempo (W)

Contenido en agua: WA

$$WA = \frac{M_i - M_o}{M_o}$$

- M_i : masa de la probeta en cada tiempo i
- M_o : masa inicial

- Grado de saturación: SrA

$$Sr.A = \frac{M_i - M_o}{M_s - M_o} * 100$$

- M_s : masa en saturación (absorción en vacío)

E- Hinchamiento

La recomendación II. 7 de RILEM, comisión 25 PEM (1986) se refiere al hinchamiento lineal. Por eso se ha diseñado una célula de hinchamiento de acuerdo con la descripción de las normas ISRM 1972, de hinchamiento triaxial, y siguiendo las recomendaciones de J. Alonso (1986).

Se ha realizado el ensayo por inmersión completa. La medición de la expansión hídrica se realiza mediante extensómetros de relojería, con la sensibilidad de 0.5 μm . en disposición ortogonal, según las tres direcciones del espacio. Se realiza mediciones según intervalos de 5, 10, 15 y 30 minutos y 1, 2, 3, 6 y 24 h.

Por su especial importancia se señalan en la tabla los valores a las 6 y 24 h (Ducan, N. 1969), ya que discriminan las rocas y materiales con hinchamiento significativo.

El parámetro obtenido es:

- ϵ (%): Coeficiente de expansión lineal, según los tres ejes del espacio (ϵ (%) x, ϵ (%) y, ϵ (%) z)

$$\epsilon(\%) = \frac{\Delta L}{L_o} * 100$$

- ΔL : incremento de longitud
- L_o : longitud inicial

6.4.2 Tratamiento de datos

Los valores expuestos en las tablas de propiedades hídricas (6.IV y 6.V) han sido analizados con métodos estadísticos sencillos, (obtención de media, mediana, moda y desviación estándar) este estudio se ha centrado en la distribución de valores de los parámetros petrofísicos, especialmente los de carácter hídrico, que tienen un mayor control por parte de la red porosa.

Un litotipo que se define como un conjunto de estratos con parecidas características petrográficas y mineralógicas, puede tener diversos tipos de texturas petrológicas, por causas sedimentarias o diagenéticas, lo que genera distintos modelos de red porosa y por tanto cada

textura tendrá parámetros petrofísicos diferenciados. Esta situación provoca que los resultados de los ensayos de laboratorio tengan una gran dispersión de valores.

Cuando se realiza dicho estudio estadístico se observa que en muchos litotipos existe una distribución polimodal para la mayoría de los parámetros, especialmente los que definen el comportamiento frente al agua, por lo tanto se ha escogido la moda como parámetro representativo de una determinada propiedad hídrica y no la media, pues este último parámetro estadístico, es en estos casos una pura entelequia matemática, que no corresponde a ninguna realidad geológica y textural.

La media en efecto puede ser muy útil a nivel práctico y en ciertas aplicaciones técnicas, pero no es representativa en estos casos, incluso puede ser más aceptable en litotipos de características texturales muy uniformes (tendencia unimodal), pero no en este caso.

Así pues en rocas carbonatadas, especialmente las poco cementadas y de diagénesis polifásica pueden darse para un mismo litotipo varias texturas petrológicas, la moda en estos casos representa la textura más frecuente y por tanto es una realidad geológica.

La necesidad de que los parámetros petrofísicos y especialmente los de carácter hídrico representen una realidad, esto es un material de características texturales definidas, se justifica porque la aplicación de la petrofísica, tanto en la diagnosis como en el control experimental de los productos de tratamiento (consolidantes e hidrofugantes) necesita conocer la textura real, tanto para determinar los procesos de deterioro, como para evaluar la bondad de los comportamientos frente al agua de la aplicación de productos químicos sobre estas texturas reales.

6.4.3 Interpretación petrofísica de los ensayos sobre propiedades hídricas

Existen varios factores texturales y composicionales, que condicionan el comportamiento de una roca frente al agua. El tamaño de grano, la mineralogía y distribución de los cementos, la proporción de matriz (especialmente las micríticas en carbonatos) y el porcentaje y composición de la fracción arcillosa. A su vez, esto se traduce en porosidad (porcentaje total, proporción entre macro y microporos, distribución del rango de acceso al poro, morfología de la red porosa y tipos de porosidad textural). Todas estas características, en interacción con el agua, determina la permeabilidad, la capacidad de disolución o formación de sales, en algunos casos el hinchamiento y, en suma, la resistencia y la alterabilidad.

El grado de dependencia entre distintos factores puede dar lugar a una compleja interrelación. Nuestro estudio persigue conocer y razonar adecuadamente el comportamiento hídrico observados en cada una de las rocas de cantera (tablas 6.IV y 6.V).

LITOTIPO		no%	nc%	Ws%	dap	d(i,H ₂ O)
"EL MEDOL"	valor mín.	11	0.51	4.8	1714	2529
	valor máx.	31.5	4.97	18.7	2337	2719
	moda A	[14;17]	[0,5;1,5]	[4;8]	[1800;1900]	[2650;2750]
	moda B	[26;29]	[0,5;1,5]	[16;20]	[2000;2100]	

LITOTIPO		no%	nc%	Ws%	dap	d(i,H ₂ O)
	moda C	[32;35]	[4,5;5]		[2300;2400]	
"R.de BERÀ"	valor mín.	14.6	0.31	2.48	1592	2689
	valor máx.	41	4.59	25.7	2553	2719
	moda A	[10;15]	[0;0,5]	[15,20]	[1700;1800]	[2700;2750]
	moda B	[30;40]	[0;0,5]		[2200;2300]	
"MUNTS"	valor mín.	36.4	0.04	21	1524	2594
	valor máx.	41.2	2.49	27	1681	2707
	moda A	[38;42]	[0;0,5]	[24;26]	[1550;1650]	[2650;2700]
	moda B		[1,5;2]			
"LLORITO"	valor mín.	18.7	0.7	8.5	1921	2625
	valor máx.	28.8	1.8	14.6	2180	2704
	moda A	[22;26]	[0,5;2]	[10;12]	[2000;2050]	[2650;2750]
"COVES PEDRERA"	valor mín.	39.8	0.2	24.5	1276	2700
	valor máx.	54	2.52	42.5	1624	2853
	moda A	[39;42]	[0;1]	[20;25]	[1250;1350]	[2725;2775]
	moda B	[51;54]	[1,5;2]	[40;45]	[1600;1700]	

- no%: Porosidad accesible al agua
- no.c%: Porosidad cerrada
- Ws%: Contenido en agua en saturación
- dap: Densidad aparente
- d(i,H₂O): Densidad de la masa impermeable

TABLA 6.IV: Parámetros petrofísicos obtenidos por absorción de agua al vacío

LITOTIPO		CAC	WD	SrD	WA	SrA
"EL MEDOL"	valor mín.	0.4	0.01	0.04	2.8	39.85
	valor máx.	3.5	0.03	3.62	12.27	66.9
	moda A	[0,5;1]		[0,01;01]		[31;40]
	moda B	[1,5;2]		[0,2;1]		[41;50]
	moda C	[32;35]		[2;10]		[61;70]
"R.de BERÀ"	valor mín.	8.23	0.01	0.02	14.2	79.6
	valor máx.	30	2.2	12.06	20	81.8

LITOTIPO		CAC	WD	SrD	WA	SrA
	moda A	[1;10]		[0,01;0,1]		[70;80]
	moda B	[21;30]		[1;10]		[80;90]
"MUNTS"	valor mín.	22	0.06	0.08	20.2	79.73
	valor máx.	36	0.2	0.2	20.6	80
	moda A	[21;30]		[0,01;0,1]		[70;80]
"LLORITO"	valor mín.	1	4.4	40	6.01	48.13
	valor máx.	3.91	7.2	60	10.07	76
	moda A	[1;5]		[41;50]		[41;50]
	moda B			[51;60]		[61;70]
"COVES PEDRERA"	valor mín.	36	2.4	7.9	36.8	87.3
	valor máx.	77.6	2.7	9.9	37	89.3
	moda A	[31;50]		[5;10]		[80;90]
	moda B	[60;80]				

- CAC: Coeficiente de absorción capilar
- WD: Contenido en agua al final del ensayo en desorción
- SrD: Grado de saturación respecto a la masa saturada de agua en vacío en desorción
- WA: Contenido en agua al final del ensayo de absorción libre
- SrA: Grado de saturación respecto a la masa saturada de agua en vacío en absorción libre

TABLA 6.V; Parámetros petrofísicos obtenidos por succión capilar, desorción libre y absorción libre

C. "El Mèdol"

La porosidad accesible al agua (porosidad efectiva), obtenida por absorción al vacío, tiene un amplísimo intervalo de valores (entre el 11 y el 31.5%), pero con una distribución trimodal.

Las modas se corresponden con los siguientes tipos de texturas:

- A- (no%: Moda [14; 17]) Abundante matriz micrítica, escasos bioclastos y bien cementada. Se localiza en el tramo medio de la sucesión estratigráfica, por encima del segundo nivel de discontinuidad o "hardground". Esta textura da los niveles de menor porosidad, prácticamente sin macroporos.
- B- (no%: Moda [26; 29]) Son rocas compuestas mayoritariamente por bioclastos, con una abundante porosidad móldica, pero parcialmente rellena con cemento esparítico, tipo "drusy", lo que le da un aspecto bastante cementado. Corresponde a la parte más baja de la sucesión, que fue la más explotada en época romana.

- C- (no%: Moda [32; 35]) Son estratos de similar composición al caso anterior, aunque algo más arenosos. Tienen abundante porosidad, predominantemente de carácter móldico, acompañada de un porcentaje variable de tipo "vug". La porosidad móldica esta menos cementada lo cual produce un mayor porcentaje de macroporos.

Estratigráficamente estos estratos se corresponden con dos tramos diferentes:

- El primer tramo más macroporoso se sitúa entre los dos niveles de discontinuidad o "hardground".
- El segundo tramo corresponde a la parte alta de la serie, de carácter más arenoso y con estratificación cruzada a gran escala.

La porosidad cerrada (nc) se incrementa con el aumento de la porosidad en general (ver tabla 6.IV). Este volumen cerrado es menos abundante en las texturas más micríticas y cementadas (nc%, moda [0.5; 1.5] y aumenta en las otras texturas con menos cemento y con el mayor porcentaje de macroporos, cuya porosidad accesible supera el 30% (nc%, moda [4.5; 5]. Esto indica que la heterometría y el carácter móldico de la porosidad, escasamente rellena de cemento "drusy"- incluido los macroporos-dificulta la existencia de comunicación entre ellos, cuestión que por otra parte ya indica la abundancia de porosidad atrapante en esta variedad (53% de la porosidad accesible, ver tabla 6.III).

Los valores obtenidos en el ensayo de succión capilar en todo el conjunto de la sucesión estratigráfica de esta cantera, (CAC, entre 0.4 y 3.5 Kg * m⁻² * h^{-1/2}) indican que en general tienen una débil capacidad de succión. Este comportamiento se debe a que todos los tipos de textura de la C. "Médol", independientemente de su volumen de poro, tienen una porosidad con marcado carácter heterométrico, lo que favorece su mala comunicación.

Por otra parte la variedad "c" más porosa, característica que teóricamente podría favorecer un incremento de este coeficiente de succión capilar, tiene los rangos de acceso de mayor tamaño que las otras variedades texturales "a" y "b", factor que en cambio hace disminuir la tensión capilar, lo que explica que sus valores sigan siendo relativamente bajos.

El ensayo de absorción libre de agua refleja mejor esta diferencia de volumen de poro entre las distintas texturas, pues sus valores de saturación (SrA) están en clara relación con el volumen accesible a los fluidos.

Las variedades con mayor porosidad y menos cementadas (moda C, SrD= [2; 10]), desorben peor que las otras texturas, debido a que su incremento en el porcentaje de macroporos (generalmente móldicos) no va acompañado de una mayor porosidad efectiva, por su mala comunicación y su dispersión de tamaños.

C. "Roda de Berà"

Como se ha indicado en el capítulo 3, un análisis en lámina delgada de estas series detecta la presencia de dos texturas bien diferenciadas: LCRB1. 1 Y LCRB2. 2, por su grado de cementación, cuya distribución estratigráfica ya comentada es bastante irregular tanto horizontal como verticalmente, especialmente en la cantera CRB1.

La textura LCRB1. 1 esta poco cementada y tiene por tanto un mayor porcentaje de poro (no%: Moda [30; 40]).

En cambio la textura LCRB2. 2, más cementada, es menos porosa (CRB2, no%: Moda [10; 15]).

Por eso, la textura LCRB1. 1, presenta una importante capacidad de succión capilar ($CAC = 25 \text{ Kg x m}^{-2} \text{ x h}^{-1/2}$), lo que se debe a la suma de varias características texturales:

- a- Su abundante porosidad
- b- Su pequeño radio de acceso al poro (moda=2 μm)
- c- La uniformidad de este radio de acceso, tiene un carácter marcadamente unimodal
- d- Una proporción relativamente importante de porosidad abierta o efectiva (30% del total), que indica que hay un considerable porcentaje poros bien comunicados

En cambio la textura LCRB2. 2, presenta coeficientes relativamente bajos ($CAC = 8 \text{ Kg x m}^{-2} \text{ x h}^{-1/2}$) debido a su menor porosidad y un mayor radio de acceso (moda = 7 μm).

La absorción libre confirma esta importante capacidad de captación de la textura LCRB1. 1 (moda A, $SrA=[79; 80]$, que además es bastante rápida pues a los dos días, ya ha absorbido casi el 90% de su capacidad total. En cambio la textura LCRB2. 2 absorbe mucha menos agua, aunque lo hace de manera relativamente rápida.

En la desorción es donde se detecta un comportamiento más diferenciado entre ambas texturas, ya que mientras LCRB1. 1 desorbe muy bien (moda A $SrD=[0.01; 0.1]$, LCRB2. 2 retiene un porcentaje de agua mucho más elevado (moda B $SrD=[1; 10]$).

Por otra parte la porosidad cerrada (nc) es escasa y casi despreciable como indica los bajos valores obtenidos (nc%, moda[0; 0.5]), algunas excepciones que alcanzan un 5% de porosidad cerrada, deben considerarse como producto de la distribución irregular del cemento.

C. "Els Munts"

A diferencia de las anteriores esta pequeña cantera presenta unas características muy uniformes en su tramo explotado.

En primer lugar, al tratarse de un "grainstone" de foraminíferos, con escaso cemento, tiene una elevada porosidad (no%: Moda [38; 42]) de tipo interpartícula.

Su capacidad de succión capilar, es elevada (CAC , entre 22 y 36 $\text{Kg x m}^{-2} \text{ x h}^{-1/2}$), aunque según los resultados de la porosimetría de mercurio predomina la macroporosidad. Estos valores podrían razonarse en función de su elevada proporción de porosidad abierta o circulante (n. ab = 65% del total) y a la buena comunicación de sus poros, ya que una importante fracción de macroporos se sitúan en rangos muy parecidos. A su vez estas características razonan la escasez de la porosidad cerrada en general, que aumenta ligeramente con el porcentaje de matriz micrítica. (nc%, moda B[1.5; 2]).

Absorbe una importante cantidad de agua en absorción libre (Moda A $SrA=[70; 80]$) y bastante rápidamente, pues en dos días alcanza el 90% de su capacidad total de absorción en vacío. Este comportamiento cinético concuerda también con lo observado en succión capilar. Desorben muy bien, reteniendo al final del proceso de evaporación un escaso porcentaje de agua (A, $SrD=[0.01; 0.1]$).

C. "Coves del Llorito"

Su porosidad para ser carbonatos poco cementados puede considerarse de tipo medio-alto, (no%: Moda [22; 26]) estos valores obtenidos por absorción de agua en vacío, concuerda con la observada por inyección de mercurio. Su estudio nos indica además que se trata de una microporosidad, con un radio de acceso de pequeño tamaño y con elevado porcentaje de porosidad atrapante. Por otra parte el estudio morfológico por diversas técnicas tanto con microscopio óptico como electrónico (MEB), confirman la mala comunicación entre poros. Estas características también explican el porcentaje de porosidad cerrada que aunque escaso no es del todo despreciable (nc%, moda [0.5; 2], según la observación microscópica, se trata de poros intercristalinos entre fábricas de dolomita y esparita, o de tipo intracristalino por disolución diferencial incipiente de los núcleos de las dolomitas idiotípicas (ver capítulo 4).

Es interesante remarcar que, a pesar de la diversidad de texturas y fábricas dolomíticas que se observan en el yacimiento, sus parámetros petrofísicos no presentan la dispersión de valores que cabría esperar. Esto se debe a que la compleja historia diagenética da lugar a una red porosa de características similares en todos los casos o tipos de texturas. Esta observación morfológica se confirma con los resultados del estudio por inyección de mercurio, ya que los diferentes tipos de fábricas dan parámetros porosimétricos similares.

Destaca sus bajos valores en succión capilar (CAC, entre 1 y 3.91 Kg x m⁻² x h^{-1/2}); esto no se corresponde con la elevada microporosidad y su pequeño radio de acceso, y solo es explicable porque la comunicación entre poros es muy mala. En efecto la observación morfológica en microscopio óptico y en MEB indica que hay muchos poros comunicados por accesos en forma de cuello de botella. (An-6/25).

Lógicamente este comportamiento en succión, debido a una mala comunicación entre poros, también se refleja en los bajos valores que se obtienen en la saturación por absorción libre de agua (SrA entre 48 y 66 %).

Aunque absorbe poca agua en proporción a su porosidad, ésta la desorbe mal y lentamente, por eso la proporción de agua retenida al finalizar el ensayo es elevada, aunque no en valor absoluto, si no en relación a su capacidad de saturación, con un SrD entre 40 y el 60 %. Existen dos posibles factores que pueden explicar este comportamiento, la escasa porosidad efectiva o bien comunicada, y la presencia de arcillas expansibles como la palygorskita que retienen agua por absorción y adsorción.

C. "Les Coves de la Pedrera"

Este litotipo que comprende la mayor parte de la sucesión estratigráfica de este yacimiento, tienen una elevada porosidad accesible al agua (no, entre 39.8 y 54 %), pero que presenta una distribución bimodal (tipo A no%: Moda [39; 42] y tipo B no%: Moda [51; 54]).

El tipo B corresponde a unas dolosiltitas de grano muy fino. Su extraordinaria porosidad se debe a la abundancia de poros intercristalinos que se han generado como consecuencia de la sustitución de una primera fábrica idiotípica de mayor tamaño de grano por otra hipidiotípica de dolomicroesparita, de menor tamaño (menos de 10 μ) y bastante equidimensional.

El tipo A también son las dolosilitas del tramo superior de la cantera, las cuales presentan un porcentaje variable e irregular de cemento esparítico que unido a las fábricas dolomíticas, reduce la porosidad intercrystalina, pero que aún sigue siendo importante. (ver capítulo 4. 1), esta tendencia es gradual y aumenta hacia el techo de la sucesión estratigráfica.

La porosidad cerrada también refleja estas diferencias de texturas y en general debemos considerar que es escasa, pero la textura B, con mayor porosidad y dominio de la fábrica hipidiotípica de dolomicroesparita, presenta una mayor cantidad de poros incomunicados. Según se observa en microscopía electrónica de barrido, son poros tetraedrales intercrystalinos que se sitúan entre los componentes de las fábricas dolomíticas, morfológicamente ya descritos por Wardlaw (1976), (ver apartado 6. 3. 2. 5), pero que representan en nuestro caso un pequeño porcentaje del volumen total de poros, pues en conjunto constituyen una red bien comunicada.

El comportamiento en succión capilar es extraordinario en capacidad y rapidez (CAC entre 36 y 77 Kg x m⁻² x h^{-1/2}). A los pocos minutos de iniciarse el ensayo ha tenido lugar la máxima succión de agua, lo cual supone además un elevado contenido de agua, con un WA, entre 28 y 30%, inusual para ser absorbido solo por succión.

Consideramos que este comportamiento se debe a la suma de varios factores que actúan con cierta sinergia.

- a- El carácter marcadamente unimodal y uniforme de su distribución de rango de acceso al poro.
- b- Su elevado porcentaje de microporosidad, más del 80% de la porosidad total.
- c- El porcentaje de porosidad abierta que esta entorno al 43% de la porosidad accesible, y que es explicable por la buena comunicación observada entre poros. En el análisis morfológico en microscopía electrónica de barrido se observa que son poros intracrystalinos de parecido tamaño de carácter poliedral no tetraedrales.

En absorción libre presentan ambos tipos una elevada capacidad de absorción de agua pero muy similar (SrA entre 87 y 89%), pues el porcentaje de porosidad abierta es muy parecido aunque su volumen total de poro sea distinto.

La cantidad de agua retenida al final de el ensayo de desorción es algo elevada (SrD entre 8 y 10 %) debido al elevado porcentaje de microporosidad.

6.4.4 Hinchamiento

(tabla 6.VI)

Algunas rocas, al absorber agua, experimentan un aumento de volumen que se conoce con el nombre de hinchamiento o expansividad (calidad de expansivo). En rocas incoherentes, sobre todo si contienen minerales arcillosos como esmectitas o vermiculita, esta expansividad puede tener importantes consecuencias. En rocas competentes, es generalmente poco relevante, tanto por el pequeño contenido arcilloso como por la fuerza que opone a ello la diagenelización.

Sin embargo, en rocas detríticas con un grado variable de cementación (como es el caso que nos ocupa) y notable contenido arcilloso, que suele ir asociado a una notable porosidad, pueden darse condiciones para que exista una expansividad importante. Esto tiene lugar cuando, de una u otra manera, disminuyen las tensiones efectivas, y se hace especialmente palpable, o contribuye a ello de forma decisiva, cuando desaparece el estado de confinamiento de la roca.

La principal causa de este comportamiento es la absorción y adsorción del agua por los minerales arcillosos (Norris y Rausell, 1963. Caillère, 1964. Brekke, 1965. Ducan, 1969. Brooking, 1972).

En la mayor parte de litotipos estudiados no se ha observado ningún hinchamiento apreciable. Solamente en las calcisiltitas tipo "Llorito", que es el único material que contiene una significativa fracción arcillosa con palygorskita y algo de montmorillonita, se observan hinchamientos relevantes. Por el contrario, en los niveles con fábricas dolomíticas idiotípicas, de este yacimiento (véase apartado 4. 1 del capítulo 4: texturas CLZ. 2 y CLZ. 7), con escaso contenido de arcillas (inferior al 0.5%), los valores de hinchamiento son mucho más bajos ($\epsilon_z = 0.05\%$). En las capas de grano más fino y con mayor porcentaje de micrita y arcilla, en las que suele predominar las fábricas hipidiotípicas de dolomita (véase apartado 4. 1: texturas CLZ. 1 y CLZ. 5), los valores son más altos ($\epsilon = 0.12\%$) indicando una clara tendencia a la expansividad.

El hinchamiento observado en este litotipo es marcadamente anisótropo, con una dirección de máxima expansión lineal (ϵ_z (%)), que es la perpendicular a la estratificación, lo que indica que los minerales de arcilla se disponen paralelamente a la estratificación. Todas las muestras de este litotipo presentan un rápido hinchamiento hasta las 2 o 3 horas, adquiriendo a las 6 horas un valor significativo que, según los criterios de Duncan (1969), permiten considerar a este litotipo como susceptible de hinchamiento.

Este comportamiento expansivo frente al agua es rápido, esto es el retardo que es bastante habitual en muchos tipos de rocas, frente al proceso inicial de absorción que hace penetrar agua en la red porosa y que genera posteriormente dicho comportamiento es escaso y menor que en otras rocas carbonatadas ya descritas (Alonso 1986), con similar mineralogía arcillosa. Por otra parte, si se cumple claramente el paralelismo entre las curvas de hinchamiento y absorción libre como ya se ha explicado en otros trabajos y publicaciones (Alonso 1986). Así pues estos ensayos indican que este litotipo tiene un comportamiento expansivo bastante sincrónico con el proceso de penetración de agua en la red porosa por absorción, lo que demuestra que la absorción mineral es en sí misma muy rápida.

LITOTIPO		ϵ_z (%)	ϵ_y (%)	ϵ_x (%)	ϵ_z (%)(6h)
"MÈDOL"		0,01 /0,004	0	0	0,01/0,03
"RODA DE BERÀ"	CRB.1	0.01	0	0	0
	CRB.2	0	0	0	0
"ELS MUNTS"	MUNTS.A	0.01	0	0	0.01
	MUNTS.B	0	0	0	0
"COV.DE LA PEDRERA"		0.01	0	0	0.01
"COV.LLORITO"	LORITO.A	0.12	0.06	0.06	0.1
	LORITO.B	0.05	0.02	0.01	0.04

- $\epsilon z\%$: Incremento de longitud según el eje z
- $\epsilon y\%$: Incremento de longitud ,según el eje y
- ϵx : Incremento de longitud, según el eje x
- $\epsilon z\%(6 h)$: Incremento de longitud ,según el eje z a las 6 h de inicio del ensayo

TABLA 6.VI: Ensayo de hinchamiento hídrico

6.5 ALTERABILIDAD: CICLOS DE CRISTALIZACIÓN DE SALES

6.5.1 Introducción

La valoración de la durabilidad o alterabilidad de un material es de capital importancia, ya que permite conocer su estabilidad y resistencia frente agentes atmosféricos degradantes, bien en una atmósfera normal, o bien en otras más agresivas, que pueden asociarse a ambientes polucionados de grandes aglomeraciones urbanas e industriales o de microclimas muy determinados. Todos estos ensayos que a este respecto se hagan, debieran ir encaminados a reproducir de la manera más próxima posible, todos o algunas de las condiciones ambientales que se consideren significativas.

Existen dos grandes tipos de ensayos: los que se realizan "in situ", sobre le mismo monumento, y lo que tienen lugar en laboratorio.

Estos últimos comprenden una gran variedad de ensayos y métodos que pueden clasificarse en dos líneas diferentes:

- 1- Los de carácter atmosférico normal, que intentan reproducir, de la forma más exacta posible las condiciones atmosféricas y ambientales con un control preciso de determinados parámetros, principalmente la temperatura y la humedad.
- 2- Los de carácter atmosférico agresivo, que mediante ciertos agentes químicos intentan producir un envejecimiento acelerado de los materiales elegidos, buscando en general poder evaluar el efecto de las atmósferas polucionadas e industriales, o, simplemente, la resistencia del material a la alteración (Vale Parapar, 1987).

Dentro de este variado grupo de ensayos (niebla salina, Kesternich-SO₂, etc.), uno de los más significativos es el de cristalización de sales, que se realiza por ciclos de inmersión- evaporación, y que siempre conlleva también cierto ciclo térmico asociado durante el secado.

Existen numerosas modalidades de estos últimos, según sean las sustancias empleadas (Cloruro sódico, sulfato sódico, sulfato magnésico, etc.), y las diferentes formas y periodos de inmersión y

secado. Pero las normas más aceptadas internacionalmente utilizan preferentemente el sulfato sódico, por lo que hemos seguido las recomendaciones de las normas RILEM (Ensayos V. 1a, V. 1b y V. 2) y DIN 52111. Los ensayos de cristalización de sales reproducen, en parte o el efecto de la helada, o el de la cristalización de otras sales que se encuentren en la roca. Podríamos decir que evalúan, de algún modo, el "efecto cuña" o efecto mecánico producido en ambos casos, es decir, el efecto asociado al aumento de volumen como consecuencia de la cristalización del agua o de las sales solubles, aunque en este último caso, su mecanismo aun siga siendo objeto de controversia en el ámbito científico.

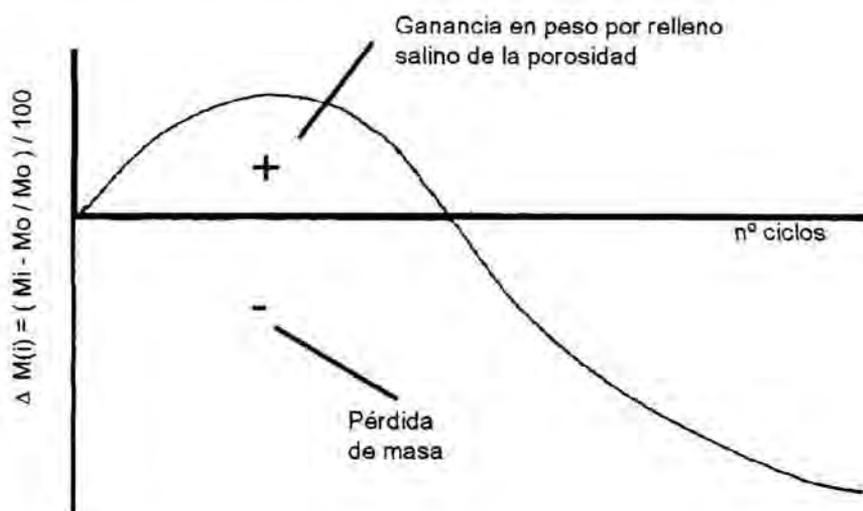


Fig. 6.4: Ciclos de cristalización de sales

Se ha tenido en cuenta las observaciones sobre el procedimiento del ensayo que en su día aplicaron los miembros del equipo de investigación de la Universidad de Oviedo (Alonso, Ordaz, Valdeón, Esbert, 1987; C. Ma. Grossi, 1992), referidas especialmente a la duración total de cada ciclo (24 h), la duración de la inmersión (3 h) y la temperatura de secado (60 ± 5 C°).

Se realizó un total de 12 ciclos para cada probeta ensayada, con inmersión total en una disolución al 32% de sulfato sódico, que se renovaba cada dos ciclos. Dado que la normativa indica un 14% de concentración, nuestros ensayos tienen un carácter especialmente agresivo, ya que las condiciones extrínsecas de los monumentos estudiados también lo son.

Las probetas eran, como en los anteriores ensayos, cubos de 5 cm. de arista.

Como indica la norma se realizaba un pesada previa y otra después de cada ciclo para conocer la pérdida de masa, así como una descripción morfológica de los daños cada dos ciclos.

$$\Delta M_i = \frac{M_i - M_o}{M_o} * 100$$

- M_i : masa final
- M_o : masa en seco inicial
- ΔM_i : pérdida de masa

Dado que al principio de los ensayos, en los primeros ciclos hay generalmente un ligero aumento de peso, debido a la sal que se va acumulando en los poros, se utiliza para calcular la variación de la masa M_i - M_o y no M_o - M_i , como parecería en principio más lógico para evitar valores negativos, de esta forma se facilita su representación gráfica, ya que en los primeros ciclos se suele dar un valor positivo para ΔM_i (representado en ordenadas) que se vuelve negativo cuando se inicia la pérdida de masa, así pues este tipo de curva en función de ΔM_i permite ver mejor la evolución del proceso (Price, 1978) (fig. 6.4).

Se ha controlado la temperatura de la disolución (22 ± 1 C°), para que la fase hidratada del sulfato sódico (mirabilita) este en su campo de estabilidad mineral, sin el cual no se produce el efecto disruptivo de su cristalización salina (Marschmer, 1978; Price, 1978), ya que se ha comprobado experimentalmente que por encima de 32.4 C° las fases más estable de este mineral son anhidras.

6.5.2 Resultados

LITOTIPO		Mi%	
		MÍNIMO	MÁXIMO
"EL MÈDOL"		-1,1	-4.02
"RODA DE BERÀ"	CRB.1	-7.6	-10.1
	CRB.2	-4.3	-6.6
"ELS MUNTS"	MUNTS.A	-13.03	-21.5
	MUNTS.B	-2.1	-6.1
"COV. DE LA PEDRERA"		-36.05	-36,9
"COV. DEL LLORITO"		-42.2	-45.39

- Mi%: pérdida de masa de la probeta al finalizar el ensayo (expresada en tanto por ciento de la masa inicial)
- Mi%: $M_i - M_o / M_o \times 100$
- M_i : masa final después del ensayo
- M_o : masa seca inicial

TABLA 6.VII: Ensayos de cristalización de sales

Los valores de esta variación de masa muestran que, en general, tenemos materiales muy degradables.

El litotipo más alterable de los estudiados es la calcisilita dolomitizadas tipo "Llorito", (ΔM_i , entre -42 y - 45%), observándose en algunas probetas solo después de cinco ciclos una pérdida de más del 50% en peso.

Los materiales procedentes de "Les Coves de la Pedrera", también presentan una elevada disminución de peso ($\Delta M_i = -36\%$), pero sin alcanzar los valores del caso anterior.

En contraste con estos dos litotipos, las calcarenitas procedentes, tanto de la cantera de "Els Munts" como de la cantera de "Roda de Berà" sufren una pérdida de masa muy inferior, pero que, en algunos casos, aun puede ser considerado importante.

La cantera de "Els Munts", presenta dos tipos de comportamientos. El primero tiene una escasa alterabilidad (ΔM_i entre -2 y -6 %), el segundo tipo tiene una mayor tendencia a la degradación (ΔM_i entre -13 y -21%)

En las probetas procedentes de Roda de Berà se detecta claramente las diferencias que de carácter petrológico existen. La textura tipo LCRB1. 1 (ΔM_i entre 8 y 10%) son mucho más alterables que la LCRB2. 2 (ΔM_i entre -4 y -6%).

Finalmente la cantera del "Mèdol", presenta valores de pérdida de masa bastante pequeños (ΔM_i entre -1 y -4%).

La inspección visual o el seguimiento morfológico de los daños producidos (Martín, Alcalde, 1990) permite analizar las modificaciones superficiales sufridas a lo largo de los ciclos, ya que a veces son más significativas que la propia pérdida de masa. Por tanto es muy importante señalar que este estudio morfológico permite establecer cierta correlación entre la realidad observada en el monumento y la probeta ensayada

Así las probetas del litotipo "Llorito", presentan ya en el tercer o cuarto ciclo importantes señales de deterioro (arenización y microescamas), en el sexto ciclo tiene las aristas y caras redondeadas, con separación en películas o esquirlas, y al final del decimosegundo ciclo, las probetas están bastante redondeadas, con la superficie de las caras arenizadas y con algunas eflorescencias grumosas y microescamas.

Las muestras de "Les Coves de la Pedrera", no presentan daños relativamente importantes hasta el quinto o sexto ciclo, pero su deterioro se acelera a partir del octavo ciclo, donde ya presenta aristas redondeadas, microescamas y separación de películas. Al final del decimosegundo ciclo, se observa separación en placas, picadura generalizada y alguna excavación. Por supuesto, la forma cúbica inicial prácticamente ha desaparecido.

En un grado menos severo de alteración, las probetas de las canteras de "Roda de Berà" y "Els Munts" presentan formas de alteración similares. A partir del quinto o sexto ciclo, se produce una arenización y picado creciente de las caras. Se nota además un lavado diferencial de la matriz micrítica, que hace resaltar los componentes bioclásticos.

Las probetas del litotipo "Mèdol" presenta diferentes grados de degradación según el porcentaje de micrita y de porosidad, especialmente la de tipo móldico. Las variedades texturales más frecuentes de porosidad media-alta, tienen una evolución similar, esto es a partir del cuarto ciclo, se inicia la fragmentación de las aristas y el desarrollo de picaduras. Entre el sexto y el octavo ciclo, comienza a observarse la alveolización superficial. Al final del duodécimo, bastantes esquinas están fragmentadas y se nota una rugosidad muy marcada en todas las caras, como consecuencia de la disgregación diferencial, quedando en relieve numerosos fragmentos de bioclastos.

6.5.3 Interpretación

Ha sido muy discutido el proceso físico - químico de la cristalización de sales y el deterioro correspondiente, aunque, sin lugar a dudas existe una clara relación con la mayoría de los procesos de degradación descritos científicamente, tanto en piedra como en morteros y materiales cerámicos de construcción.

Para algunos investigadores el principal factor es la sobresaturación de la disolución y las modificaciones que generan en el hábito cristalino, según la velocidad de crecimiento de los cristales (Sungawa, 1981; Arnold y Zehnder, 1985). Este mecanismo sería, por tanto, bastante independiente de la composición química y mineral de la sal soluble. Para otros investigadores el daño está más ligado a la presión de cristalización (Evans, 1970) o de hidratación (Winkler, 1973) que es más específica de la naturaleza química de la sal. También se ha propuesto como mecanismo principal los cambios estructurales de las asociaciones salinas (Pühringer, 1983), producidos por los cambios de humedad y temperatura del entorno. Esto es la hidratación tiene un efecto disruptivo porque afecta al agregado de minerales salinos de forma diferencial respecto al sustrato, generando esfuerzos de cizalla.

Independientemente de estos mecanismos, otros investigadores se centran en la importancia del control textural, especialmente la red porosa (Everet, 1961; Amoroso y Fassina, 1983), y aunque la cristalización se inicia en los poros grandes, la máxima presión cristalina se ejerce en los poros de pequeño radio, teniendo siempre en cuenta que se trata del tamaño real o diámetro interno del poro y no de su radio de acceso.

Todo esto es, lógicamente, discutible y matizable. Al fin de al cabo siempre nos hallamos en un proceso de cristalización. Parece lógico admitir que el desarrollo de cristales producirá un empuje sobre las paredes del espacio confinante, que es el poro. Este esfuerzo es verdaderamente importante cuando es unidireccional o anisótropo, y posiblemente sea independiente en muchos casos del tipo de mineral. En cambio la sobresaturación y la velocidad de crecimiento pueden ser decisiva por la modificación que ejercen sobre el hábito cristalino y su carácter unidireccional, por otra parte para velocidades pequeñas hay más posibilidades de comportamiento elástico de la roca, que para velocidades grandes, donde la roca tiene tendencia al comportamiento frágil.

Así pues, por todo lo expuesto, el objetivo de nuestros ensayos fue evaluar la alterabilidad de los diferentes litotipos seleccionados, y sus formas de alteración, estableciendo los posibles controles texturales y composicionales de la roca sobre este proceso acelerado de degradación experimental, pero sin entrar en la naturaleza fisicoquímica de los mecanismos. El otro objetivo propuesto fue comparar los resultados de este proceso experimental con las patologías observadas en los monumentos.

Respecto al primer objetivo es evidente que los litotipos "Llorito" y "Coves de la Pedrera" presentan una alterabilidad extraordinaria, mientras que en "Els Munts" y "Roda de Berà" aparecen efectos mucho más moderados, mostrándose el "Médol" como el menos alterable al menos inicialmente, (lo que no significa que no sea degradable por efecto de la acción de cristalización de sales, pues sus daños morfológicos superficiales son importantes, aunque no alcancen el grado de daño o pérdida de masa de los otros casos mencionados).

Los factores intrínsecos del material que controlan este proceso, son principalmente tres:

- 1- Las características de la red porosa
- 2- La fracción arcillosa, de carácter expansivo
- 3- La presencia de fábricas de dolomita, cristaloquímicamente inestables

En primer lugar, el volumen de poros, la distribución de rangos de poros y el grado de comunicación de los mismos, constituye quizás, el factor principal. Pero hay otros factores añadidos que pueden explicar algunas de estas tendencias tan acusadas al deterioro, ya que posiblemente actúan con cierta sinergia. Por ejemplo, la tendencia al hinchamiento debe ser tenida en cuenta, pues los ensayos por cristalización de sales también conllevan ciclos de humedad-sequedad y de hinchamiento ante el agua, si existen cierto contenido en arcillas expansivas.

Por otro lado, las fábricas dolomíticas son inestables por su déficit de magnesio, y esta tendencia a la alteración se acentúa en los cristales zonados que parecen sufrir un proceso de alteración más intenso que el resto de la textura carbonatada.

Las probetas de Roda de Berà tiene una alterabilidad de baja a moderada, pero muestra claramente las diferencias entre los dos texturas ya señalados. Así, LCRB1. 1, es moderadamente alterable (ΔM_i entre -7.6 y -10.1 %), comportamiento que se corresponde con su elevada porosidad y el porcentaje de microporo. En cambio, la textura LCRB2. 2, es menos alterable (ΔM_i entre -4.3 y -6.6%) ya que tiene un escaso volumen de poro y con un radio de acceso de mayor diámetro.

"Els Munts" presenta valores importantes de pérdida de masa (ΔM_i entre -13 y -21.5%). Se trata de una textura tipo grainstone poco cementada que produce una elevada porosidad, de tamaño más o menos fino aunque algo macroporoso, pero con gran capacidad de absorción de agua, esta comportamiento frente al agua es la clave de su alterabilidad ante la acción de las sales solubles.

"El Mèdol", aunque existen las variaciones ya comentadas de textura y comportamiento petrofísico, su pérdida de masa es bastante baja en general (ΔM_i entre -1.1 y -4.02). Aunque solo a nivel de hipótesis, este comportamiento puede explicarse como el resultado de la suma de dos factores:

- Por un lado la mala comunicación entre poros. Estos retienen parte de la sal, que se elimina difícilmente en el lavado.
- Por otro, el tamaño real del poro, predominantemente macroporo de tipo mólido, aunque su radio de acceso sea muchas veces de tipo microporo. De esta forma la sal, al cristalizar o hidratarse, no ejerce demasiada presión en el interior del poro.

El grado de deterioro observado en el litotipo de "Les Coves de la Pedrera", esta claramente relacionado con la elevada porosidad (no = 46%, en P. Hg y hasta 54% medida en absorción en vacío) y su marcado carácter microporoso y unimodal, que ya se refleja en la succión capilar, pero además existe otro factor adicional de difícil valoración que es la inestabilidad química de unas dolomitas no estequiométricas, que teóricamente son más solubles de lo habitual.

En cambio el tipo "Llorito", es mucho menos poroso (no = 26% P. Hg, hasta 28.8% en absorción en vacío) que los otros litotipos ("Coves", "Munts", "Berà") y su volumen de poro se asemeja bastante al tipo medio del "Mèdol", y sin embargo presenta los valores más altos de pérdida de masa. La causa de esta elevada alterabilidad puede justificarse, en parte, por el pequeño tamaño del radio de acceso al poro, pero este razonamiento tiene un importante contrasentido, ya que su espectro porosimétrico es similar a la textura LCRB1 del litotipo "Berà", que solo alcanza un 10% de pérdida de masa, en cambio el litotipo "Llorito" de características similares supera siempre el 40% de pérdida, es pues evidente la existencia de otros factores adicionales.

El más inmediato es la tendencia al hinchamiento, comprobada experimentalmente, y que se sumaría al efecto producido por la cristalización de sales, pero ni la cantidad de arcillas expansibles es tan grande, ni el grado de hinchamiento tan elevado como para explicar por si solos este comportamiento.

La sospecha de que otro factor añadido sea la inestabilidad cristaloquímica de la fábrica idiomórfica de dolomita de carácter zonado, se ve confirmada por la observación en las probetas alteradas de poros móldicos rómbicos y carcasas residuales de este tipo de cristales con núcleos disueltos, esta situación lógicamente apenas se observa en las texturas más arcillosas del litotipo sin este tipo de fábricas.

Pero este proceso no parece generar eflorescencias magnésicas, ya que no se han detectado por difracción de rayos x sulfatos magnésicos.

Así pues conocemos los agentes y los factores intrínsecos que intervienen en este proceso de alteración de estas fábricas, pero no podemos todavía precisar el mecanismo, que en todo caso discutiremos en el capítulo 9. Finalmente el último objetivo de estos ensayos es comparar los resultados que se obtengan de ellos (una degradación experimental) con las patologías observadas en monumento (degradación real, "in situ"), lo cual puede resumirse en los siguientes puntos:

- En los litotipos más alterables existen una coincidencia entre los resultados experimentales y las formas de degradación, especialmente con el tipo "Llorito", cuando se realiza el ensayo de cristalización de sales.
- El "Mèdol" es evidentemente menos alterable, pero como se observa en los "mapping", pueden darse estados de degradación muy avanzados, que no se corresponden del todo con lo observado experimentalmente. Esta situación podría ser debida, a un cierto retraso en el efecto disruptivo que nosotros no alcanzamos en los doce ciclos realizados, o quizás a la existencia de otros efectos más lentos como la disolución del cemento esparítico, no reproducible fácilmente en laboratorio.
- Las formas de degradación superficial observadas en las probetas ensayadas para cada litotipo, coinciden casi totalmente con las constatadas en los monumentos. Es decir, que cada material tiene una forma de degradación controlada por sus características texturales y composicionales, independientemente de su localización actual en el monumento, excepción hecha del desarrollo de costras y depósitos superficiales que dependen más de factores extrínsecos y ambientales. Así, el litotipo "Llorito" preferentemente se areniza y desescama muy rápidamente, mientras que, por ejemplo, el litotipo "Mèdol", aumenta su rugosidad superficial por disgregación diferencial, desarrolla "picaduras" y se alveoliza lentamente. El resultado morfológico es por tanto completamente diferente.