

## **II. CONTEXTO GEOGRÁFICO Y GEOLÓGICO DE LA ZONA DONDE SE UBICA EL MONUMENTO**

## II.1. SITUACIÓN GEOGRÁFICA

El Acueducto de Zaghouan-Cartago es una impresionante obra de ingeniería de 132 Km de longitud construido durante el siglo II d.C, para abastecer el complejo termal de la ciudad romana de Cartago. Aunque la parte terrestre (enterrada) del acueducto continúa funcionando actualmente, las zonas aéreas que transcurren sobre arcadas (17 Km) presentan importantes problemas de conservación. La parte más espectacular de este recorrido aéreo se encuentra en el valle del Oued Miliane y, sobretodo, cuando el acueducto cruza el cauce del río, alcanzando cotas máximas de hasta 38 m de altura. El tramo estudiado del acueducto está situado en este valle, a unos 20 Km al S de la capital (Túnez) y concretamente, en la zona donde se unen la carretera principal GP 3, de Túnez a Kairouan, con la secundaria MC 36 que lleva a la pequeña población de Khledia (Fig. II. 1). En este punto, el acueducto tiene una orientación N-S y el tramo estudiado, denominado tramo 3, corre paralelo a la carretera MC 36 con una longitud de 70 m y unos pilares que alcanzan los 3,2 m de altura.

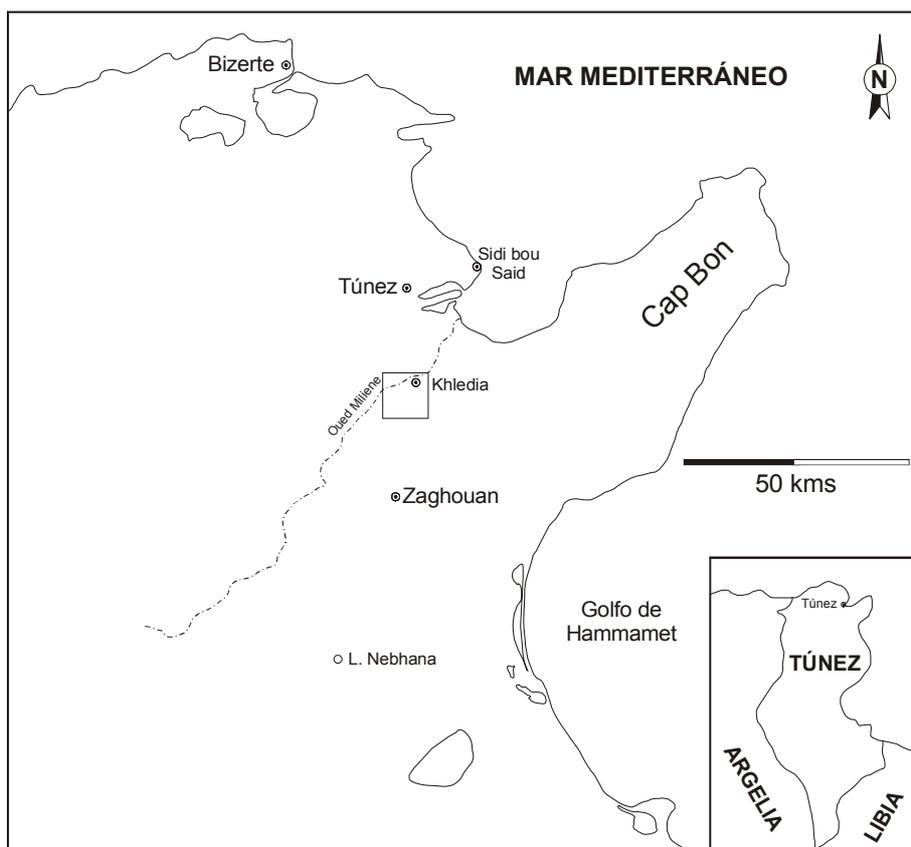


Fig. II.1: Situación geográfica de la zona de estudio (recuadro).

## II.2. LA SERIE OLIGO-MIOCENA

Los depósitos del Oligoceno superior al Mioceno medio de Túnez son principalmente detríticos y afloran en cuatro regiones principalmente, las cuales representan a su vez, cuatro grandes áreas subsidentes (Fig. II.2):

- a) Los afloramientos situados más al N se encuentran en la plataforma norte tunecina. Esta región representa la zona de sedimentación de las facies “greso-micacés” (Durand-Delga, 1956; Yaïch, 1992 y 2000), cuyos afloramientos se restringen a la isla de La Galite.
- b) En el extremo norte de Túnez, en la región montañosa comprendida entre Tabarka y Bizerte, los sedimentos de este periodo están representados por la formación Numidian (Burolet, 1956; Hoyez, 1989; Rouvier, 1977; Wezel, 1968; Yaïch, 1992 y 2000).
- c) En la parte septentrional de Túnez se depositaron las areniscas de la formación “Moyenne Medjerda” (Gottis y Sainfeld, 1956; Rouvier, 1965 y 1967; Biely y Salaj, 1971).
- d) Por último, en la parte central, oriental y nororiental de Túnez, siendo esta última zona donde se encuentra enmarcada geológicamente esta tesis, se depositaron las unidades sedimentarias representadas por las formaciones Fortuna (Castany, 1951; Burolet, 1956), Messioua (Scholler, 1933; Burolet, 1956; Blondel et al. 1988), Grijima (Yaïch et al., 1987; Yaïch, 1988, 1991, 1992 y 2000), Oued El Hammam (Hooyberghs, 1973 y 1977) y Aïn Grab (Burolet, 1956) así como por sus equivalentes laterales constituidos por las formaciones Ketatna y Salammo (Fournié, 1978) (Fig. II.3).

La sedimentación de estas formaciones estuvo controlada por un régimen extensivo regional que se estableció probablemente en relación a la apertura de las cuencas mediterráneas occidentales. Los desplazamientos tectónicos dieron como resultado un mosaico de horsts y grabens orientados principalmente N 40 y N 140.

Concretamente, los afloramientos oligo-miocénicos estudiados en esta tesis se encuentran situados en la zona del valle del Oued Miliane (Fig. II.2) y pertenecen a la formación Fortuna. En esta zona, la formación Fortuna se dispone encima de la serie del Eoceno superior, que está constituida por: una parte basal margosa; una intermedia, formada por una alternancia de calizas arcillosas, fosfatos, margas y calizas con sílex y una superior, caracterizada por un nivel de calizas grises con Globigerinas, que al igual que las areniscas de

la formación Fortuna también fueron explotadas por los romanos como material de construcción del acueducto de Zaghouan-Cartago. En esta zona cercana a la población de Khledia, la serie eocena se acaba con una unidad margosa sobre la que se disponen en discordancia las primeras capas areniscosas de la formación Fortuna.

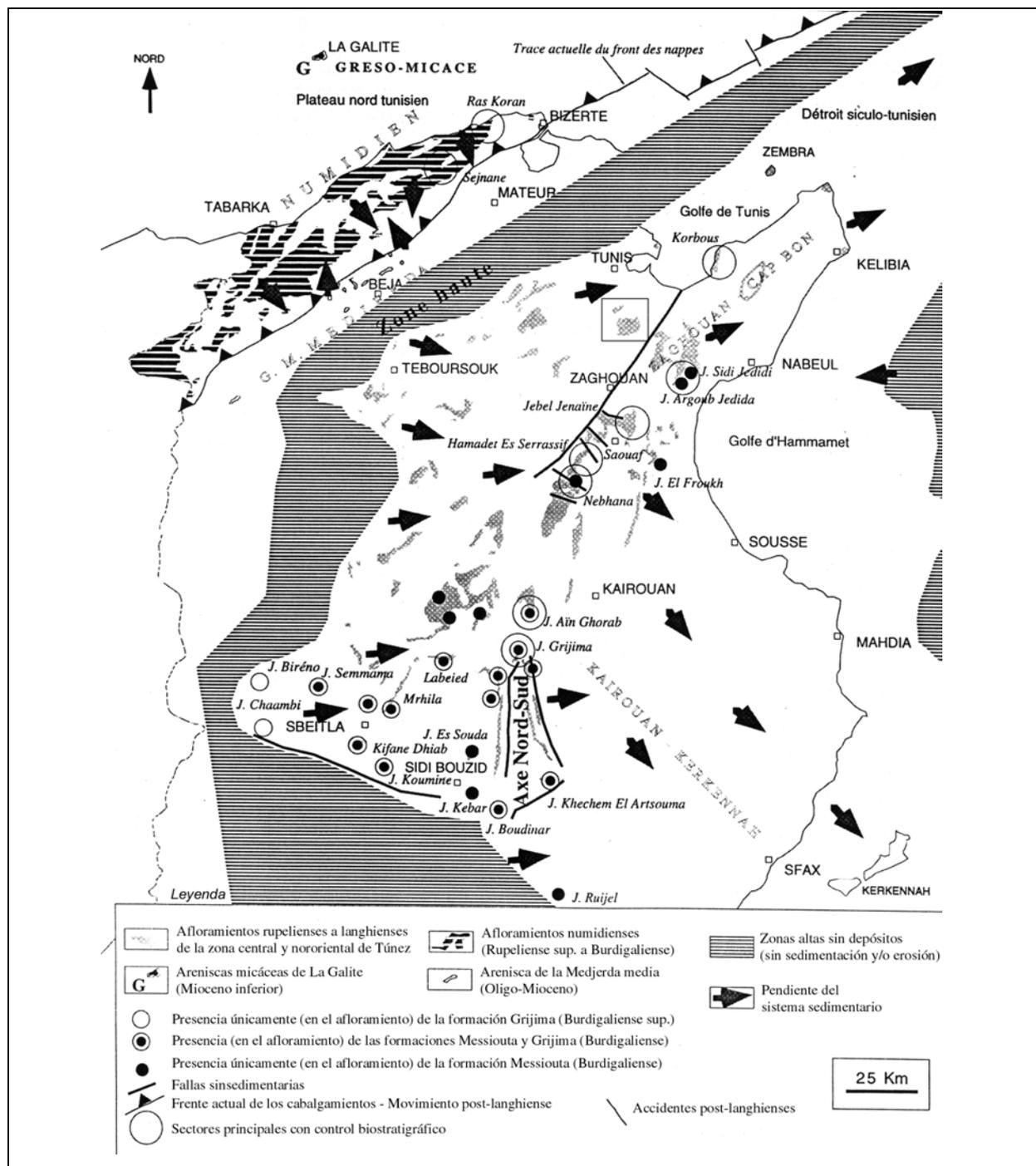


Fig. II.2: Afloramientos del Oligoceno superior al Mioceno inferior de Túnez. (modificado de Yaich, 2000) y situación geográfica de la zona de estudio (recuadro).

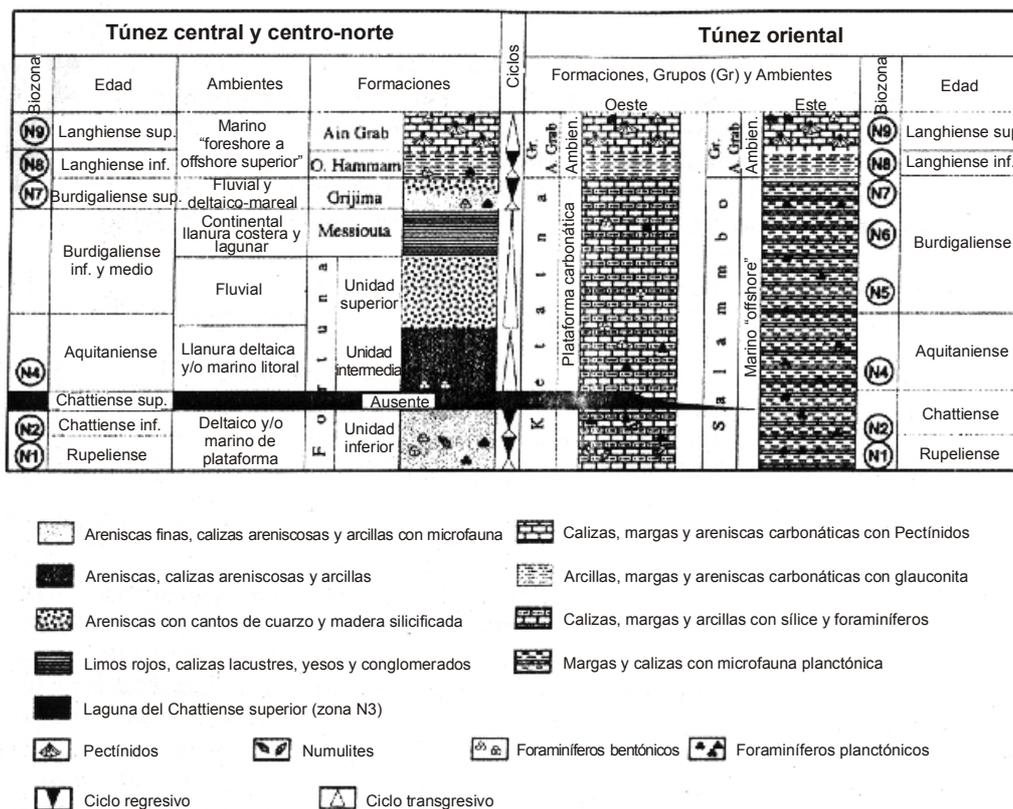


Fig. II.3: Formaciones y unidades sedimentarias del Oligoceno al Mioceno medio en la región centro-nororiental de Túnez (Yaich, 2000).

Ya en los trabajos más antiguos de la zona de Khledia (Lajmi, 1968, Mapa Geológico Bir Mcherga (Jauzein, 1957), se reconocían para la formación Fortuna tres unidades que fueron atribuidas al Oligoceno (Fig. II.4). Según Lajmi (1968), el primer conjunto de edad Oligoceno inferior, posee 300m de espesor y esta constituido por arcillas verdes arenosas y por bancos métricos de arenisca cuarzosa ferruginizada depositados en un ambiente marino (Figs. II.4, II.5A y II.5B). Hacia el techo, la serie pasa a arena masiva de tamaño de grano fino que contiene fragmentos de arenisca redondeados con algunos niveles de calizas areniscosas con *Nummulites* que caracterizan al Estampiense (Lajmi, 1968). Este conjunto fue cartografiado como Oligoceno marino en el mapa geológico de Bir Mcherga (Jauzein, 1957).

El segundo conjunto, de edad Oligoceno superior, tiene una potencia de 240 – 300 m, y está constituido, en la base por arcillas verdes con yesos y escasas areniscas (Figs. II.4, II.5C y II.5D). Este conjunto sería equivalente al Oligoceno lagunar del mapa, el cual tiene una potencia de 100 – 150 m de espesor y forma una depresión en la topografía. Hacia el techo, las areniscas sin fósiles dominan y van aumentando cada vez de granulometría, al mismo tiempo que se

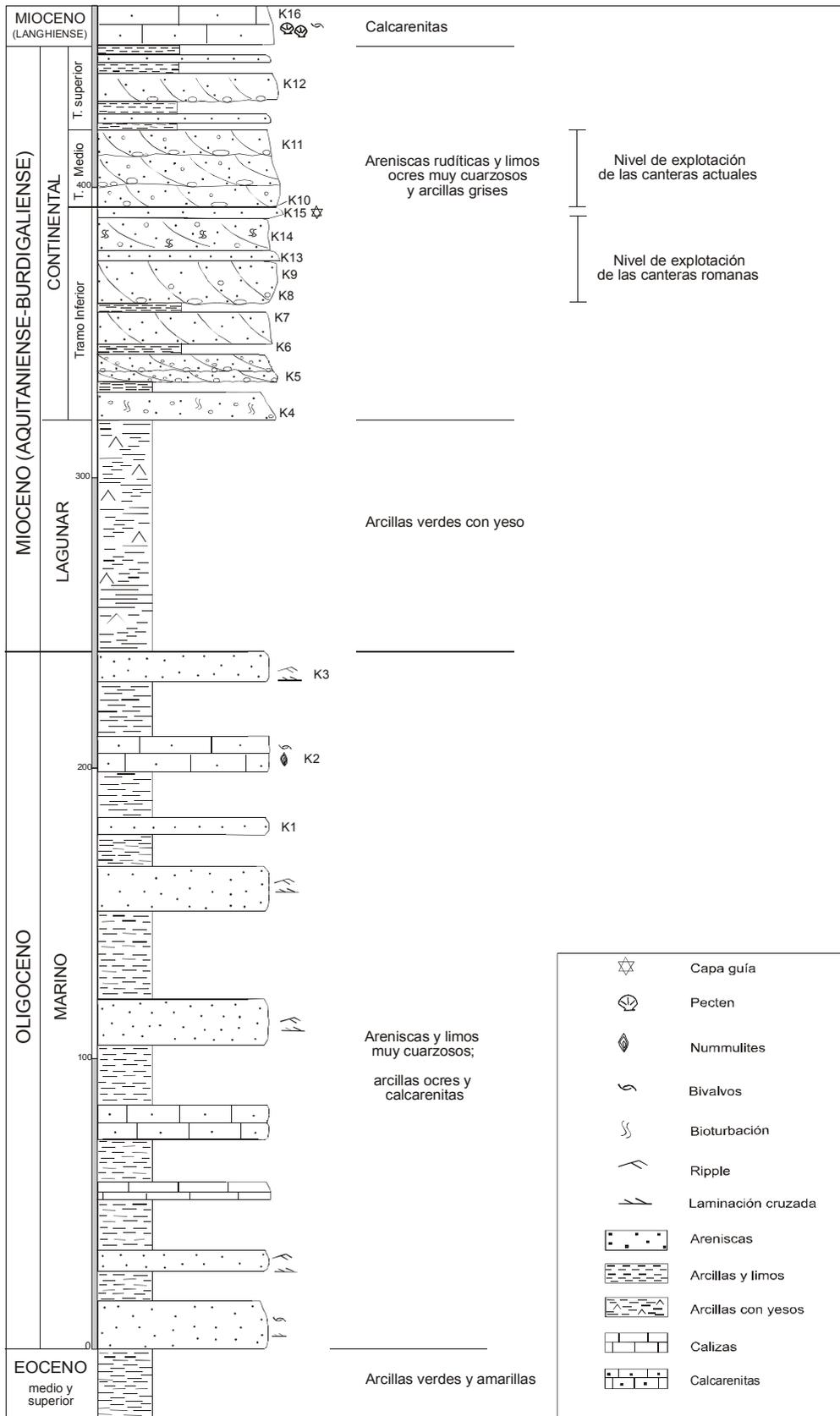


Fig.II.4: Columna estratigráfica general de la formación *Fortuna* en la zona estudiada.

enriquecen en cuarzo y troncos de madera fósiles, indicando el carácter continental de estas capas (Figs. II.4 y II.5E). Según el mapa de Bir Mcherga (Jauzein, 1957), la potencia de este Oligoceno continental sería de 450 m, mientras que según el trabajo de Lajmi (1968) la potencia sería de 140 a 150 m, dato mucho más cercano al espesor de la columna levantada en este trabajo.

Antiguamente, la atribución al Oligoceno superior de las capas continentales fue gracias al descubrimiento del Burdigaliense marino en el corazón del sinclinal de Khledia. Según el mapa geológico de Bir Mcherga (Jauzein, 1957) este Mioceno aflora en algunos cerros alrededor del sondeo de Sidi Ibrahim (Grombelia 386,2 x 529,3) y está representado por una caliza limosa con abundante fauna: *Pecten sp*; *Sculella sp*; *Clypeaster sp.*, que descansa directamente sobre las margas grises del techo del Oligoceno continental (Figs. II.4 y II.5F). En realidad y según los trabajos más recientes (Yaich, 2000), los materiales marinos que cubren esta unidad continental pertenecen a la formación Aïn Grab (Buroillet, 1956) que es de edad Mioceno y, concretamente, Langhiense (Fig. II.3).

En los trabajos más recientes (Hooyberghs, 1992; Yaïch et al., 1994 y Yaich, 2000), la formación Fortuna también ha sido subdividida en tres unidades pero le otorgan una edad de Oligoceno a Mioceno medio (Fig. II.3). En concreto, las unidades inferior, de edad Rupeliense inf.-Chatiense inf (Oligoceno), e intermedia, de edad Aquitaniense (Mioceno inf.), son generalmente de grano fino y están constituidas por arenas finas, limos, arcillas con yesos interestratificados y calizas aunque la unidad intermedia tiene un carácter algo más arenoso y presenta intercalaciones de areniscas ricas en glauconita. El conjunto de características sedimentarias y de fauna indican que la sedimentación de estas dos unidades tuvo lugar en ambientes que van desde deltaico a marino somero o litoral y en general, hacia el E, la cantidad de detríticos disminuye progresivamente. Los depósitos deltaicos fueron atrapados en una depresión que se extiende de NE a SW a lo largo del eje Nebhana-Cap Bon (Fig. II.2). La unidad superior de la formación Fortuna es de edad Aquitaniense-Burdigaliense (Hooyberghs, 1992) y está constituida por areniscas ricas en cuarzo depositadas en un ambiente fluvial poco sinuoso (Yaïch, 1994). En esta unidad es donde se encuentran situadas las canteras romanas que suministraron la mayoría del material para la construcción del acueducto de Zaghouan-Cartago.

El estudio detallado de los materiales constructivos utilizados en el acueducto de Zaghouan-Cartago en el tramo del Oued Miliane (ver capítulo V, Fig. V.1) permite afirmar que las diferentes variedades (litotipos) de sillares de arenisca pertenecen única y exclusivamente a la unidad superior de la formación Fortuna. La atribución de la procedencia

de los sillares a esta unidad superior se ha podido establecer gracias a que las areniscas de las dos unidades inferiores suelen ser bioclásticas (calcarenitas) y estar mucho más cementadas (litificadas) por calcita esparítica al haberse depositado en un ambiente marino deltaico, mientras que las areniscas de la unidad superior son de carácter continental fluvial, no contienen fauna y se encuentran poco o nada cementadas. Por este motivo, el estudio sedimentológico desarrollado en el capítulo VI de esta memoria ha sido restringido a la unidad superior de esta formación Fortuna.

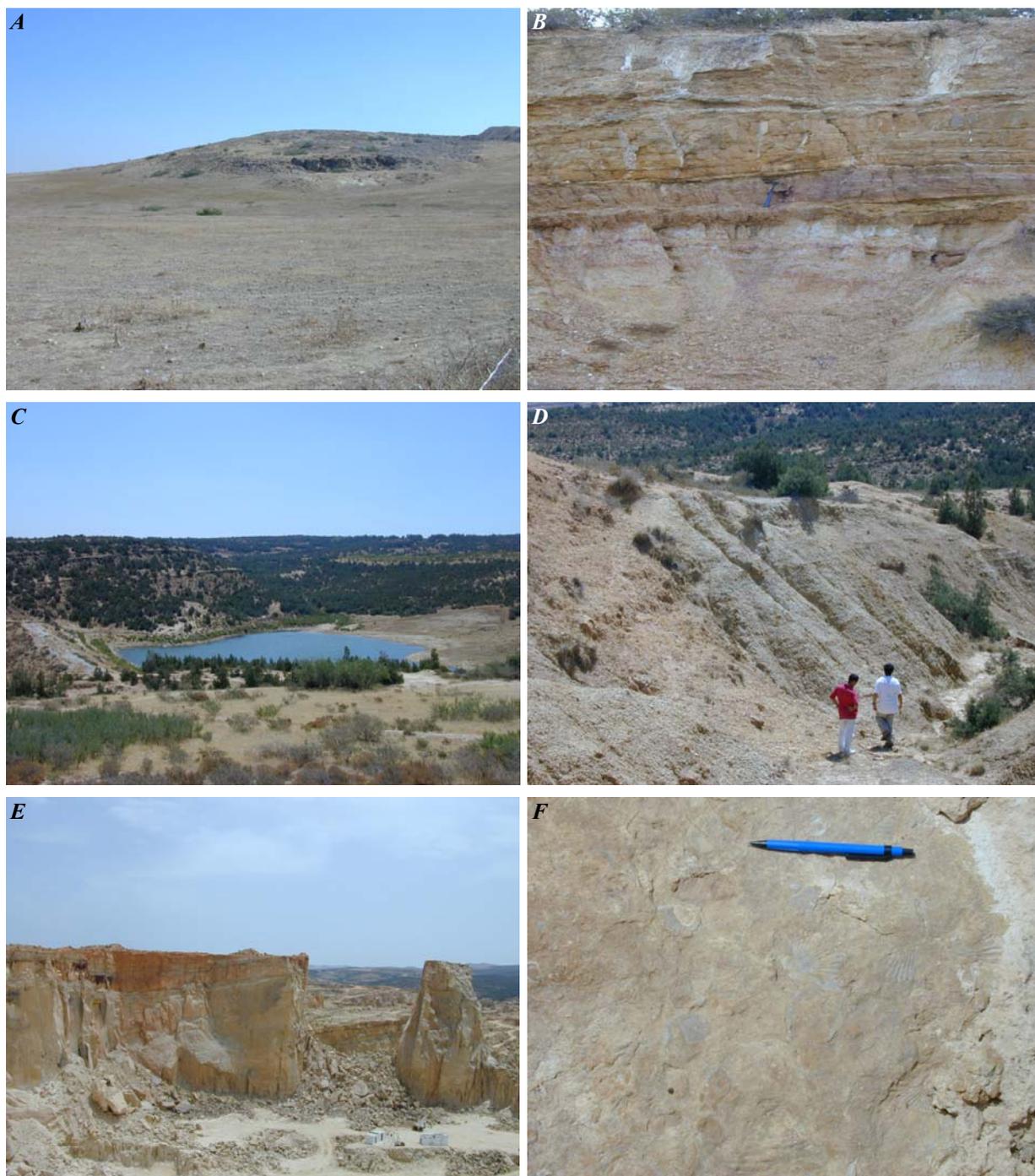


Fig. II.5: Aspecto de campo de la formación Fortuna en la zona de estudio. (A y B) Unidad inferior marina deltaica (Oligoceno, Rupeliense-Chattiense inf.). (C y D) Unidad intermedia lagunar deltaica (Mioceno, Aquitaniense). (E) Unidad superior continental fluvial (Mioceno, Aquitaniense). (F) Calizas con *Pecten* correspondientes al techo de la serie (Mioceno marino, Langhiense).

### **III. OBJETIVOS**

### **III.1. OBJETIVO GENERAL:**

El objetivo principal de esta tesis es la caracterización petrofísica y de alterabilidad de la arenisca miocénica de la parte nororiental de Túnez, utilizada antiguamente en la construcción de un número importante de monumentos romanos en la zona, como es el caso, del acueducto romano de Zaghouan-Cartago y de la ciudad de Uthina. La finalidad de este estudio es doble, por un lado, obtener todos los conocimientos necesarios de esta piedra para poder restaurar estos monumentos de la manera más idónea y, por otro lado, concienciar a los responsables de posibles restauraciones futuras de la necesidad e importancia de realizar estudios similares como punto de partida a cualquier intervención sobre monumentos construidos en piedra.

### **III.2. OBJETIVOS CONCRETOS:**

Para poder alcanzar este objetivo general se han establecido una serie de objetivos concretos a cumplir:

- 1- Identificar en cantera los materiales utilizados en la construcción del acueducto en el tramo del Oued Miliane.
- 2- Caracterizar la estratigrafía y petrología de la formación geológica de la que fueron extraídos los materiales constructivos del acueducto.
- 3- Determinar las propiedades petrofísicas de estos materiales y su alterabilidad.
- 4- Establecer la respuesta de este material a diversos tratamientos de consolidación y restauración.
- 5- Diagnóstico sobre el estado de conservación del acueducto determinando sus alteraciones y las causas y mecanismos que las han originado.
- 6- Confeccionar una guía general que pueda servir de modelo a futuras intervenciones en este y otros monumentos de similares características.

## **IV. METODOLOGÍA**

## IV.1. TRABAJO DE CAMPO:

Para alcanzar los objetivos propuestos, se ha seguido un plan de trabajo que podemos dividir en dos etapas bien diferenciadas:

**La primera etapa**, ha consistido en el estudio del monumento y de las canteras que proporcionaron el material de construcción del mismo.

### 1- Estudio del monumento:

Sobre alzados arquitectónicos se ha llevado a cabo la cartografía de los tipos de piedra y de las lesiones que afectan a la misma. También, se establecieron correlaciones entre tipos de piedra y las lesiones observadas. Paralelamente, se hizo un muestreo de cada variedad de piedra que constituye el monumento y que servirá para un posterior estudio petrofísico.

Por otro lado, ha sido necesaria la localización y el posterior estudio de las canteras romanas para:

- poder diferenciar las alteraciones naturales de las rocas de las ocurridas en el monumento.
- poder disponer de suficiente material no afectado por las alteraciones relacionadas con el monumento y poder realizar los ensayos de laboratorio necesarios para la caracterización física del material de origen.
- estudiar la posibilidad de utilización de este material como piedra de sustitución para una restauración posible de este monumento o de cualquier otro donde se haya utilizado este material u otro material con características petrofísicas parecidas.

### 2- Estudio de las canteras:

Como no había apenas trabajos sobre los materiales explotados por las canteras romanas, ni desde el punto de vista estratigráfico ( a excepción del mapa geológico de la zona) que ya data del 1957, ni desde el punto de vista petrológico, ha sido necesario realizar el estudio sedimentológico de estos materiales con los que se ha confeccionado una columna estratigráfica general de la zona donde se encuentran las canteras. Al mismo tiempo que se han recogido los datos estratigráficos se ha llevado a cabo un muestreo sistemático de los estratos de arenisca a lo largo de la serie. Además, se ha efectuado un estudio específico de los niveles explotados por las canteras romanas en el que se han identificado aquellos estratos considerados “a priori” como representativos de las variaciones texturales y composicionales en relación con los materiales observados en el monumento.

**La segunda etapa**, desarrollada en el laboratorio, ha consistido, por un lado en el estudio al microscopio de luz polarizada de las muestras obtenidas tanto en el afloramiento

como en el monumento y por otro lado, en la realización de ensayos de caracterización de propiedades físicas del material extraído tanto en las canteras como en el monumento.

El estudio petrológico de las muestras recogidas ha consistido en el contaje de granos realizado en las láminas delgadas, para cuantificar las diferentes especies minerales. Además, se ha utilizado el microscopio de catodoluminiscencia para poder distinguir mejor los cementos carbonáticos. También, se ha empleado el microscopio electrónico de barrido que lleva incorporado un microanalizador de energía dispersada (EDS) para poder solventar algunos problemas surgidos durante el estudio petrológico. También con el confocal para el estudio del sistema poroso.

Para el estudio de las propiedades hídricas y mecánicas del material se han confeccionado probetas con dimensiones específicas que varían según el tipo del ensayo a realizar y según la normativa utilizada. Estas probetas se han obtenido a partir del material recogido tanto en el monumento como en la cantera.

La primera fase del estudio físico ha consistido en la caracterización del comportamiento del material frente al agua. Para esta finalidad se han realizado los ensayos considerados como básicos y que tienen relación directa con el movimiento del agua dentro de la roca. Éstos son principalmente, la absorción de agua en condiciones de vacío seguida de la desorción, la absorción de agua por capilaridad y la permeabilidad al vapor de agua.

La segunda fase de este estudio consiste en la determinación de ciertas propiedades mecánicas que se consideran determinantes en cuanto a su utilización como material de construcción. Para esta finalidad, se ha realizado el ensayo de la resistencia a la compresión y el ensayo de desgaste por rozamiento.

La tercera fase consiste en estudiar la durabilidad de la roca o su resistencia a la alteración mediante la realización de ensayos de alteración acelerada. En este caso hemos desarrollado el ensayo de alteración mediante ciclos de cristalización de sales solubles, específicamente el sulfato sódico, porque es el agente más agresivo y frecuente, además nos indica de manera significativa el grado de cohesión interno de la textura petrográfica.

La debilidad que ha mostrado la piedra frente a la acción de cristalización del sulfato sódico ha hecho necesario la búsqueda de tratamientos idóneos para la protección de la misma contra este agente de degradación o simplemente para aumentar su resistencia frente a la alteración o para la restauración de los daños ya producidos. Para ello se ha estudiado la respuesta de algunos productos de restauración (hidrofugantes y consolidantes) que se encuentran actualmente en el mercado. Este estudio se ha llevado a cabo mediante ensayos que caracterizan el comportamiento del sistema piedra-producto. Para esta finalidad se han

repetido los ensayos más significativos realizados con la piedra en blanco para poder comparar los resultados obtenidos en los dos casos y que permiten sacar conclusiones en cuanto a la idoneidad de dichos productos. También se ha utilizado el microscopio electrónico y confocal para la identificación del modo de actuación de los productos y detectar su grado de penetración en la piedra.

Por último, durante la etapa de gabinete se sintetizaron los datos obtenidos a partir del estudio de campo y del análisis petrográfico y de los ensayos de laboratorio. Todo este conjunto ha permitido la elaboración de las conclusiones principales de este trabajo y se ha procedido a la redacción del mismo que ha dado como fruto esta memoria.

## **IV.2. TRABAJO DE LABORATORIO:**

Las técnicas de laboratorio utilizados en este trabajo han sido los siguientes:

### **IV.2.1. MICROSCOPIA:**

#### **IV.2.1.1. Microscopía óptica de polarización:**

Esta técnica física se basa en el estudio de las propiedades ópticas de la materia cristalina. Mediante ella se han identificado los minerales que integran la roca y se realizó un conteo de 500 puntos de las especies mineralógicas identificadas según la metodología de Gazzi – Dickinson (Ingersoll et al., 1984). Para la contabilización de los resultados se ha confeccionado una tabla que contiene todos los elementos de posible aparición en las láminas delgadas observadas.

#### **IV.2.1.2. Microscopía electrónica de barrido:**

Se utilizó el microscopio electrónico de barrido que lleva incorporado un microanalizador de energía dispersada (EDS). La técnica ha servido para la descripción de la estructura tridimensional del material, también ha sido utilizada para la detección de los polímeros dentro de la roca tratada su disposición y distribución en la red porosa.

#### **IV.2.1.3. Microscopía de fluorescencia (MP):**

Las láminas delgadas de la roca, previamente impregnadas con fluoresceína, se examinan mediante luz ultravioleta que provoca la excitación de la fluorescencia de las zonas impregnadas. Se forman así imágenes del sistema poroso y fisural comunicado.

#### **IV.2.1.4. Microscopía láser confocal (MLC):**

Esta técnica ha sido utilizada para construir la tridimensionalidad del sistema poroso de la roca mediante secciones seriadas en el seno de la lámina delgada utilizada en la microscopía de fluorescencia, en este caso, las láminas se han preparado con un espesor de 100 micras en lugar de 30 micras para obtener una reconstrucción tridimensional que pueda describir mejor la comunicabilidad de la red porosa. Los cortes virtuales obtenidos son imágenes bidimensionales X-Y, obtenidas a diferentes profundidades, Z, en la lámina.

#### **IV.2.1.5. Catodoluminiscencia:**

Los cementos carbonáticos que aparecen en algunas muestras de la serie oligocena han sido estudiados en láminas delgadas en el microscopio de catodoluminiscencia Technosyn Cold Cathodoluminescence model 8200 MKII, operando entre 12 y 17 KV y con una intensidad de corriente de 350  $\mu$ m (Departament de Geoquímica, petrologia i prospecció geològica. Facultat de Geologia. UB)

### **IV.2.2. ENSAYOS FÍSICOS:**

#### **IV.2.2.1. Propiedades hídricas:**

##### **IV.2.2.1.1. Absorción al vacío:**

Este ensayo consiste en saturar de agua la porosidad accesible de la roca. Para ello se introduce la roca en una autoclave de vacío, de vidrio o similar, en el que se habrá obtenido una baja presión (0.001 mbar) que facilitará la circulación de agua hacia el interior de la roca. Este ensayo nos permitirá calcular mediante unas pesadas complementarias (peso en seco (Mo), pesada hidrostática saturada sumergida (Mh), pesada saturada al aire (Ms)) la densidad aparente (Dap), la densidad real hidrostática (Dre) así como el grado de saturación y la porosidad accesible. Como ya se ha indicado, este último parámetro es de gran importancia en las propiedades físicas, en la reactividad química, en la durabilidad y en la calidad del material.

##### ▪ **Procedimiento :**

En este ensayo se pretende que las probetas absorban la máxima cantidad posible de agua.

El ensayo se ha realizado de acuerdo con la normativa francesa homologada **NF B 10-503** Août 1973, RILEM. 25- PEM. Test N° I-1 y I-2 (1988), Alonso (1986), Prada, (1994) con

la salvedad de trabajar a presiones más bajas que las indicadas en esta norma. El procedimiento experimental se desarrolla del modo siguiente:

- Determinación del peso de las probetas en seco ( $M_o$ ).
- Las probetas se mantienen durante 24 horas en un recipiente conectado a una bomba de vacío en la cual se mantiene una presión constante de 0.001 mbar, con ello se elimina prácticamente el aire contenido en los poros de la muestra.
- El recipiente se llena lentamente con agua destilada controlando el proceso de modo que las probetas no queden totalmente sumergidas antes de 15 min. En ello se facilita el acceso del agua líquida a las partes interiores de la probeta.

Las probetas serán extraídas del recipiente después de 24 h de haber desconectado la bomba del vacío y se mantendrán sumergidas en agua a presión atmosférica, durante 24 horas.

Pasado este tiempo,

- Las probetas saturadas de agua en su porosidad accesible serán pesadas dentro del agua, ésto nos da el peso hidrostático ( $M_h$ ) y el porcentaje de agua absorbida ( $W_s\%$ ) se calcula del modo siguiente:

$$W_s = (M_s - M_o) / M_o \times 100,$$

Donde;

$M_s$ : masa total de la probeta saturada en vacío.

$M_o$ : masa total en seco de la probeta.

- La densidad aparente de la roca ( $D_{ap}$ ) viene determinada por:

$$D_{ap} = M_o / M_s - M_h$$

Siendo:

$M_s$  la masa en saturación.

- La densidad real hidrostática de la roca o densidad de la masa impermeable:
- $D_{re}$  se calcula de la manera siguiente.

$$D_{re} = M_o / M_o - M_h.$$

- El porcentaje de la porosidad accesible  $n^\circ$  viene determinada por :

$$n^\circ = [M_s - M_o / M_s - M_h] \times 100$$

#### **IV.2.2.1.2. Desorción libre:**

Los materiales rocosos son capaces de retener agua, debido a la presencia de espacios vacíos (porosidad) o de minerales higroscópicos y por diversos mecanismos.

Cuando las condiciones ambientales cambian, en el sentido de facilitar la evaporación, el agua, que se encuentra en el interior tiende, a salir al exterior (desorción).

La desorción es un fenómeno bastante complejo, para mejor entenderlo hay que establecer la curva de secado del material rocoso. Al comienzo y mientras la superficie del material está completamente húmeda el gradiente de evaporación se establece entre la humedad del medio (humedad relativa) y la humedad, de la superficie (considerada el 100%). En estas condiciones, la presión de vapor de agua sobre la superficie del material permanece constante y adquiere su valor máximo.

En esta primera fase, la evaporación depende únicamente, de la temperatura ambiental., de la humedad relativa (HR) y de la velocidad del aire. A 20°C y 40% y velocidad de aire nula, el coeficiente superficial de transferencia de vapor de agua ( $\beta$ ) es equivalente a:

$$\beta = (P' - P)$$

Siendo:

P': Presión de vapor máxima. (2337 N/m<sup>2</sup>).

P: Presión de vapor del medio ambiente. (935 N/m<sup>2</sup>).

Durante un cierto periodo de tiempo, esta velocidad de secado constante permanece invariable en tanto que pueda ser suministrada suficiente cantidad de agua desde el interior del material a la superficie. La presión de vapor en la misma se mantiene en su valor máximo. Sin embargo, el contenido de agua en la superficie irá disminuyendo de manera gradual y llegara un momento en que cese la transferencia de agua desde el interior a la superficie en fase líquida, como consecuencia, la presión de vapor en la superficie tampoco podrá mantener su valor máximo cayendo rápidamente, la cantidad de agua que se evapora en función del tiempo decrecerá. El contenido de agua de la roca ya no permite mantener dicho aporte (contenido en agua crítico (Wc)). El secado ya no tiene lugar desde la superficie, si no desde el interior por el agua ligada por fuerzas capilares, o electrostáticas retenidas en el interior de la roca. Su velocidad depende ahora del coeficiente de difusión de vapor de la roca (es decir, de las características intrínsecas y de la configuración del sistema poroso de la roca) ya que se transporta hasta la superficie. El proceso es cada vez más lento hasta el establecimiento de un contenido de agua estacionario (Alonso et al., 1987; Amoroso y Camaiti, 1997).

A partir del contenido de agua crítico ( $W_c$ ) la superficie de la probeta ya no es húmeda y la pérdida de agua es más lenta.

El contenido de agua crítico marca el cambio de régimen en las curvas de evaporación y representa la ruptura de la continuidad hidráulica, Es la última etapa de la alimentación de la superficie por capilaridad y la primera etapa de la difusión a través el sistema poroso de la roca. En efecto, dada la complejidad y la heterogeneidad del sistema poroso, los dos mecanismos pueden coexistir y el cambio de estado nunca es brusco.

Un contenido de agua crítico bajo indica una velocidad rápida de secado, ya que una gran cantidad de agua puede emigrar a la superficie antes de que disminuya la velocidad de secado.

El coeficiente de evaporación corresponde a la velocidad media de evaporación y utilizando la definición general de la velocidad media podemos obtener un valor aproximativo de la velocidad inicial de secado.

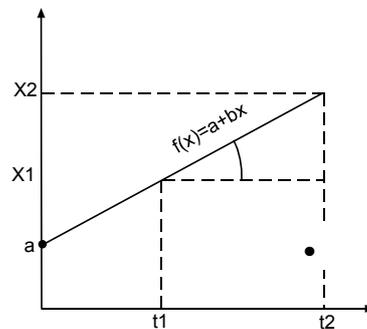


Fig. IV.1: Representación gráfica de la velocidad media

La velocidad como muestra la Fig. IV.1, corresponde a la pendiente de la recta definida por la ecuación siguiente:

$$f(x) = a + bx \quad \text{donde } b = \text{tg } \bullet = \text{pendiente de la recta}$$

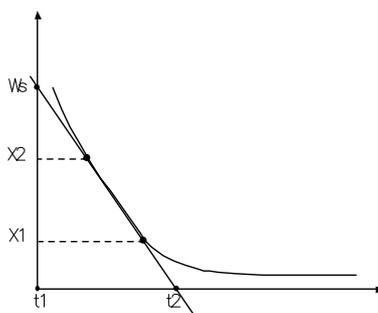
$$a = \text{ordenada en el origen}$$

Esta ecuación es equivalente a la ecuación de la velocidad:

$$x(t) = x_0 + v t$$

$$v = b = \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} = \text{tg } \bullet \\ = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}$$

En el caso de la desorción, la aplicación de la definición de la velocidad media ya explicada, permite la obtención de un valor aproximado de la velocidad de secado del tramo inicial de la curva de evaporación.



Este valor aproximado del coeficiente de evaporación (C.E.), se puede calcular, o bien, trazando la recta de regresión del tramo inicial de la curva de secado, calculando después la pendiente, a la cual corresponde al coeficiente de evaporación, o también, a partir de la fórmula siguiente:

$$\text{C.E. (\%/h)} = W_s / \Delta t$$

Donde;

- $W_s$ : Contenido en agua a saturación de la probeta
- $\Delta t$ : Abscisa correspondiente a la intersección de la recta tangente a la curva en el origen (tramo inicial de evaporación) con el eje x (donde se representa el tiempo).

Entre los dos sistemas, ha sido elegida el primero por considerarse de mayor precisión. Mediante este ensayo de desorción libre se calcula también los parámetros siguientes:

- Contenido final de agua:

$$W_f = [M_f - M_0 / M_0] \times 100$$

- Grado de saturación final respecto al máximo contenido de agua absorbida.  $Se(\%)$

$$Se = (M_f - M_0 / M_s - M_0) \times 100$$

$M_f$ : masa final de la probeta desorbida

$M_0$ : masa en seco de la probeta

$M_s$ : masa a saturación de la probeta

#### ▪ **Procedimiento:**

En este ensayo se utilizan las mismas probetas procedentes del ensayo de absorción al vacío, es decir completamente saturadas en agua ( $M_s$ ).

En este ensayo se observa la dinámica de la pérdida de agua por parte de las probetas en relación con el tiempo [ $M_e = f(t)$ ].

Hay que tener en cuenta que los resultados son profundamente afectados por las fluctuaciones de humedad. (Alonso et al., 1987)

El ensayo se ha realizado siguiendo la metodología descrita por Alonso, (1986) y la norma RILEM -25 PEM - TEST N° II.5, NORMAL 29/88., es decir,

1°-Las probetas se colocan en un recipiente aislado del exterior (cámara climática) donde se controla la temperatura ( $25 \pm 5^\circ\text{c}$ ) y la humedad ( $80 \pm 5\%$ ).

2°-Se calcula la pérdida de peso que experimentan las probetas al cabo de 1 min, 9 min, 16 min, 36 min, 49 min, 1h 04 min, 1h30 min, 2h, 4h, 6h, 12h, 24h, 36h, 48h, 60h, 72h, del inicio del ensayo. A partir de este momento se efectúa la pesada cada 24 horas hasta completar los 12 días.

3°- Finalmente para trazar la curva de secado, se usa como ordenadas el porcentaje de agua restante en la piedra en cada intervalo de tiempo ( $W_e$ ).

$$W_e = (M_i - M_o / M_o) \times 100$$

Donde;

$M_i$ : Peso de la muestra en cada intervalo de tiempo.

$M_o$ : Peso de la muestra seca.

#### **IV.2.2.1.3. Absorción capilar:**

Los materiales pétreos son conocidos por la capacidad de succionar agua por fuerzas capilares. Estos fenómenos afectan al material situado en las zonas bajas de los edificios, a los cuales puede llegar agua por ascensión capilar desde el subsuelo. Este fenómeno es debido al carácter hidrófilo que poseen los materiales rocosos (Alonso, 1988) y también a la configuración del sistema poroso (Torraca, 1982) que ejerce una tensión capilar.

La ascensión capilar depende de las características mineralógicas del material pétreo, de la pureza del agua, de la temperatura ambiente y sobretodo, del tamaño del poro.

La piedra es un material poroso hidrófilo y los poros pueden estar llenos de algún fluido (aire, agua, etc), por lo tanto se puede afirmar que, en los materiales lapídeos coexisten una fase sólida (la piedra), una fase líquida (agua) y una fase gaseosa (vapor de agua). El contenido en agua varía según las condiciones ambientales (temperatura, humedad relativa), y las características de la propia piedra (porosidad, geometría de los poros, grado de comunicabilidad de la red porosa).

En el proceso de interacción agua/piedra intervienen la tensión superficial, la presión capilar, y el ángulo de contacto.

Se define como tensión superficial ( $\gamma$ ) aquella fuerza por unidad de superficie que debe ser aplicada a la interfase entre dos fluidos para que estén en equilibrio. Así en un capilar el

fluido (líquido) forma un menisco en equilibrio con su vapor. Por tanto la superficie de separación es una esfera (burbuja de aire dentro de un líquido) el efecto de la tensión superficial es reducir la dimensión de la esfera.

Tendremos según la ecuación de La Place:

$$\Delta P = (P_1 - P) = 2 \gamma / r$$

En un tubo capilar sumergido en un líquido se considera como presión capilar ( $P_c$ ), la diferencia de presión  $\Delta P$  entre la fase vapor y la fase líquida.

En la Fig. IV.1 se puede establecer la relación entre la presión hidrostática del líquido y la presión capilar.

$$P_c = hg \Delta \rho$$

Donde;

$g$  = aceleración de gravitad

$\Delta \rho$  = diferencia entre la densidad del vapor y la del liquido

$h$  = altura de la columna del líquido

Por otra parte tenemos que el radio de curvatura del menisco, depende del radio del

$$\text{capilar: } r_p = r \cos \theta$$

Donde;

$r_p$  : radio del tubo capilar

$r$  : radio de la curvatura del menisco

$\theta$  : ángulo de contacto

De esta manera se puede establecer que:

$$\Delta P = (P_1 - P) = 2 \gamma / r \quad \text{con } r = r_p / \cos \theta$$

$$\Delta P = 2 \gamma (\cos \theta / r_p) = P_c$$

$$hg \Delta \rho = 2 \gamma (\cos \theta / r_p) \quad \Leftrightarrow \quad h = (2 \gamma / g \Delta \rho) \cdot (\cos \theta / r_p)$$

Resulta evidente, que la altura alcanzada por el agua en el tubo capilar depende de la tensión superficial, la naturaleza del líquido, del ángulo de contacto y del radio de capilar.

De manera general., un material poroso puesto en contacto con una película de agua, es capaz de succionar agua con una presión que es inversamente proporcional al tamaño de los capilares (Amoroso y Camaiti, 1997).

El ensayo de laboratorio consiste en determinar la velocidad con la que las probetas absorben agua por el mecanismo de succión capilar.

Este ensayo se ha realizado siguiendo la norma francesa homologada: B10-502 (1980); RILEM. 25 PEM. TEST N° II.6; NORMAL 11/85 – (CNR-ICR)

Se han utilizado siete probetas cúbicas de 5 cm de arista secadas a 100°C hasta obtener una masa constante.

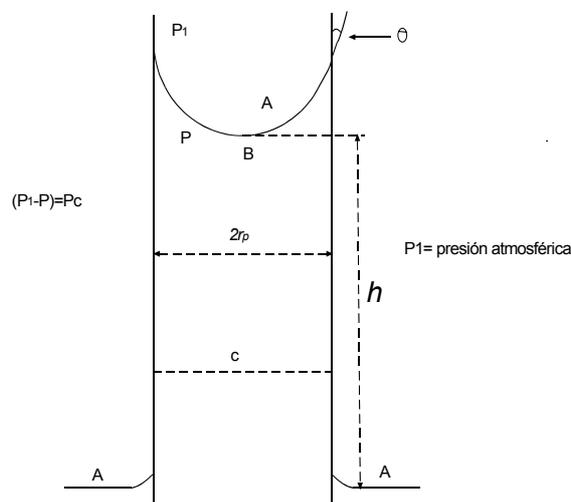


Figura IV.1: Resalto de un líquido en un tubo capilar.

▪ **Procedimiento:**

El ensayo se ha desarrollado a una temperatura de  $20 \pm 5^\circ\text{C}$  y una humedad de  $90\% \pm 5\%$ .

1- Secado de las probetas hasta masa constante. Enfriamiento en un desecador hasta la temperatura de  $20^\circ\text{C}$ .

2- La base de las probetas está sumergida en agua desionizada de temperatura comprendida entre  $15$  y  $20^\circ\text{C}$  hasta 2mm de altura.

El nivel de agua se mantiene constante durante todo el ensayo.

3- Durante las primeras 31 h. se realiza el pesaje de las muestras en intervalos marcados por números cuadrados perfectos (1, 4, 9, 16 etc. en minutos) hasta 24 h o 48 h. Se da por finalizado el ensayo cuando la cantidad total de agua absorbida permanece constante.

4- Se ha realizado el ensayo de succión capilar con probetas cuya cara de contacto es paralela a la estratificación y otra con probetas cuya cara de contacto con el líquido es perpendicular a la estratificación.

A partir de los valores registrados se determine una serie de parámetros como son:

- Incremento de masa en cada intervalo de tiempo respecto a la superficie de succión ( $M$  ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )).

$$M = M_i - M_o / S$$

Donde;

Mi: masa medida en cada intervalo de tiempo.

Mo: masa inicial de la probeta.

S: superficie de la cara de la probeta en contacto con el agua.

- Contenido en agua succionado por la probeta ( $S_t$ ), expresado en (%):

$$S_t = (M_i - M_o / M_o) \times 100$$

-Grado de saturación.  $S_i$  (%)

$$S_i = (S_t / W_s) \times 100$$

$S_t$ : contenido en agua de la probeta en cada intervalo de t.

$W_s$ : contenido máximo de agua que puede absorber la probeta.

- Coeficiente de absorción capilar. C.A.C. ( $\text{kg/m}^2\text{h}^{1/2}$ ). Este parámetro indica la velocidad de absorción de agua por las probetas.

$$\text{C.A.C} = M_a / \sqrt{t_a}$$

$M_a$ : valor de M en el punto de inflexión de la curva.

$\sqrt{t_a}$ : Valor del tiempo en el punto de inflexión de la curva.

#### **IV.2.2.1.4. Absorción de agua a baja presión (columna de agua):**

Cuando se aplica una columna de agua sobre un material poroso, el agua penetra dentro del material. El volumen de agua absorbida después de un tiempo determinado es una característica del material. La medida de la absorción de agua a baja presión es muy útil tanto en el laboratorio como *in situ* para:

- Caracterizar el material sano y para evaluar las modificaciones superficiales o las alteraciones que modifican la absorción de agua a nivel de la superficie.
- Caracterizar el efecto de un tratamiento de impregnación o de hidrofugación.
- Caracterizar el impacto (efecto) del envejecimiento natural.
- Evaluar el efecto de un envejecimiento natural o artificial de un tratamiento de hidrofugación o de consolidación. (RILEM, 1980).

#### ▪ **Procedimiento:**

El aparato utilizado consiste en un tubo graduado soldado en su parte inferior a un cilindro. Gracias a un reborde plano y circular puede ser aplicado sobre el material, se aplica sobre este reborde una plastilina para asegurar la impermeabilidad (Fig. IV.2).

La sección abierta de aplicación sobre el material es de  $5,7 \text{ cm}^2$  y el tubo vertical está graduado de 0 a  $4 \text{ cm}^3$ , cada división representa  $0,1 \text{ cm}^3$ . La altura de agua total entre

el medio de la sección de aplicación y la graduación superior es de 9,8 cm y corresponde a una presión de 961,38 Pa equivalente a la presión dinámica de un viento de 39,6 m/s o 142,6 Km/h.



*Fig.IV.2. Dispositivo experimental utilizado en el ensayo de absorción de agua a baja presión.*

- Se aplica el dispositivo contra el material mediante un cordón de plastilina .
- Se llena la columna por la abertura superior hasta la graduación 0.
- Se determina directamente a partir del tubo graduado la cantidad de agua absorbida por el material en función del tiempo. Los tiempos elegidos para efectuar la medida dependen de las características del material., pero generalmente se utilizan 2, 10, 15, 30 minutos y una hora.

Los resultados se representan en forma de gráficos de absorción de agua (volumen de agua absorbida en  $\text{cm}^3$ ), en función del tiempo en minutos.

A partir de los resultados obtenidos, se pueden comparar las cantidades de agua absorbidas después de un tiempo definido de aplicación de la columna de agua sobre la misma zona del material en dos estados diferentes (antes y después de la aplicación de un producto de consolidación o de hidrofugación). Esta relación pondrá en evidencia la variación de la porosidad en la superficie del material.

#### **IV.2.2.1.5. Permeabilidad al vapor:**

Este ensayo permite obtener información sobre la eficacia de los tratamientos de hidrofugación ante el agua y el vapor de agua, mediante la comparación del comportamiento experimental de las muestras tratadas y sin tratar. La permeabilidad al vapor de agua es un parámetro particularmente sensible a las posibles modificaciones

producidas en el sistema poroso por el ataque salino o por algún tipo de tratamiento de conservación aunque estas variaciones sean muy pequeñas.

El material utilizado en el ensayo es el siguiente:

- Vasos de vidrio de altura 13 cm.
- Una cámara climática, en la que se mantienen constantes la temperatura y la humedad relativa.
- Una balanza de precisión.

Para realizar este ensayo hemos tenido en cuenta las normas siguientes: - TC 58-VPM RILEM, NORMAL N° 21/85, Alonso (1990).

▪ **Procedimiento :**

- Se llena el vaso hasta la mitad de su altura con una solución saturada de la sal elegida, en este caso, una solución de NaCl.
- La probeta se coloca tapando el vaso, los espacios vacíos han sido cerrado mediante silicona.
- Se pesa la celda de medida (el dispositivo experimental con la probeta a ensayar) antes de colocarla en la cámara climática.
- La celda de medida se pesa periódicamente, aproximadamente cada 24 horas, hasta alcanzar una situación estacionaria.

Las variaciones de peso se representan gráficamente en ordenadas, frente al tiempo en horas.

Los parámetros que se calculan son las siguientes:

- A partir de la pendiente de la curva, y conociendo la superficie de la muestra, se calcula la cantidad de vapor de agua ( $q_v$ ) que pasa a través de la probeta por segundo ( $\text{Kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ).
- Se calcula el valor del coeficiente de permeabilidad al vapor o coeficiente de conductividad del vapor de agua.

$$q_v = \delta / h (p_1 - p_2)$$

$q_v$ : densidad de flujo de vapor de agua ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ )

$\delta$ : coeficiente de permeabilidad al vapor de agua ( $\text{kg/m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$ )

$h$ : altura o espesor de la probeta (m)

$p_1$ : presión parcial de vapor de agua de la atmósfera situada encima de la solución saturada ( $\text{N/m}^2$ )

$p_2$ : presión parcial de vapor de agua de la atmósfera existente en la cámara ( $\text{N/m}^2$ ).

La diferencia de presión ( $\Delta P$ ) se calcula a partir de la humedad relativa obtenida encima de la solución salina y la que se encuentra dentro de la cámara climática.

La humedad relativa del aire (HR) es la relación entre la presión parcial de vapor de agua a una temperatura fijada y la presión de saturación de vapor de agua a la misma temperatura.

$$HR \% = P/P' * 100$$

Donde;

P: presión de vapor de agua a una temperatura fijada.

P': presión de vapor de agua en saturación a una temperatura fijada

Hay que tener en cuenta que el valor de P' no es constante y que depende de la temperatura.

Aplicando la relación (1) a nuestro caso preciso para calcular los valores de  $P_1$  y  $P_2$ .

La difusión de vapor de agua es debida a la diferencia de concentración entre los componentes del aire, en nuestro caso preciso se produce un transporte molecular desde la celda de medida hacía fuera, atravesando la piedra. La densidad de este flujo saliente se puede calcular de la manera siguiente (a temperaturas inferiores a 50°C).

$$q_v = - \Delta P / \mu * N \quad (1)$$

- De la relación 1 se puede calcular el coeficiente de resistencia a la difusión de vapor de agua ( $\mu$ ):

$$\mu = - \Delta P / q_v * N$$

Donde;

N: constante de difusión de vapor de agua en el aire ( $5,4 \cdot 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ ).

#### **IV.2.2.1.6. Hinchamiento:**

Por definición es, el aumento de la longitud de la probeta debido a la absorción de agua a una temperatura y humedad relativa constantes (RILEM, 1980). Este ensayo tiene por objetivo determinar la dilatación por absorción de agua, por eso se mide, en función del tiempo, la variación de las dimensiones de la probeta debido a la absorción de agua. Este ensayo permite evaluar la magnitud de ciertos tipos de degradación y también permite evaluar la durabilidad de una piedra tratada o sin tratar.

▪ **Procedimiento :**

El número de las probetas utilizadas depende de la homogeneidad del material, pero nunca debe ser inferior a 2.

- Secar las probetas a  $60\pm 5^{\circ}\text{C}$  hasta masa constante, consideramos que esta masa ha sido conseguida cuando la diferencia entre 2 pesadas efectuadas a 24h de intervalo es como mucho 0,1% de la masa de la probeta.
- Enfriar las probetas secas en un desecador hasta temperatura ambiente y después se mide la longitud en las tres direcciones con tres comparadores (Fig IV. 3).
- Añadir agua dentro del recipiente hasta que la probeta se queda completamente sumergida.
- Coger las medidas de las dimensiones de la probeta registrados por cada comparador periódicamente y durante 72 h.
- Calcular el hinchamiento siguiendo la siguiente fórmula:

$$H = (L_1 - L_0) / L_0$$

Donde;

$L_1$  (mm): longitud a 72 h.

$L_0$  (mm): longitud inicial.

- La curva de hinchamiento se e traza representando la variación longitud ( $\bullet$ ) en función del tiempo.



*Fig. IV.3: dispositivo utilizado para medir el hinchamiento de las areniscas.*

## IV.2.2.2. Propiedades mecánicas:

### IV.2.2.2.1. Resistencia a la compresión:

La resistencia a la compresión de un material es la carga máxima por unidad de superficie que es capaz de soportar el material hasta la rotura, cuando está sometido a una compresión simple (UNE 22-185-85).

$$t = G/A \text{ (Kg/m}^2\text{)}$$

Donde;

t: Esfuerzo de compresión

G: Carga máxima en Kg

A: Promedio del área de la base superior e inferior

Se define también como la resultante de la resistencia de los componentes mineralógicos y de sus enlaces intracristalinos (RILEM, 1980).

Este ensayo puede dar información sobre la magnitud de ciertos tipos de alteración, y de como se puede evaluar la idoneidad de los tratamientos de impregnación, siendo éstos métodos de reforzamiento mecánico de la piedra.

#### ▪ Procedimiento:

El ensayo se realizó en seco, según la norma RILEM. Las muestras de (5x5x10) se secaron a  $60 \pm 5^\circ\text{C}$  hasta peso constante. Las probetas se colocan entre las mordazas de la prensa bajo un esfuerzo compresivo uniaxial vertical creciente. Este esfuerzo es perpendicular a la superficie de rotura y está aplicado en el centro de la cara. La carga se aplica de forma uniforme y continua, a velocidad prefijada.

### IV.2.2.2.2. Ensayo de desgaste por rozamiento:

Las normas que suelen usarse para la realización de este ensayo son numerosas. Dentro de ellas cabe destacar la UNE 22-183-85 y la norma RILEM (1980) y en general, se utiliza una pista de desgaste con plataforma giratoria sobre la que se colocan las dos probetas cúbicas que se van a desgastar.

Previamente se determina el volumen de las probetas mediante una balanza hidrostática y se mide la superficie de desgaste. Se pone en marcha la pista y se va vertiendo el agua y el abrasivo periódicamente sobre la superficie de rozamiento entre la probeta y la plataforma de desgaste. El ensayo se repite sucesivamente sobre las otras tres caras que forman el tetraedro con la primera cara desgastada.

Una vez desgastadas las tres caras, se mide el nuevo volumen con el mismo procedimiento.

En este trabajo ha sido muy difícil aplicar este método por el carácter petrológico de la roca, ya que la ausencia de la fase de cementación hace que la roca sea muy vulnerable al desgaste. Además, la precisión necesaria que debemos obtener para poder evaluar la idoneidad de los tratamientos de consolidación es muy difícil de obtener con este ensayo.

Por estas razones, hemos realizado otro ensayo de desgaste por rozamiento utilizando la metodología seguida para determinar el desgaste de los materiales cerámicos (Fig. IV. 4). Este ensayo permite una comparación muy fina y precisa entre las muestras tratadas y sin tratar.

El ensayo se realizó siguiendo la normativa española UNE-EN ISO 10545-6, realizando algunas modificaciones para adaptarla a la naturaleza del material y de los objetivos buscados.

El aparato está formado esencialmente por un disco giratorio, una tolva de almacenamiento con un dosificador del material abrasivo, un porta probeta, y un contra peso. El disco tiene un diámetro de  $(200 \pm 0,2 \text{ mm})$  y un grosor de  $(10 \pm 0,1 \text{ mm})$  el cual gira a una velocidad de 75 r. m.

El abrasivo utilizado es el óxido de aluminio blanco fundido de tamaño de grano F 80, según la Norma ISO 8486-1.

La resistencia a la abrasión profunda se expresa como el volumen,  $V$ , en milímetros cúbicos, de materia eliminada, y se calcula a partir de la longitud  $L$  de la huella mediante la ecuación:

$$V = [(\pi \alpha / 180) - \text{sen } \alpha] (h \cdot d^2 / 8) \quad (1)$$

$$\text{Con: } \text{sen } (0,5\alpha) = L / d$$

Donde;

A: ángulo, en grados, determinado por la cuerda de longitud  $L$ , respecto al centro del disco giratorio

h: grosor, en milímetros cúbicos, del disco giratorio.

d: diámetro, en milímetros, del disco giratorio.

L: longitud, en milímetros, de la cuerda

El valor de  $V$  depende del valor de  $L$ , como muestra la ecuación anterior. Reemplazando  $\alpha$  por su valor, la ecuación (1) se simplifica de la manera siguiente:

$$\alpha = 2 [\arcsen (L/d)] \leftrightarrow V = [\pi (2 \arcsen (L/d))/ 180 - 2 \arcsen (L/d)] \times (h \cdot d^2)/8$$

Así la medida del volumen perdido es proporcional a la medida de la longitud de la huella obtenida ( $L$ ).

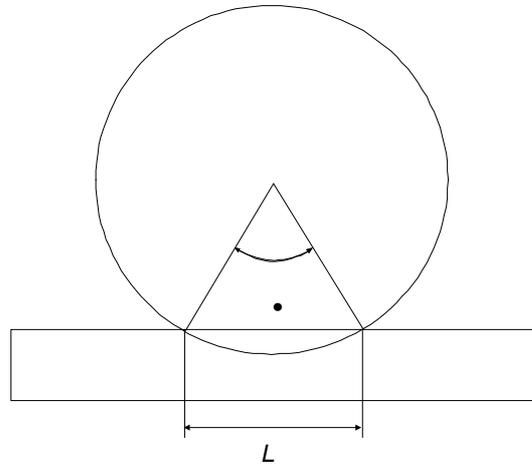


Fig.IV.4:Esquema gráfica donde se define la cuerda.

#### IV.2.2.3. Porosimetría de mercurio.

El comportamiento físico de las rocas depende tanto de la porosidad total como del tamaño, forma y grado de conexión entre los poros. Una de las técnicas más sencillas utilizada para el estudio de algunos de estos últimos aspectos, es la porosimetría de mercurio, que permite la determinación de la porosidad abierta y la porosidad atrapante (Rodríguez y García, 1997; Prada, 1994; De las Cuevas, 1997) y también, permite determinar la distribución del rango de radio de acceso de los poros.

Este método consiste en la tendencia que tiene el mercurio, a formar un ángulo de contacto de más de  $90^\circ$  con una superficie sólida (no moja) y por consecuencia, no penetra espontáneamente en los poros y necesita la aplicación de una presión externa que supera la presión capilar (Gregg y Sing, 1982; Camaiti y Amoroso, 1997)

De esta manera, se aplica la ecuación de Washburn que relaciona la medida de poros con la presión aplicada en un sistema de capilares interconectados asimilándolos a una forma cilíndrica:

$$P = 2\gamma \cos \theta / r$$

Donde  $r$  es el radio del poro en nanómetros,  $P$  la presión aplicada en Mpa,  $\theta$  el ángulo de contacto y  $\gamma$  la tensión superficial del mercurio. Si consideremos los valores teóricos de  $\gamma = 48 \cdot 10^{-2} \text{ N/m}^2$  y  $\theta = 141,3^\circ$ , entonces la ecuación se simplifica de la manera siguiente:

$$r = 75000 / P$$

En el caso de considerar que la forma de los poros es de tipo rejilla (red), entonces la presión aplicada es:

$$P = 2\gamma \cos \theta/D$$

siendo D la distancia entre las paredes de la abertura del poro.

La penetración de un líquido como el mercurio –que no moja- en un material rocoso, puede asimilarse con el drenaje de un líquido que moja como el agua; inversamente, su retirada corresponde a los procesos de imbibición de agua

El cálculo de la distribución de las dimensiones de los poros por este método, como el resto de los métodos indirectos, implica la posibilidad de errores relacionados con la simplificación dada a la estructura del poro. La estructura real de los poros es siempre mucho más compleja teniendo una geometría muy irregular. En tal caso, la ecuación propuesta por Washburn no es siempre correcta, pero hay que tener cuenta las variaciones geométricas y adecuar el sistema a un modelo correcto. Las correcciones deben considerar aquellos poros que no tienen una forma cilíndrica, por ejemplo, elíptica o la que se acerca más a la forma real.

La utilización de presiones muy elevadas que pueden alcanzar 200 Mpa, pueden generar un aumento del volumen de poros provocado tanto por la fractura de las paredes de poros que están en contacto con poros cerrados como por la deformación elástica que provoca la aparición de microfisuras. Otra posibilidad es que la presión aplicada puede implicar un efecto compactador por lo que algunos accesos superficiales serán estrechados o cerrados por completo (Rodríguez y García, 1997).

Pero este método da útiles indicaciones cuantitativas en cuanto a la meso y macroporosidad de una muestra en tiempo relativamente breve.

En este apartado se han estudiado las diferentes variedades de la arenisca miocénica a fin de determinar la acción de la variación de los parámetros petrográficos, sobre la forma y el tamaño de los poros.

Se han obtenido las curvas de distribución del volumen poroso en función del radio de acceso de poro. La porosidad se determina a partir del volumen total de mercurio introducido bajo presión en la muestra de roca. (De las Cuevas, 1997).

Los parámetros obtenidos a lo largo del ensayo son:

- Porosidad total
- Densidad real
- Densidad aparente

Se ha calculado también a partir de las curvas de intrusión de mercurio. Los porcentajes correspondientes a los diferentes accesos de poros que presenta la roca.

- Macroporosidad
- Microporosidad
- Infraporosidad
- Porosidad atrapante

Estos últimos parámetros nos permiten realizar una partición del volumen poroso accesible al mercurio, en cuanto el grado de comunicabilidad de los poros (porosidad libre, porosidad atrapante) y al tamaño de sus accesos (macroporosidad, microporosidad i infraporosidad).

#### **IV.2.3. ENSAYOS DE ALTERABILIDAD:**

Los materiales rocosos, tanto en cantera como en obra, están sometidos a alteraciones de origen físico, químico y biológico. Estas alteraciones están controladas por factores:

- Extrínsecos, es decir, factores relacionados con el medio ambiente (temperatura, humedad, componentes naturales y contaminantes del aire) teniendo en cuenta no sólo la intensidad de estos parámetros sino también su oscilación y/o ritmicidad.
- Intrínsecos, que dependen de las características petrográficas, químicas, físicas y mecánicas de la roca.

Las formas de alteraciones son el resultado de la combinación entre ambos factores, intrínsecos y extrínsecos.

Una piedra colocada en un edificio se altera con el paso del tiempo. Esta alteración, en general., es demasiado lenta para poder hacer un seguimiento en tiempo real. Además, los factores extrínsecos involucrados en la alteración suelen ser numerosos, difíciles de ser clasificados y cuantificados. Los factores intrínsecos son también difíciles de reproducir y controlar en el caso de no disponer de roca original que no esté alterada. Sin embargo, los ensayos de envejecimiento artificial permiten reproducir en poco tiempo, es decir, de un modo acelerado, dichos procesos y permiten también obtener conclusiones sobre la durabilidad de la roca y sus mecanismos de alteración.

Los ensayos de alterabilidad reproducen selectivamente los efectos de cada factor de alteración por separado (agua, temperatura, hielo, sales, contaminantes, etc...), y permiten cuantificar los daños producidos por cada uno de ellos.

Los ensayos de alterabilidad son muy diversos, los más utilizados son los siguientes:

- Ciclos de cristalización de sales.
- Ciclos humedad-secado.
- Ciclos hielo-deshielo.

También pueden realizarse otros ensayos más complejos como son:

- Ataque con ácidos
- Ensayos de simulación con atmósfera contaminada (SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>)
- Ensayos de simulación de la acción solar y la intemperie: Fade-Ometer y Weather-Ometer.

En este trabajo, solo realizaremos el ensayo de alteración mediante sales solubles, en concreto mediante el sulfato sódico cuyos mecanismos de alteración son muy bien conocidos, cuantificados y están normalizados.

#### **IV.2.3.1 Cristalización de sales solubles:**

Las propiedades químicas y físicas de cada tipo de sal determinan su comportamiento y en particular, su acción nociva para los materiales de construcción

Las sales actúan, principalmente, a través de mecanismos de tipo físico aunque algunas de ellas, como los carbonatos de sodio o de potasio, al ser alcalinos, desarrollan acciones de tipo químico y pueden atacar por ejemplo los silicatos presentes en un granito (Bernabé et al., 1995). Este tipo de ataque químico es poco común, generalmente, son las propiedades físicas de las sales por ejemplo, la solubilidad, la hidratación y la humedad relativa de equilibrio (HRE) las que determinan la forma, la distribución y la naturaleza de las alteraciones producidas.

El producto de solubilidad de las sales es muy variable. A partir de una solución que contenga diversos aniones y cationes serán las menos solubles las que primero precipitan. Este hecho se define como precipitación secuencial.

Este proceso de precipitación controla la distribución o localización de las sales en un monumento, es decir, si en un edificio hay una solución con diversos aniones y cationes, los menos solubles precipitarán antes y por tanto, más cerca de la fuente de contaminación. Esto explica tanto la zonación salina que aparece en las humedades de un

muro como las bandas de cristalización de composición diferente que se observa en los casos de ascensión capilar (Arnold y Zehender, 1989).

La humedad relativa de equilibrio de una solución salina (HER), representa la humedad relativa de la atmósfera que está en contacto con la disolución en un medio cerrado. Su valor depende de la temperatura y de la naturaleza de la solución salina. Pero en un monumento, la solución salina no se encuentra jamás en contacto con una atmósfera cerrada por razones evidentes y, por tanto, tendremos una oscilación del valor de la humedad relativa. Estas variaciones en la humedad relativa constituyen otro importante factor que controla la precipitación salina.

Si la humedad relativa ambiental es superior a la humedad relativa de equilibrio de la sal., ésta estará en solución en el interior de los poros. Pero si la humedad relativa ambiental es inferior a la humedad relativa de equilibrio de la solución, la sal cristalizará a partir del momento en que la solución alcanza el punto de saturación. Así, independientemente de otras propiedades susceptibles de influir sobre el carácter nocivo de la sal., las sales cuyo HRE se encuentra dentro del campo de oscilación diario o estacionario de la HR, son más nocivas que las demás sales, porque los ciclos disolución-cristalización serán más frecuentes (Vergés et al., 2001). Pero también, hay que tener presente que, una variación diaria de la humedad relativa no es suficiente para hacer cristalizar, deshidratar y volver a disolver las sales, excepto en unos casos muy excepcionales (Arnold y Kueng, 1985). Es necesario un largo periodo de insolación sin aporte de agua líquida para permitir la cristalización de las sales a temperatura ambiental. Esto quiere decir que el número real de ciclos de cristalización de sales es inferior al número de ciclos de oscilación de la humedad relativa.

El efecto nocivo de una sal soluble sobre el material poroso ha sido siempre relacionado con la presión de cristalización y la presión de hidratación de la sal (Correns, 1949). La presencia de agua en la red cristalina provoca un aumento del volumen molecular de la sal., lo que se denomina como proceso de hidratación. El ejemplo más conocido es el caso de las sales del sulfato sódico, tenardita y mirabilita, en el que, el cambio de estado de la fase anhidra (tenardita) a la fase hidratada (mirabilita) provoca un aumento de volumen del orden del 308% (Martín, 1990).

Esta propiedad ha sido ampliamente utilizada, en los ensayos de la alteración artificial acelerada (Iñiguez Herreno, 1961; Domaslowski, 1981 y 1982; Arnold y Kueng, 1985; Esbert y Marcos, 1983; Alcalde y Martín 1990; Grossi y Esbert, 1994; Arnold y Zehender, 1989). Winkler et al., (1972) estudiaron la alteración originada por la presión de

cristalización del sulfato sódico. La presión de hidratación ha sido el objeto de las investigaciones de Winkler et al., (1970); Knake and Wonerberg (1975) y Goudie (1986). Durante la última década, numerosos investigadores se han dedicado al estudio de la hidratación del sulfato sódico anhidro (tenardita) y su transformación en sulfato sódico decahidratado (mirabilita). Cabe destacar los trabajos de Macmahon et al., (1992) y Dohen (1994).

Para entender el mecanismo de alteración producido por el sulfato sódico es fundamental comprender como funciona el sistema sulfato sódico-agua.

A partir de una solución saturada, la temperatura de la solución salina condiciona la precipitación o bien de la fase anhidra o bien de la fase hidratada del sulfato sódico. Si la temperatura de la disolución está por debajo de 32,4°C, al alcanzar la sobresaturación, precipita la fase hidratada (mirabilita), pero si la temperatura de la disolución supera los 32,4°C, precipita la fase anhidra (tenardita).

Los estudios de Seidell y Linke (1965) y Arnold (1981) muestran que en contacto con una solución saturada de sulfato sódico la mirabilita es estable a temperaturas por debajo de 32,4°C y también si la humedad relativa es superior al valor crítico (82%) establecido por Sperling (1985).

A temperaturas de secado por debajo de 32,4°C y a humedad relativa por debajo de la humedad relativa crítica o a temperaturas superiores a 32,4°C independientemente de la HR, la mirabilita se deshidrata para cristalizar en forma de tenardita.

Centrándose en la alteración del material poroso, Macmahon et al., (1992) muestran, mediante diferentes ensayos de alteración con el sulfato sódico que los resultados más agresivos se obtienen durante una cristalización rápida de la mirabilita a partir de una solución sobresaturada a temperatura entre 24 y 27°C. Este mismo trabajo muestra también que la tenardita no se hidrata a mirabilita en estado sólido. Estos resultados han sido confirmados por Dohene (1994) que mediante una exposición de grandes cristales de tenardita al vapor de agua, forman una película de mirabilita que impide la hidratación completa del cristal y muestra a continuación que la hidratación pasa obligatoriamente por la destrucción (descomposición) de la red cristalina de la fase no hidratada.

Esta recapitulación de la información concerniente a los mecanismos de hidratación y de cristalización de las diferentes fases del sulfato sódico, nos permite explicar el mecanismo de alteración originada por el sulfato sódico, propuesto por los ensayos normalizados (RILEM, DIN, ASTM). Estos ensayos consisten básicamente, en la

repetición de un número fijado de ciclos, en cada uno de los cuales las muestras son sumergidas completa o parcialmente, dejándose secar a continuación para que cristalice la sal (tenardita). Después del primer ciclo, la inmersión de nuevo en la solución salina produce la hidratación de la tenardita cristalizada en los poros de la primera inmersión y se transforman en mirabilita. En efecto, la nueva inmersión de las muestras en la solución salina provoca la disolución de los cristales de tenardita, en este momento preciso, la disolución salina contenida en los poros se vuelve supersaturada (Macmahon, 1992) a causa de la disolución de la tenardita. Como la temperatura de la solución tal como lo exigen las normativas es inferior a 32,4°C, precipita la mirabilita. Esto genera tensiones y provoca la pérdida de cohesión del material por la diferencia de volumen que presenta con respecto a la tenardita. El secado a altas temperaturas provoca la deshidratación de la mirabilita y su paso a tenardita. Y así, repitiendo el mismo mecanismo de hidratación-deshidratación se produce una pérdida sucesiva de cohesión que origina el aumento progresivo de la porosidad en función del número de los ciclos salinos realizados. En efecto, las presiones de cristalización y de hidratación generan microfisuras y fracturas, que aumentan progresivamente la porosidad y por tanto aumenta, la cantidad de sal cristalizada en el espacio poroso. En definitiva, se consigue un proceso acelerado de alteración.

▪ **Ensayo:**

En este trabajo, se ha realizado el ensayo de envejecimiento artificial acelerado mediante la cristalización del sulfato sódico cuyos mecanismos de alteración son muy bien conocidos, y también muy bien normalizados, siguiendo las normativas más conocidas entre las cuales cabe destacar las de la RILEM (1980), ensayos V1-a, V1b, V2 y también la D.I.N- norma 52111, A.S.T.M. –norma: C 88 –76 y la del laboratorio del transporte – norma: NLT 158/72.

Este ensayo puede verse afectado por distintas variables (Price, 1978; Marschner, 1978) tales como:

- La naturaleza y concentración de la sal,
- Las características de la inmersión,
- Las características de secado (temperatura, tiempo y humedad relativa ambiente)

Debido a su agresividad, el sulfato sódico, da resultados más intensos y significativos (Iñiguez Herrero, 1961; Price, 1978; Domaslowski, 1982; Alonso, Esbert et al., 1987; Arnold y Kueng, 1985; Arnold y Zehnder, 1990) que otras sales.

Las concentraciones de las disoluciones empleadas son variables, van desde saturadas (20% para el  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  a 20°C), hasta disoluciones al 10 % siempre en función de las características del material y de los resultados buscados. Las normas RILEM recomiendan disoluciones al 14% o al 10% teniendo en cuenta, que al disminuir la concentración de la disolución disminuyen los daños producidos.

Se realizan distintos tipos de inmersión:

- Inmersión total., se toman 5 volúmenes de disolución salina por volumen de roca.
- Inmersión parcial., la solución salina sube en las muestras por fuerzas capilares. Según las recomendaciones RILEM, la inmersión para cubos de 5 cm de arista es de 0.5 a 1 cm.

La solución salina debe mantener una temperatura, inferior a 32,4°C para asegurar la cristalización de la fase hidratada del sulfato sódico (Arnold, 1976).

El tiempo de inmersión varía según las normas y autores de 2 a 24 h, pero según algunos investigadores no se observan variaciones en el los daños producidos más allá de las primeras horas de inmersión. La norma RILEM fija 2 horas de inmersión, mientras la DIN y la ASTM proponen de 16 a 18 horas de inmersión.

El secado se hace generalmente a altas temperaturas, ya que se ha mostrado que los efectos obtenidos a bajas temperaturas no son comparables a los obtenidos a altas temperaturas (Baronio, 1983, Binda y Baronio, 1984). La norma RILEM recomienda un secado a 105 °C durante un tiempo de 10 a 15 horas para los materiales no tratados con productos de impregnación o de hidrofugación. La DIN recomienda un secado a 105 –110 °C durante un tiempo de 6-7 horas. La ASTM, propone un tiempo de secado de 4 horas a una temperatura de 105 °C. Se recomienda mantener una humedad relativa alta en el interior del horno al principio del proceso de secado, ya que de esta manera disminuye la migración de las sales hacia la superficie acentuando así los daños producidos en el interior de la piedra.

La etapa final de un ciclo de cristalización de sales, es el proceso de enfriamiento de las muestras antes de volver a comenzar una nueva inmersión. Este proceso requiere un tiempo mínimo de 2h en un ambiente suficientemente húmedo, ya que, de esta manera

comienzan los procesos de hidratación de las sales cristalizadas en los poros del material rocoso.

Según la norma RILEM, cada ciclo consta de 24h, en el que se destacan tres etapas:

1. Inmersión de las probetas durante 2 horas en la solución de sal previamente preparada a 10%. Para un desarrollo correcto del ensayo, la solución ha de estar a temperaturas inferiores a 32,4°C para evitar que cristalice la fase anhidra de la sal,
2. Secado de las probetas, durante 19 horas en un estufa a 105° para material no tratado y a 60°C para material tratado con polímeros plásticos. En este caso, el secado de las muestras no tratadas se ha realizado también a 60 grados, para poder comparar los resultados obtenidos por la alteración del material tratado y sin tratar bajo las mismas condiciones experimentales.
3. Enfriamiento de las probetas en un desecador, a temperatura y humedad constantes, durante 3 horas.

Antes de sumergir las probetas de nuevo en la solución salina, se pesan y se anotan las modificaciones o cualquier tipo de alteración superficial que hayan sufrido.

Aunque el ensayo consta normalmente de 15 ciclos, el número de ciclos a realizar dependerá tanto de la naturaleza de la piedra como de su durabilidad.

Al acabar el ensayo, se lavan las probetas con agua destilada, se secan en la estufa hasta alcanzar un peso constante y se pesan para obtener la pérdida de masa que han sufrido. Esta pérdida  $\Delta M$  (%) viene determinada por:

$$\Delta M = (M_i - M_o / M_o) \times 100$$

Donde;

M<sub>i</sub>: masa final., tras lavar la probeta y secarla.

M<sub>o</sub>: masa inicial en seco.