

## **VII. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL SIN TRATAR**

## **VII.1. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL DE LA CANTERA:**

### **VII.1.1. ESTUDIO PETROFÍSICO:**

#### **VII.1.1.1. Petrografía:**

##### **VII.1.1.1.1. Descripción de los componentes:**

En este capítulo se estudian solamente las características petrográficas que condicionan la durabilidad de esta arenisca y su comportamiento en obra, ya que la descripción petrográfica detallada de las muestras del nivel explotado por las canteras romanas se ha realizado en el capítulo anterior (ver estudio petrográfico de la serie estratigráfica del mioceno inferior, tramo inferior, nivel 3).

El muestreo en la cantera se realizó según la granulometría de las areniscas, el color y la presencia o no de laminaciones sedimentarias, únicas características petrográficas distinguibles en el campo. De hecho, se han diferenciado dos grandes grupos de variedades de arenisca:

- areniscas finas con variación de color de blanco hasta naranja, con o sin laminaciones.
- areniscas gruesas con la misma variación de color, con o sin laminaciones.

El estudio petrográfico detallado de estas dos variedades de arenisca, se ha llevado a cabo en el microscopio de polarización mediante contaje sobre lámina delgada de las especies minerales presentes en la roca.

Los resultados obtenidos (Tabla. VII.1) muestran que las dos variedades de areniscas muestreadas pueden ser subdivididas en diferentes categorías texturales en relación a la presencia o no de arcillas, el tamaño de grano y la selección. Por lo tanto, podemos diferenciar según estas características las siguientes categorías texturales o litotipos:

- 1- Areniscas finas sin arcillas, con selección extremadamente buena a muy buena.
- 2- Areniscas finas con arcillas, con selección extremadamente buena a muy buena.
- 3- Areniscas de tamaño de grano medio sin arcillas, con selección moderada.
- 4- Areniscas de tamaño de grano medio con arcillas, con selección moderada.

Estas 4 variedades pueden a su vez presentar laminaciones sedimentarias, que implican la existencia de pequeños cambios granulométricos entre láminas (discontinuidades, anisotropías).

Tabla VII. 1: Porcentaje de los componentes de las variedades de arenisca muestreadas y utilizadas en los ensayos físicos.

LÁMINA	Tamaño de grano fino			Tamaño de grano medio a grueso			
	RD	MB9	MB1	MB12	MB14	GG	MB13
Componentes	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
<b>Cuarzo detrítico (NCE)</b>	<b>71,2</b>	<b>71,5</b>	<b>69,2</b>	<b>74,7</b>	<b>76,8</b>	<b>81,2</b>	<b>71,6</b>
Q. monocristalino	65,4	63,5	58,0	57,4	70,4	64,9	65,4
Q. policristalino fino	-	-	-	1,0	0,5	0,2	-
Q. policristalino grosero	0,8	1,7	1,7	5,5	1,4	3,0	1,0
Q. metamórfico	-	0,6	-	0,3	0,2	2,8	0,4
Q. sintaxial heredado	0,8	2,3	0,6	0,9	0,2	0,8	1,2
Q. en FR. plutónico	-	-	-	-	-	-	0,2
Q. monocristalino en c-c	3,2	1,9	4,8	4,5	2,7	5,4	2,3
Q. policristalino en c-c	-	0,2	0,4	0,2	-	-	1,0
Q. monocrist. ext. ondulada	0,8	0,6	3,5	4,1	0,9	3,6	-
Q. monocrist. en c.L	-	0,6	0,2	0,9	0,5	0,4	0,2
Q. policrist. ext. ondulada	-	0,2	-	-	-	-	-
<b>Feld. K detrítico</b>	-	<b>0,6</b>	<b>0,4</b>	<b>0,7</b>	<b>0,5</b>	-	-
Microclina	0,2	0,6	0,4	0,7	0,2	-	-
Ortosa	-	-	-	-	0,2	-	-
Feld. en FR. Plutónico	-	-	-	-	-	-	-
<b>Accesorios</b>	-	<b>0,2</b>	<b>0,8</b>	-	-	-	-
Moscovita, Biotita	-	-	-	-	-	-	-
Turmalina, Zircón	-	-	0,4	-	-	-	-
Bioclastos	-	-	-	-	-	-	-
Chert	-	-	-	-	-	-	-
opaco	-	0,2	0,4	-	-	-	-
<b>Matriz</b>	-	<b>0,4</b>	-	<b>0,7</b>	-	-	-
Matriz siliciclástica	-	0,4	-	0,7	-	-	-
<b>Total diagenético</b>	-	<b>10,4</b>	<b>1,3</b>	<b>9,2</b>	<b>4,3</b>	<b>1,0</b>	<b>3,5</b>
Coating ferruginoso	-	-	0,2	-	-	-	-
Cemento ferruginoso	-	0,2	-	-	-	-	-
Epimatriz	-	-	-	-	-	-	-
Coating arcilloso	5,4	10,2	1,2	9,2	4,3	1,0	3,5
<b>Porosidad</b>	<b>23,3</b>	<b>16,9</b>	<b>28,3</b>	<b>14,0</b>	<b>18,5</b>	<b>17,8</b>	<b>24,9</b>
Intergranular	23,3	16,7	26,6	13,9	18,0	17,8	24,5
Fractura en Q	-	0,2	1,7	0,2	0,5	-	0,4
<b>Volumen granular (%)</b>	<b>71,2</b>	<b>72,3</b>	<b>70,3</b>	<b>75,3</b>	<b>77,2</b>	<b>81,2</b>	<b>71,6</b>
<b>Volumen intergranular (%)</b>	<b>28,6</b>	<b>27,5</b>	<b>27,9</b>	<b>23,8</b>	<b>22,3</b>	<b>18,8</b>	<b>28,0</b>
<b>Tamaño de grano</b>	0,2	0,2	0,15-0,2	0,42	0,42	0,42	0,2
<b>Esfericidad</b>	alta	alta	alta	alta-media	alta-media	alta-media	alta
<b>Redondez</b>	red.	red.	red.	red.	red.	red.	red.
<b>Selección</b>	ext. B	m B	m B	mod.	mod.	mod.	m B

red: redondeados, ext. B: extremadamente buena, mod.: moderada, m.B.: muy buena.

Como se puede observar en la Tabla VII.1, las características petrográficas de estas variedades de arenisca son muy similares a las descritas en el apartado VI.2. En general, están compuestas mayoritariamente por cuarzo (69-81%), su porosidad varía de 14 a 28 % y el

porcentaje de arcillas de infiltración es variable (0 a 10%). Como accesorios destaca la presencia de zircón, turmalina y feldespatos potásicos.

Observando los porcentajes de porosidad, se puede concluir que, a características petrográficas similares (redondez, selección, esfericidad, tamaño de grano), las muestras con porcentaje alto en arcillas (9-10%) presentan menos porosidad (casi la mitad) que las muestras que no presentan arcillas, y que este porcentaje es muy bajo (1-5%). Esto es debido a que las arcillas ocupan parte del volumen intergranular inicial.

También se puede observar que las muestras mal seleccionadas presentan un porcentaje de porosidad más bajo que las muestras bien seleccionadas. Esto es debido a que durante el proceso de enterramiento y bajo la misma presión, la arena mal seleccionada se compacta más, dada la mayor posibilidad que tiene para redistribuir los granos dentro de la porosidad, en función de su tamaño. En cuanto al tamaño de grano, esta característica no aumenta ni disminuye el porcentaje de porosidad como ya fue demostrado por Beard y Weyl (1973).

#### **VII.1.1.1.2. Descripción de la compactación de la arenisca:**

##### ***VII.1.1.1.2.1. Metodología:***

Beard y Weyl (1973) investigaron la relación entre porosidad, permeabilidad y textura en una mezcla artificial de arena, para determinar exactamente los valores de estos parámetros para sedimentos no consolidados, con diferentes tamaños y selecciones. Los valores de porosidad determinados por estos autores han servido para deducir la porosidad inicial, es decir, la anterior a la compactación, de las areniscas ensayadas, ya que presentan texturas muy similares a las de la mezcla artificial del estudio de Beard y Weyl (1973). Mediante un contaje sobre lámina delgada, según el método de Gazzi-Dickinson (Ingersoll et al., 1984), se ha determinado el porcentaje de la porosidad inicial que poseen estas areniscas en la actualidad. Para el caso de una arenisca sin matriz ni cemento, litificada por compactación, la porosidad perdida por compactación se determina a partir de la diferencia entre la porosidad inicial (arenisca no consolidada) y la porosidad actual o final, determinada a partir del contaje. Pero en nuestro caso, no se puede determinar el valor de la porosidad perdida por compactación teniendo sólo en cuenta la porosidad intergranular, debido a la presencia de la matriz arcillosa, que ocupa una parte de la porosidad. Por ello, se han tomado en consideración los trabajos de Grabowski et al. (1987); Paxton et al. (1990); Szabo y Pastón (1991); Lundegard (1992); Stone et al. (1993); Stone y Siever (1993); Hedari (2000) y Paxton et al. (2002), en los que se

especifica que para estimar la compactación de la roca hay que tener en cuenta todo el volumen intergranular (porosidad, cemento, matriz) y no solo el volumen de la porosidad. Por esta razón, en este trabajo el grado de compactación de la roca se ha estimado a partir del volumen intergranular perdido por compactación (VIG compactado), obtenido a partir de la diferencia entre el volumen intergranular observado (VIG final) y el volumen intergranular inicial (VIG inicial). Este último ha sido determinado a partir de los valores dados por Beard y Weyl (1973) para areniscas no consolidadas y de texturas similares a las observadas.

#### **VII.1.1.1.2.2. Resultados y discusión:**

En la Tabla VII.2 se muestra la relación existente entre el tamaño de grano y la compactación.

Tabla VII.2: Relación tamaño de grano-compactación - litificación:

	MB1	MB2	RD	MB5	MB7	MB6	GG
VIG inicial	40,80	40,80	42,4	34,2	34,2	40,80	34
VIG final	27,94	27,5	28,4	23,29	22,32	24,90	17,84
VIF	12,86	13,3	14	10,91	11,88	15,3	16,34
Permeabilidad	14	29	30	28	28	29-76	28
Nº C-C	5,21	2,11	3,16	4,65	2,73	3,3	5,41
Arcillas (%)	1,16	10,19	5,33	9,31	4,33	3,5	1
Selección	m. B	m. B	ext. B	mod.	mod.	m. B	mod.
T.G (mm)	0,15-0,2	0,2	0,2	0,42	0,42	0,2-0,42	0,42
Redondez	red.	red.	red.	red.	red.	red.	red.

VIG inicial: Volumen intergranular inicial,

VIG final: Volumen intergranular final,

VIF compactado: Volumen intergranular perdido por compactación,

Nº C-C: Número de contactos cóncavo-convexos,

T.G (mm): Tamaño de grano,

m. B: Muy bien seleccionada,

ext. B: Extremadamente bien seleccionada,

mod.: Moderadamente seleccionada,

red.: redondeados.

Observando los valores de VIG compactado se puede afirmar que las muestras finas han sufrido una mayor compactación. Eso es debido a las siguientes razones:

Para una misma presión aplicada, una arena bien seleccionada se compacta menos mecánicamente que una arena mal seleccionada, ya que la última tiene más posibilidades de reducir el espacio intergranular mediante la reorganización de las partículas. Además, la arena bien seleccionada se compacta menos químicamente que la arena mal seleccionada, puesto que presenta un menor número de contactos entre granos y, por tanto, menos posibilidades de

contactos de presión-disolución. Por otra parte, y teniendo en cuenta el tamaño de las partículas, las muestras de tamaño de grano fino presentan más contactos entre granos (Tabla VII.3 y Fig. VII.2A) que las de tamaño medio (Fig. VII.2B), lo que provoca que, durante la compactación química, se produzca una mayor superficie de contactos de presión disolución en las areniscas finas (Tabla VII.3 y Fig. VII.3C) que en las areniscas gruesas (Fig. VII.2D) y por ende una mejor cohesión de la roca.

La superficie de presión-disolución entre granos ha sido determinada mediante un programa de tratamiento de imagen que permite medir el contorno de un objeto a partir de una fotografía, en este caso, de microscopio (Fig. VII. 1). Midiendo la longitud de contactos de presión-disolución, dividiéndola por el perímetro total de los granos de la imagen, y multiplicando el resultado por 100, se obtiene el porcentaje de superficie de grano afectado por presión-disolución. En la Tabla VII.3 se muestran los resultados de la superficie de presión-disolución en relación a la superficie total de los granos obtenidos para las muestras MB2, MB5 y MB6. También se presenta el número de contactos contabilizados en cada ejemplo.

Tabla VII.3: Determinación de la superficie de los granos involucrados en la presión-disolución y del número de contactos entre granos de cada tipo de muestra:

	MB2	MB5	MB6
Sp de Presión-disolución (%)	53,2	20,22	20,64
Número de contactos	24	12	6

En las muestras ensayadas, la compactación no se ve muy influenciada por la variación en la selección debido a que la diferencia máxima entre selecciones no es importante (varía de extremadamente buena a moderadamente buena). Por el contrario, la compactación de las muestras ensayadas se ve muy afectada por la granulometría, ya que ésta varía entre fina (0.210 mm) y media a gruesa (> 0,420 mm). Por eso la litificación se ve más afectada por el cambio granulométrico que por la variación en la selección.

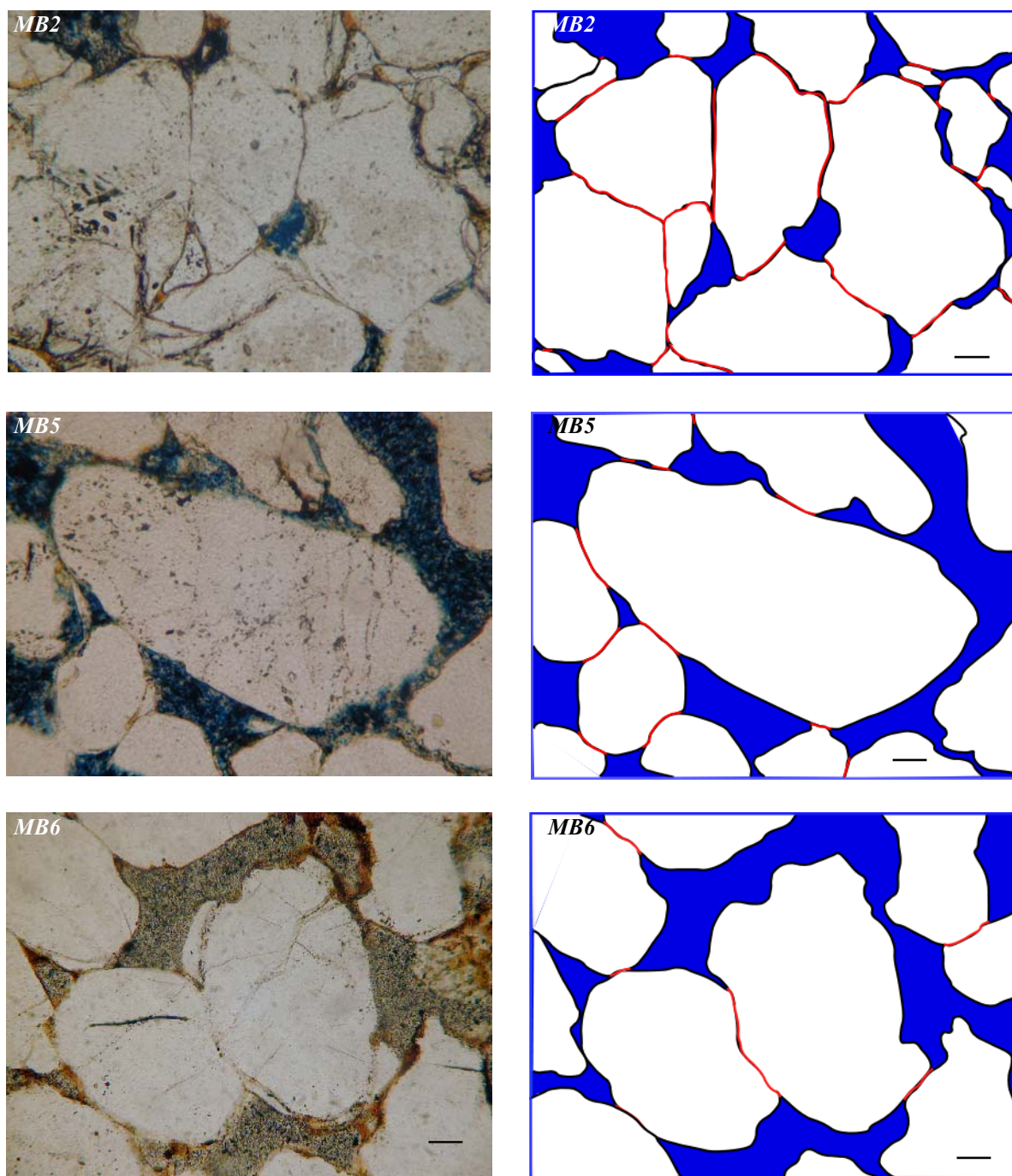


Fig. VII.1. Variación del número de contactos y de la superficie de presión-disolución en función del tamaño de grano. A la izquierda, fotografía de microscopio. A la derecha, tratamiento de esta imagen en la que se ha redibujado en negro, los contornos de los granos y en rojo, los contactos de presión-disolución.

La mayor superficie de presión disolución observada en las muestras de tamaño de grano fino se traduce en una mayor soldadura de granos y, por tanto, en una mayor litificación de las muestras de tamaño fino que de las de tamaño grueso. No obstante, hay que resaltar que, en el microscopio, se cuentan como contactos concavo-convexos, aquellos donde la penetración entre granos es evidente. Por tanto, el mayor número de contactos de este tipo indica, únicamente, el grado de penetración entre granos por presión-disolución. Este grado de penetración será mayor en las muestras gruesas ya que presentan un menor número de contactos y, por tanto, la presión en cada punto será mayor (contactos C-C evidentes) (Fig. VII.2F). Por el contrario, en las finas, el mayor número de contactos implica que la presión se reparte en más puntos, por lo que el grado de penetración entre granos será menor (menor número de contactos C-C en el contaje, puesto que son menos evidentes). Sin embargo, aunque en las muestras finas el grado de penetración entre granos es menor, la superficie de contactos de presión-disolución es mayor, ya que está repartida en más puntos, lo que hace adquirir a la roca una mayor cohesión entre granos.

Es característico de estos materiales encontrar muestras con laminaciones sedimentarias bien marcadas (Fig. VII.2E). Estas muestras están muy bien seleccionadas pero presentan cambios granulométricos a favor de la laminación y tamaños de grano que varían de fino (upper fine) a grueso (upper medium a lower coarse), según la clasificación de Beard y Weyl (1973). Esto implica la aparición de zonas de debilidad (anisotropías) a favor de las láminas de tamaño medio a grueso, debido a su menor litificación.



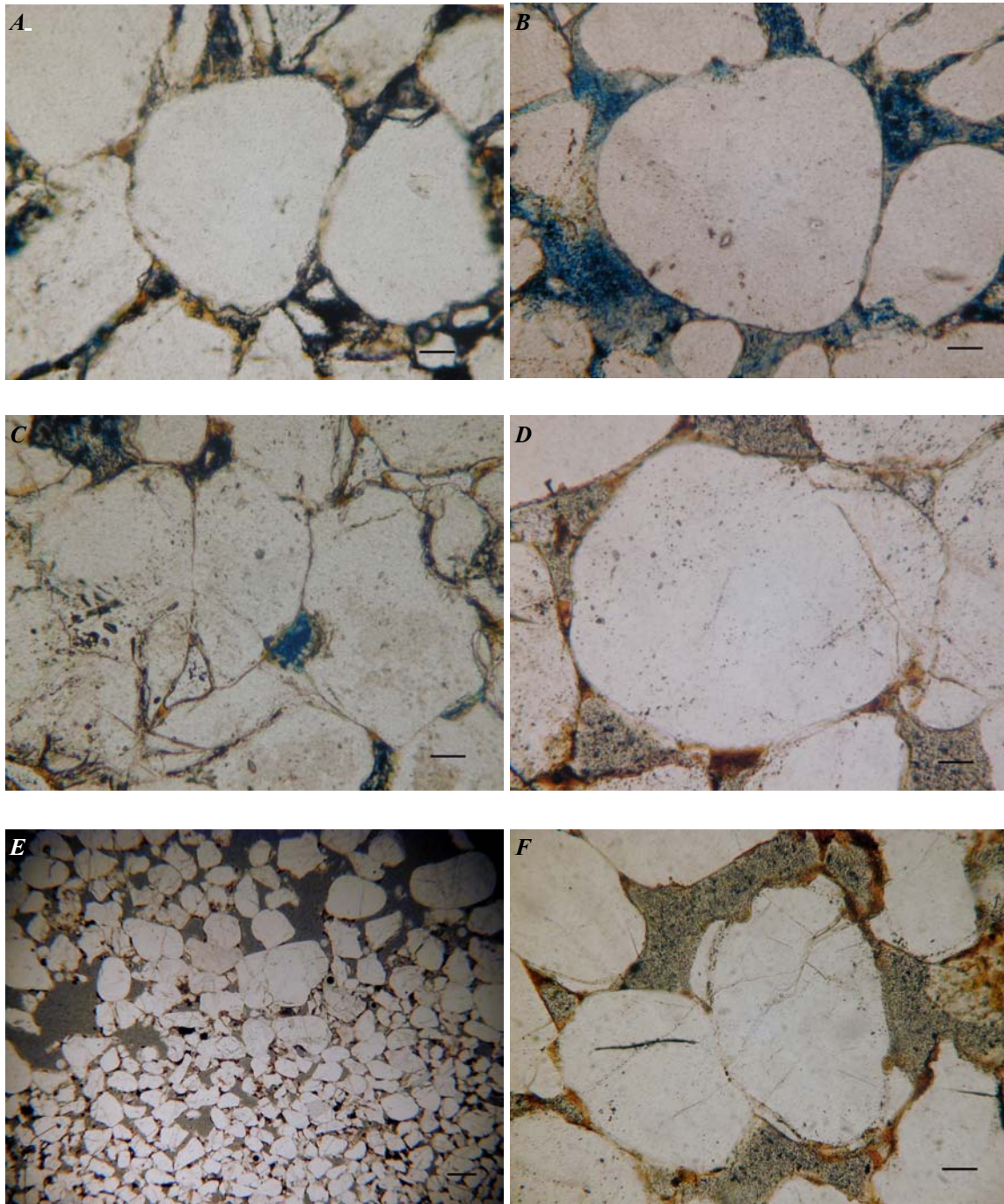


Fig. VII.2: Número de contactos y superficie de presión-disolución en muestras de tamaño fino y grueso. (A) Mayor número de contactos entre granos en una arenisca de grano fino. Escala 200  $\mu\text{m}$ . (B) Menor número de contactos entre granos en muestras de tamaño grueso. Escala 200  $\mu\text{m}$ . (C) Mayor superficie de presión disolución entre granos de una arenisca de grano fino y bien seleccionada, bien repartida en muchos puntos de contacto. Escala 200  $\mu\text{m}$ . (D) Moderada superficie de presión-disolución concentrada en pocos puntos de contacto. Escala 200  $\mu\text{m}$ . (E) Se observa la diferencia de granulometría y la consiguiente litificación que presentan las muestras con laminaciones sedimentarias. Escala 700  $\mu\text{m}$ . (F) Contacto concavo-convexo evidente en una muestra de tamaño de grano grueso, mostrando que en este tipo de rocas la presión-disolución se concentra en menos puntos, lo que disminuye la consolidación y cohesión total de la roca con respecto a las muestras de tamaño de grano fino. Escala 200  $\mu\text{m}$ .

### VII.1.1.2. Descripción del sistema poroso:

El estudio del sistema poroso se ha llevado a cabo mediante:

- La determinación de la distribución porométrica por porosimetría de mercurio.
- La descripción de la morfología de los poros y de la comunicabilidad de la red porosa a través de observaciones en el microscopio petrográfico y electrónico.
- La reconstrucción tridimensional utilizando la microscopía confocal de fluorescencia.

#### VII.1.1.2.1. Resultados de la porosimetría de mercurio:

La porosidad total de la roca determinada a partir del ensayo de porosimetría por intrusión de mercurio muestra valores elevados. La variación observada, tal y como muestran los valores presentados en la Tabla VII.4, es debida, fundamentalmente, a la presencia de arcillas y, en menor medida, al grado de selección (sorting) y al grado de compactación de las muestras. Estos factores modifican, lógicamente, la configuración de la red porosa. Los valores muestran además que la presencia de arcillas provoca un aumento de microporosidad (2-5%) y especialmente, de la infraporosidad (2%).

Tabla VII.4: Principales características y parámetros obtenidos a partir de la porosimetría de mercurio de las muestras ensayadas.

	MB1	MB2	MB3	MB4	RD	MB5	MB7
Granulometría (mm)	0,2	0,15	0,15	0,15	0,2	0,42	0,42
Selección	m. B	m. B	m. B	m. B	m. B	m. B	b-med.
Presencia de arcillas	0%	0-1%	0-1%	0-1%	6-11%	9-10%	4,33
Densidad real (Kg/m <sup>3</sup> )	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,56	2,61
Densidad aparente (Kg/m <sup>3</sup> )	2,03	1,96	1,97	1,97	2,08	2,06	2,15
Porosidad total (%)	22,35	24,79	24,57	25,86	20,8	19,44	17,5
Macroporosidad (%)	89,18	85,38	85,52	83,47	82,43	81,68	82,52
Microporosidad (%)	8,65	12,82	12,87	14,65	13,35	14,32	14,32
Infraporosidad (%)	1,36	1,8	1,93	1,87	4,22	3,73	3,73
Porosidad atrapante(%)	1,27	1,03	1,2	2,03	0,6	0,96	0,96
Diámetro medio (µm)	33,4	23,43	21,2	20,80	19,82	25,22	28,73
Moda (µm)	30-40	20-30	20-30	20,30	20-30	20-40	20-50

m. B: muy buena.

b-med.: buena a media.

Según las curvas de volumen acumulado de poros, se observa una fuerte entrada de mercurio dentro de los poros cuyos accesos corresponden a un tamaño medio comprendido entre 20 y 40 µm. Este intervalo corresponde a los diámetros de acceso de poro más abundantes en la roca y ocupan un porcentaje comprendido entre 63,47 y 82,51 (%) de la

porosidad total de la roca. La macroporosidad, de acceso de poro superior a  $7,5 \mu\text{m}$  según la clasificación de Goñi et al. (1968) y Bousquié (1979), representa un porcentaje comprendido entre 80,67 y 90,93 %. La microporosidad ocupa un porcentaje que varía entre 8,65 y 14,78%. La porosidad atrapante deducida a partir del volumen de mercurio atrapado en la muestra ocupa un porcentaje muy bajo, comprendido entre 0,1 y 2,3 % de la porosidad total de la roca. Se puede observar también que en las muestras de granulometría media a gruesa (MB5, MB7) aparecen accesos de poros de mayor tamaño y también poros de menor tamaño con respecto a las muestras de tamaño de grano fino. La Fig. VII.3 muestra que el histograma de la arenisca MB7 es algo más ancho que el de las muestras finas (MB1 y RD), hecho que implica un porcentaje entre categorías más repartido, indicando una mayor variedad de tamaños de acceso de poro. Estos valores son directamente relacionables con el tamaño de grano más grueso y su moderada selección. En estas muestras, la influencia directa del tamaño de grano sobre el radio de acceso de poro es mayor debido a la escasez de matriz y de cemento.

Podemos observar en la Tabla VII.4. que no hay relación entre el porcentaje de la porosidad total y la porosidad atrapante, sino que, más bien este último tiene una relación directa con la configuración del sistema poroso. En efecto, las muestras con presencia de arcillas presentan un porcentaje de microporosidad, especialmente de infraporosidad ( $< 0,05 \mu\text{m}$ ), más alto que en el caso de las muestras sin arcillas. Esto es debido a la disposición interparticular de estos minerales.

Comparando los histogramas de las muestras MB1 (fina sin arcillas) y RD (fina con arcillas), se puede observar que la presencia de arcillas en muestras con las mismas características petrográficas (tamaño de grano y selección) hace cambiar la distribución porométrica de la roca. Por ejemplo, en el caso de la muestra con arcillas (RD) se observa que la curva de distribución porométrica está desplazada hacia tamaños de acceso de poro más pequeños. Como se observa en la representación puntual del porcentaje de porosidad, en función del tamaño de acceso de poros experimentales, los poros más representados son los de  $20-40 \mu\text{m}$  con un máximo de 30 en el caso de la MB1 (Fig. VII. 3B), mientras que son de  $10-30 \mu\text{m}$ , con un máximo de  $20 \mu\text{m}$  para la muestra RD (Fig. VII. 3A).

La representación con histogramas reagrupa los porcentajes de porosidad en función de los tamaños de poros con respecto al porcentaje de porosidad total de la roca. Esto permite saber las categorías de los tamaños de poros más frecuentes.

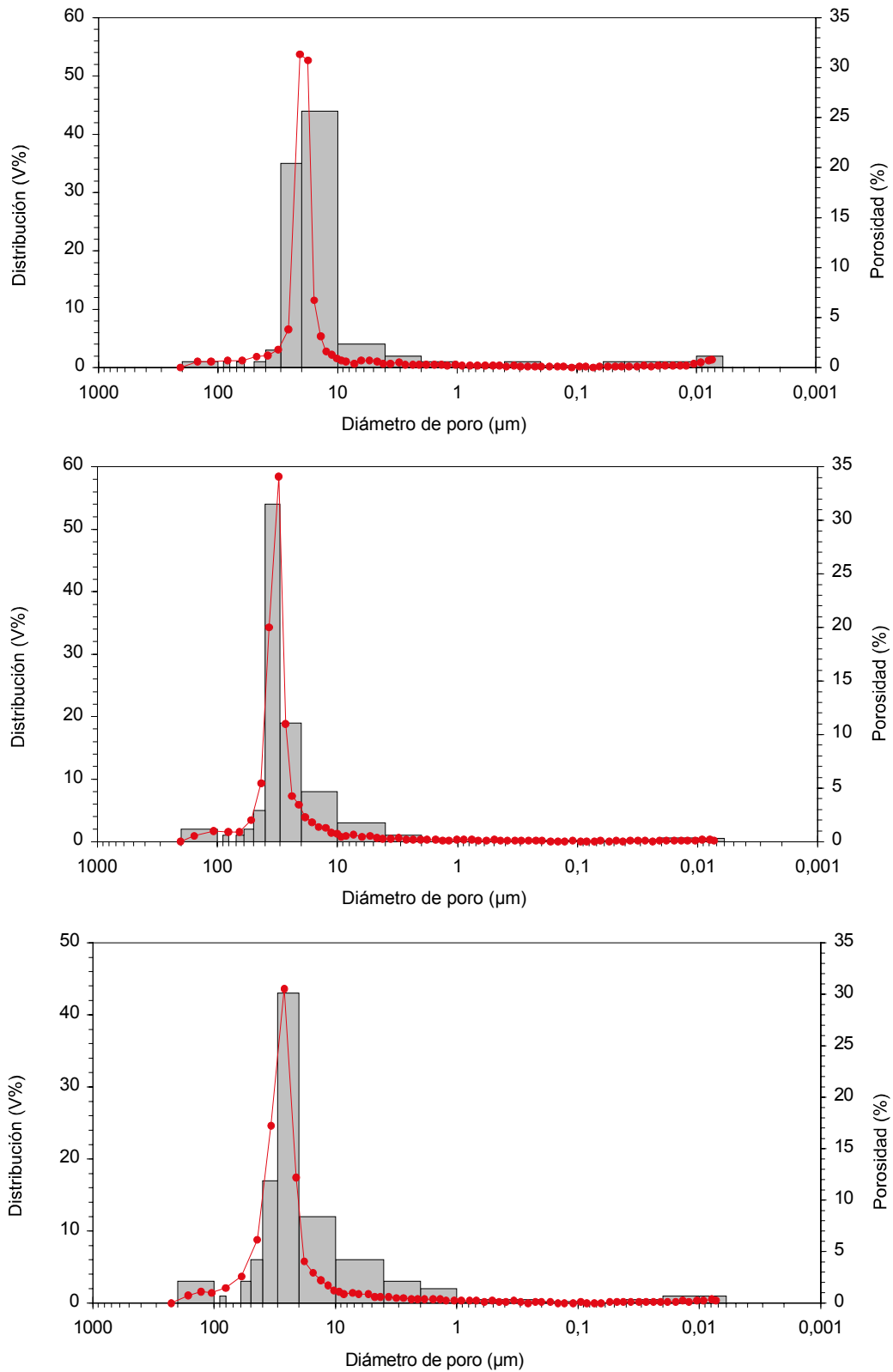


Fig. VII.3: Distribución de la porosidad en función del diámetro de acceso de poro. (A) Muestra fina con arcillas y muy buena selección (RD). (B) Muestra fina sin arcillas y muy buena selección (MB1). (C) Muestra gruesa con arcillas y moderada selección.(MB7.)

### **VII.1.1.2.2. Descripción petrográfica del sistema poroso:**

#### ***VII.1.1.2.2.1 Areniscas sin arcillas:***

Las observaciones en el microscopio óptico muestran que las muestras que no tienen arcillas (MB1, MB2, MB3 y MB4) presentan una estructura porosa muy sencilla definida únicamente por su disposición libre entre las partículas más o menos esféricas de cuarzo. La ausencia de una fase aglomerante que rellene el volumen intergranular junto con el tamaño de grano del sedimento y su buena selección hacen que esta roca tenga un carácter macroporoso (como también indica la porosimetría de mercurio). La porosidad se dispone en forma de grandes poros que comunican entre ellos por canales que constituyen los accesos de poros. Estos accesos, aunque son de tamaño inferior al del propio poro, son de dimensiones importantes (20-34  $\mu\text{m}$ ). En las rocas finas, los tamaños de poro reales, no medidos por porosimetría de mercurio y observados en el microscopio óptico, varían entre 50-60  $\mu\text{m}$ , pero pueden alcanzar 120  $\mu\text{m}$ . En las rocas gruesas, los tamaños de poros más presentados son alrededor de 200  $\mu\text{m}$ , pero pueden alcanzar 500 a 600  $\mu\text{m}$ . Esto confiere al sistema poroso de estas rocas una comunicabilidad entre poros óptima, que permite una libre circulación de fluidos (Fig. VII.4, A y B).

#### ***VII.1.1.2.2.2. Influencia de las características petrográficas sobre la distribución porométrica y la configuración de la red porosa:***

##### **Influencia del tamaño de grano:**

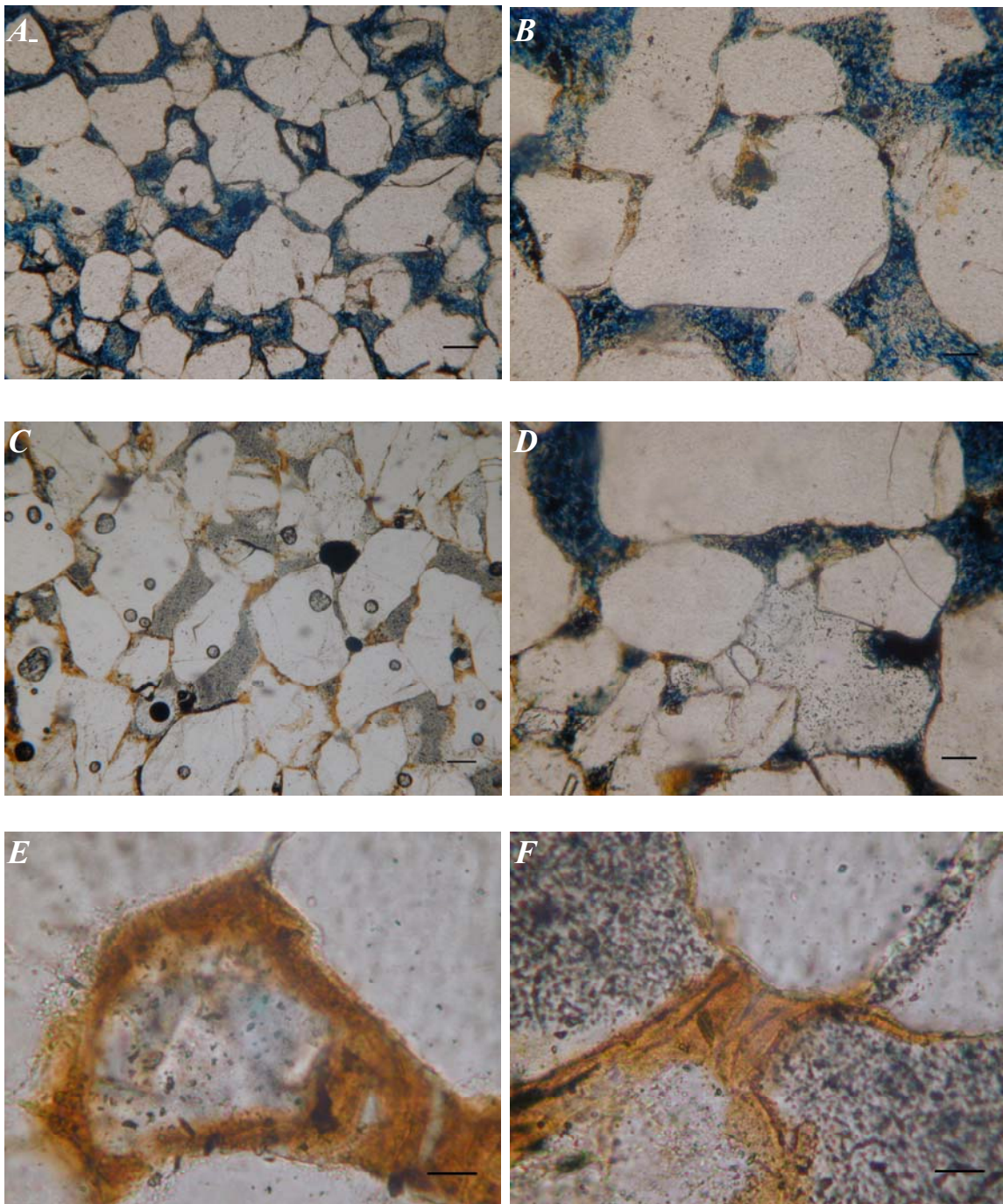
Beard y Weyl (1973) demostraron mediante la comparación de los valores de la permeabilidad en arenas de tamaño de grano fino y de grano grueso, que el tamaño de grano afecta a las dimensiones de los poros. Cuanto más grueso es el tamaño de grano más grandes son los poros. Este resultado se deduce también de los resultados de la porosimetría de mercurio, comparando los tamaños de accesos de poros de las muestras RD y MB5 (Tabla VII.5).

##### **Influencia de la presencia de arcillas:**

Las arcillas de estas muestras, se disponen de manera que recubren los granos formando un “coating” discontinuo y reduciendo los diámetros de poros (Fig. VII.4E). Estas arcillas, en muchos casos, forman meniscos cerrando los accesos de los pequeños poros (Fig. VII.4F), lo que cambia la configuración de la red porosa y afecta negativamente a la comunicabilidad del sistema poroso (Fig. VII.4C).

- Influencia de la selección:

La selección es un parámetro muy importante a tener en consideración a la hora de comparar la porosidad. Beard y Weyl (1973) y Jeannette (1979) demostraron que la selección influye en el volumen total de la porosidad, de tal manera que, cuanto menos seleccionada es la muestra, menos volumen de porosidad tendrá. Sin embargo, los resultados de la porosimetría de mercurio muestran que la selección no solo influye en el volumen total de la porosidad, sino que también influye en la distribución porométrica. Se observa que, existe más variedad (categorías) de tamaños de acceso de poro cuando la roca está menos seleccionada (Tabla VII.3). Esto se manifiesta también en la forma de los gráficos de intrusión de mercurio, que se hacen más anchos cuando la roca está peor seleccionada. Hay que notar que el efecto de la selección en este sentido (diversidad de tamaño de poros) es fácilmente visible aunque la selección no varíe mucho (las muestras varían de extremadamente seleccionadas a moderadamente seleccionadas). Se puede afirmar también, que la selección afecta a la comunicabilidad de la red porosa, puesto que los pequeños granos pueden cerrar o disminuir los tamaños de los accesos de poros. En de la Fig. VII.4D, se puede observar como la presencia de granos de cuarzo de pequeño tamaño cierra los accesos de poros impidiendo la penetración de la resina azul y disminuyendo, por tanto, la comunicabilidad del sistema poroso.



*Fig. VII.4. Variaciones en la configuración de la red porosa en función de la presencia de arcillas y de la selección. (A) sistema poroso de una arenisca de grano fino sin arcillas y muy bien seleccionada mostrando comunicabilidad muy alta. Escala 400  $\mu\text{m}$ . (B) Detalle donde se ve la forma de los poros y la comunicación entre si. Escala 200  $\mu\text{m}$ . (C) Arenisca de tamaño de grano fino, bien seleccionada y con arcillas cuya presencia actúa como barrera en los accesos de poros cambiando así la configuración de la red porosa y la comunicabilidad entre poros. Escala 200  $\mu\text{m}$ . (D) La foto muestra que la selección afecta a la comunicabilidad de la red porosa, ya que, los pequeños granos de cuarzo cierran parcialmente o totalmente los accesos de poros impidiendo la penetración de la resina azul lo que empeora la comunicabilidad con respecto a las muestras muy bien seleccionadas. Escala 200  $\mu\text{m}$ . (E) Disposición de las arcillas reduciendo el tamaño de poros. Escala 80  $\mu\text{m}$ . (F) Las arcillas forman meniscos taponando los accesos de poros. Escala 80  $\mu\text{m}$ .*

### **VII.1.1.2.3. Reconstrucción tridimensional del sistema poroso:**

#### ***VII.1.1.2.3.1. Metodología:***

Para visualizar mejor el espacio poroso se ha optado por impregnar al vacío las muestras con una resina fluorescente. La resina, por tanto, ocupa la totalidad del espacio poroso comunicado.

La combinación de la microscopía láser confocal con la de fluorescencia permite captar fotos de la muestra a diferentes profundidades (hasta un máximo de 100 micras de espesor). A partir de la superposición de esta serie de fotos se construye una imagen tridimensional de las partes fluorescentes, que en este caso corresponde exclusivamente al sistema poroso comunicado de la roca.

#### ***VII.1.1.2.3.2. Descripción del sistema poroso:***

La forma de estos poros observada en el microscopio óptico y de fluorescencia sería la de una estrella de varias puntas y de lados curvos, puesto que, corresponde al molde que dejarían los granos de cuarzo subsféricos (Fig. VII.5 y VII.6). Estos poros se comunican entre sí a favor de estrechamientos (canales) que corresponderían a los acercamientos entre granos o, lo que es lo mismo, a la unión entre las puntas de las estrellas antes mencionadas.

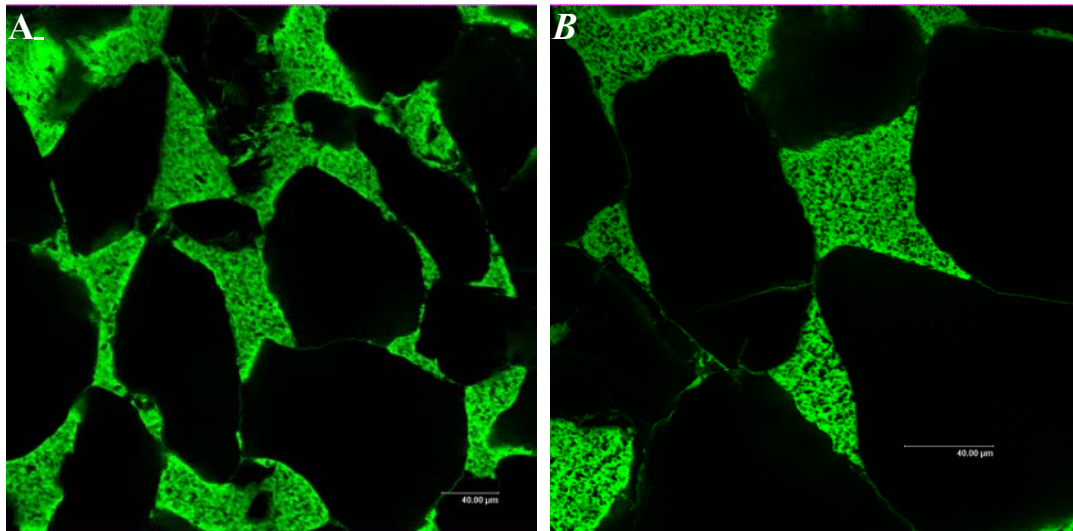
Observando la construcción tridimensional del sistema poroso en el microscopio láser confocal, se ve que la red porosa está formada por una serie de aberturas (poros) y de estrechamientos (canales y accesos) de poros muy comunicados. La forma general de la red porosa recuerda un tejido nervioso (Fig. VII. 5 y VII.6) cuya unidad constitucional es la neurona. La forma del cuerpo de la neurona se adapta a la forma de los poros principales que tienen una morfología poligonal estrellada, mientras la forma de las dendritas o las terminaciones de la neurona se adaptan a la forma de los accesos o conductos que permiten la comunicación entre los poros principales (cuerpos de las neuronas) (Fig. VII. 5B).

Se ha podido determinar mediante porosimetría de mercurio, que la mayoría de los poros (>80%) tienen un acceso de diámetro comprendido entre 20 y 40  $\mu\text{m}$ , en función de la granulometría de la roca. El resto de los poros (<20%) presentan un acceso de poro de diámetro inferior a 15  $\mu\text{m}$  (microporos). Pero los datos de la porosimetría de mercurio, por sí solos, no son suficientes para describir el sistema



poroso, ya que no nos dan información efectiva de la forma, la magnitud real de los poros, su disposición en el espacio tridimensional ni de la manera de comunicarse entre sí (configuración de la red porosa).

El conjunto de los datos porosimétricos y microscópicos permiten decir que el sistema poroso de esta roca está representado por macroporos de tamaño variable, comprendido entre 50 y 500  $\mu\text{m}$ , comunicados entre sí por otros de menor tamaño, los más frecuentes de entre 20 y 40  $\mu\text{m}$ , aunque también existen otros de tamaños inferiores a 20  $\mu\text{m}$ , en un porcentaje mucho más bajo. Estos poros, cuyos tamaños han sido determinados por porosimetría de mercurio, constituyen los accesos de los poros principales, cuyo tamaño no ha sido determinado por esa técnica.



*Fig. VII.5: Fotos al microscopio de fluorescencia del sistema poroso de la arenisca. En color verde fluorescente la porosidad, donde dominan las secciones de formas triangulares y neuronales, y en color negro los granos del esqueleto de la arenisca. (A) La foto muestra las aberturas (neuronas) comunicadas por los estrechamientos (dendritas). (B) Detalle de los poros (cuerpos de la neurona). Escala gráfica 40  $\mu\text{m}$*

El sistema poroso de esta arenisca se caracteriza por una alta comunicabilidad debida a que no hay cemento ni matriz, y si la hay, es inferior a 10 % (generalmente < 5%). Esto hace que podamos considerar el volumen intergranular inicial, es decir, el espacio vacío que rodeaba a los granos del esqueleto como equivalente a la porosidad. De esta manera, es fácilmente entendible que el sistema poroso es único y formado por una sola red de poros (una dimensión fractal) muy bien comunicados y que su configuración depende únicamente de la disposición de los granos del esqueleto y de su grado de compactación.

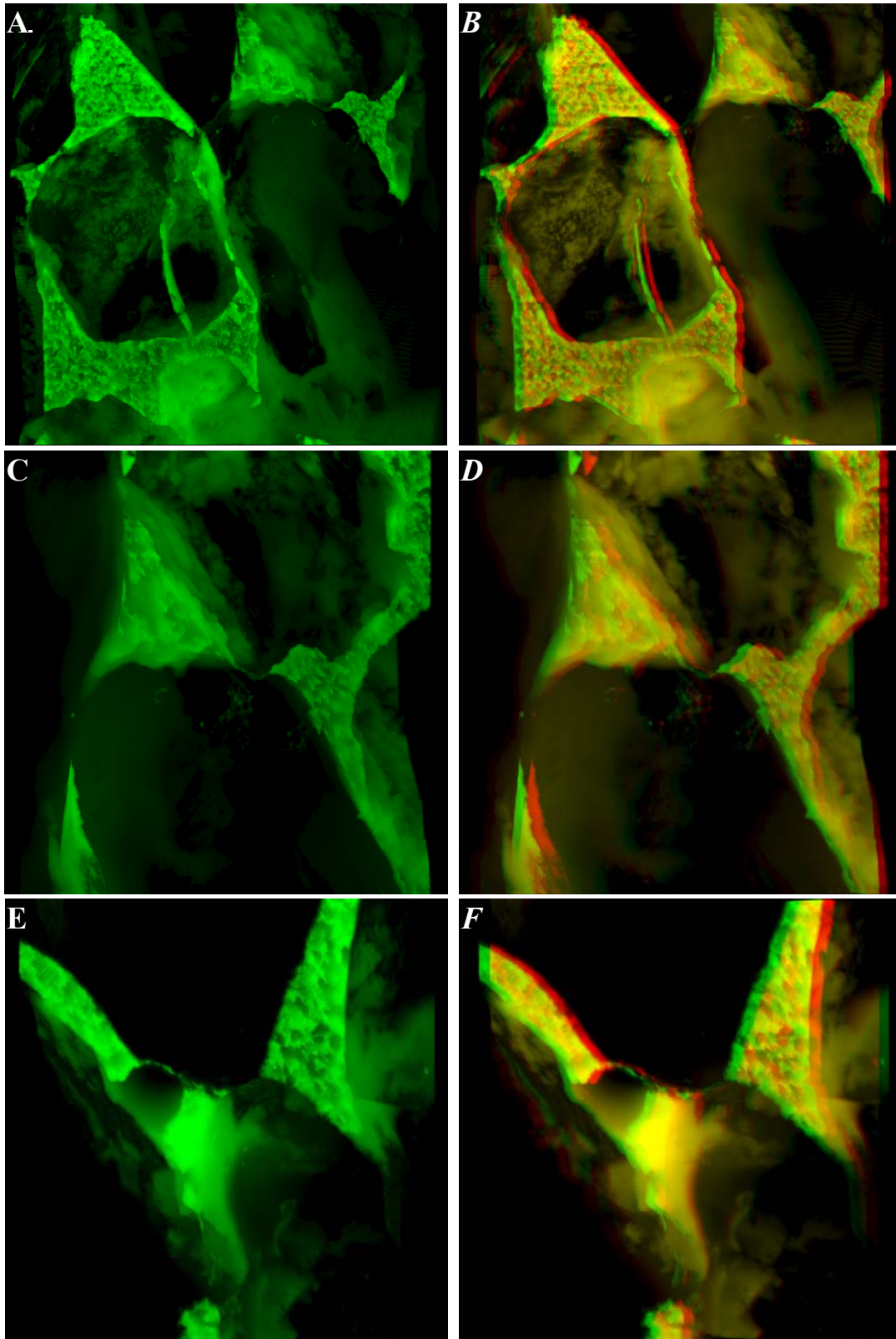


Fig. VII.6. Representación del sistema poroso obtenida con el microscopio láser confocal de fluorescencia. A la izquierda, imágenes tridimensionales y a la derecha imágenes estereográficas. (A) y (B) Se observan en negro, los granos del esqueleto (uno de ellos fracturado) como si fueran moldes vacíos mientras que las diversas formas tridimensionales de los poros y los estrechamientos que los comunican entre sí aparecen en color verde fluorescente. La continuidad del color verde en las tres dimensiones del espacio da idea de la alta comunicabilidad del sistema poroso de esta roca. (C), (D), (E) y (F) Detalle de diversos estrechamientos que comunican poros con diferentes formas tridimensionales.

### VII.1.1.3. Estudio del comportamiento físico del material:

#### VII.1.1.3.1. Estudio del comportamiento hídrico:

##### *VII.1.1.3.1.1. Absorción al vacío:*

Los valores correspondientes a los parámetros obtenidos a partir del ensayo de absorción al vacío muestran que la arenisca presenta una porosidad alta (superior a 20%), acompañada de un contenido de agua notable, como se puede observar en la tabla VII.6.

Tabla VII.6: Resultados del ensayo de absorción al vacío:

	Dap	Dre	Ws %	n %
MB1	2,05	2,65	10,99	22,59
MB2	1,98	2,65	12,61	25,07
MB3	1,98	2,65	12,66	25,13
MB4	2,05	2,65	12,86	25,42
MB5	2,09	2,65	10,11	21,15
MB6	2,08	2,61	9,67	20,17
MB7	2,16	2,65	8,53	18,45
PROMEDIO	2,06	2,64	11,07	22,58
DESV. EST	0,063	0,015	1,705	2,759

n (%): Porosidad accesible.

Dap.: Densidad aparente (gr/cm<sup>3</sup>)

Dre.: Densidad real hidrostática.

Ws (%): Contenido en agua en saturación.

Como se ha indicado en apartados interiores, se puede relacionar el volumen de la porosidad con la textura sedimentaria, especialmente con el grado de selección o uniformidad de tamaño, el grado de compacidad, así como con la presencia de arcilla interparticular como constituyente de la matriz.

Las muestras MB1, MB2, MB3 y MB4 presentan una muy buena selección (sorting bajo) (Castro Dorado, 1989), no tienen arcillas y muestran el porcentaje más alto en porosidad.

Las muestras MB6, MB7 y MB5 presentan una porosidad un poco más baja que las demás muestras por las siguientes razones:

La muestra MB6 presenta una selección baja debido a la presencia de laminaciones cruzadas bien visibles que comportan cambios de granulometría.

La muestra MB7 presenta una baja selección y además, tiene un porcentaje significativo de arcillas, por lo que es la muestra que presenta un volumen más bajo de porosidad.

La muestra MB5 presenta un porcentaje más bajo en arcillas que la muestra MB7 pero posee una alta selección. Por eso su porosidad es algo mayor.

La diferencia entre los valores obtenidos por el ensayo de la porosimetría de mercurio y la absorción al vacío es debida a la presión máxima que el porosímetro de mercurio puede alcanzar, para superar la presión capilar del mercurio, muy elevada como consecuencia de su alto ángulo de contacto ( $\theta > 90^\circ$ ). Pero la diferencia no es suficientemente significativa como para atribuirle a una porosidad de muy pequeño o muy grande tamaño, que no puede ser detectada por el porosímetro de mercurio. Por ello, en este caso, podemos decir que tenemos una información casi completa de la repartición porométrica de la porosidad de esta arenisca, que influye en su comportamiento hídrico (porosidad abierta) y por supuesto, en los procesos de alteración en relación con la circulación de agua.

Tabla VII.7: Resultados comparativos de la porosimetría de mercurio (Hg) y de la absorción al vacío:

	Dap	Dre	n (%)	Dap Hg	Dre Hg	n (%)
MB2	1,98	2,65	25,07	1,96	2,60	24,79
MB3	1,98	2,65	25,13	1,97	2,62	24,57
MB4	2,05	2,65	25,42	1,96	2,63	25,26
MB5	2,09	2,65	21,15	2,06	2,56	19,44
MB7	2,16	2,65	18,45	2,15	2,61	17,55

#### **VII.1.1.3.1.2. Desorción:**

Los resultados de la desorción se consideran complementarios a los obtenidos por la absorción al vacío, ya que permiten cuantificar la cinética de la pérdida de agua por evaporación a partir de muestras saturadas en agua (C.E) y también permite la evaluación del grado de retención de agua por la piedra (Se) que condiciona su alterabilidad. Además, se establece el contenido en agua crítico (Wc) que es muy importante a la hora de valorar el efecto producido por los productos de impregnación y de hidrofugación sobre la cinética de la desorción.

Los valores de los parámetros descritos vienen representados en la tabla VII.8:

Tabla VII.8: Resultados del ensayo de desorción de las muestras sin tratar:

	Se %	Wd %	C.E (%/min)	Wc (%)
MB1	0,3	0,03	0,019	4,19
MB2	0,47	0,06	0,017	3,8
MB3	0,73	0,07	0,016	3,42
MB4	0,55	0,07	0,017	3,81
MB5	0,85	0,09	0,025	2,57
MB6	0,57	0,09	0,024	2,81
MB7	1,55	0,13	0,019	1,76
PROMEDIO	0,72	0,08	0,02	3,19
DESV. EST	0,41	0,03	0,004	0,85

C.E (%/min): Coeficiente de evaporación.

Se (%): Grado de saturación final respecto al máximo contenido de agua absorbida.

Wd (%): Grado de saturación final respecto al peso de la muestra.

Wc (%): Contenido en agua crítico

Las muestras con Wc bajo, MB5, MB6 y MB7, son muestras de granulometría gruesa y, evidentemente, de tamaño de poro más grande, como lo mostró el estudio de las muestras por porosimetría de mercurio (Tabla VII.4). Este mayor tamaño de los poros facilita la desorción y aumenta la velocidad del proceso de evaporación.

La forma de la curva (Fig. VII.7) indica una alta velocidad de evaporación, ya que aquella está formada por un tramo inicial muy recto que indica un flujo constante de vapor, lo que significa que la evaporación de la mayor parte del agua se produce en la superficie del material, antes de que disminuya la tensión de vapor.

Los valores de Se muestran que el agua retenida al final del proceso de secado ocupa un porcentaje muy bajo, tal y como lo muestra la curva de evaporación. Eso significa que la roca desorbe casi la totalidad de agua que absorbe en condiciones de vacío. En la muestra MB7 se observa un valor anómalo de Se, que indica una alta retención de agua, que no se debe ni a un aumento de la porosidad atrapante, ni a la presencia de un mayor porcentaje de infraporosidad, puesto que la textura de la muestra MB7 es de mayor tamaño de grano. Por tanto, no es debido a un cambio sustancial en la configuración de la red porosa, sino que está relacionado con la mayor presencia de arcillas en esta muestra y debido a un mecanismo de adsorción física del agua en la superficie de las partículas arcillosas que rodean los granos de arena. Esta adsorción física es diferente a la absorción interlamilar de agua que se produce a favor de la estructura cristalina de las arcillas expansivas y que en nuestro caso al ser estas arcillas tanto del tipo interestratificado illita-esmectita como caolinita no se produce.

El contenido en agua crítico significa el contenido de agua a partir del cual empieza la segunda fase de la evaporación, es decir, la evaporación desde el interior de la roca. Los valores del contenido en agua crítico ( $W_c$ ) son muy bajos en esta roca y tienen un promedio de 3,04 % del máximo contenido en agua obtenido al vacío. Los valores del conjunto de estos parámetros indican una buena comunicación de la red porosa que está en relación con la escasa microporosidad detectada y sobre todo, con los bajos valores de porosidad atrapante

Tabla VII.9: Parámetros obtenidos a partir de la porosimetría de mercurio:

	Macro (%)	Micro + inf	Micro (%)	Infra (%)	Porosidad
MB1	89,18	10,87	8,65	1,36	1,27
MB2	85,38	14,62	12,82	1,8	1,03
MB3	85,52	14,8	12,87	1,93	1,2
MB4	83,47	16,52	14,65	1,87	2,03
MB5	81,68	18,32	14,32	3,73	0,96
RD	82,43	17,57	13,35	4,22	0,6
MB7	82,52	17,49	14,78	2,7	0,1
PROMEDIO	84,31	15,74	13,06	2,52	1,03
DESV. EST	2,60	2,57	2,11	1,08	0,60

La retención de agua obtenida al final del proceso de secado es inferior a la porosidad atrapante medida por porosimetría de mercurio (Tabla VII.9). Eso se explica por el mecanismo de desorción del agua en el interior del poro, que en parte se hace en forma de vapor. Este mecanismo reduce el porcentaje total retenido de agua y por tanto, el porcentaje de la porosidad atrapante.

En el conjunto de las muestras ensayadas, los resultados obtenidos en la desorción por cuatro caras que se han realizado para el control de productos (véase capítulo VIII) no son muy diferentes de los obtenidos en la desorción por seis caras, aunque haya una evidente reducción de la superficie de la desorción. Esto se debe a dos factores, la configuración y características de la red porosa en las tres direcciones del espacio es parecida (isótropa) y el segundo factor es que la buena comunicabilidad produce una elevada cinética de la desorción por lo que apenas se ve afectada en sus resultados por la reducción de la superficie.

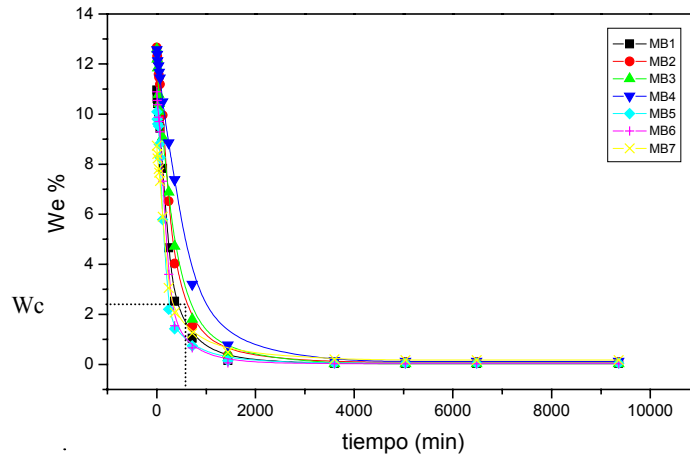


Fig. VII.7: Desorción de las muestras no tratadas. ( $W_c$ ) Contenido en agua crítico. ( $W_e$ ) Porcentaje de agua restante en la piedra en cada intervalo de tiempo.

**VII.1.1.3.1.3. Absorción de agua por capilaridad:**

Los resultados obtenidos en este ensayo nos proporcionan mucha información en cuanto a la capacidad natural de la roca de absorber agua sólo por fuerzas capilares y, también, nos permiten establecer una relación significativa entre este comportamiento cinético de la absorción de agua y el porcentaje de porosidad libre y de porosidad atrapante, así como el grado de conectividad del sistema poroso.

En las tablas siguientes se resumen los valores obtenidos al final del ensayo de succión capilar tanto para una orientación de la estratificación de la piedra perpendicular al flujo ascendente del agua (Tabla VII.10), como para una orientación de la estratificación paralela al flujo ascendente del agua (Tabla VII.11).

Tabla VII.10: Resultados obtenidos por capilaridad, para una disposición de la estratificación perpendicular al flujo ascendente.

Muestras	St (%)	Si (%)	C.A.C.(Kg/m <sup>2</sup> .s <sup>1/2</sup> )
MB1	8,84	80,44	0,596
MB2	10,35	82,1	0,740
MB3	10,45	82,28	0,724
MB4	10,69	83,13	0,682
MB5	7,71	76,16	0,149
MB6	8,35	86,35	0,578
MB7	5,84	73	0,100
PROMEDIO	8,890	80,494	0,510
DESV. EST	1,770	4,508	0,270

Tabla VII.11: Resultados obtenidos por capilaridad, para una disposición de la estratificación paralela al flujo ascendente.

Muestras	St (%)	Si (%)	C.A.C.(Kg/m <sup>2</sup> .s <sup>1/2</sup> )
MB1	8,68	78,89	0,596
MB2	10,08	79,94	0,739
MB3	10,33	81,34	0,724
MB4	10,37	80,33	0,679
MB5	7,58	74,97	0,330
MB6	7,7	79,63	0,566
MB7	5,3	62,13	0,200
PROMEDIO	8,58	76,75	0,548
DESV. EST	1,8735	6,7558	0,207

St : Contenido de agua adquirido en el punto de inflexión de las curvas (%).

Si: Grado de saturación alcanzado en el punto de inflexión de la curva, respecto al contenido total de agua en saturación  $W_s$  (%).

C.A.C : Coeficiente de absorción capilar (Kg/m<sup>2</sup>.s<sup>1/2</sup>).

Los resultados obtenidos muestran que la velocidad de absorción de agua por capilaridad es muy alta (Fig. VII.8) y está acompañada por un grado de absorción de agua también alto, lo que confirma la teoría de la buena comunicabilidad de la red porosa, avanzada en los análisis y ensayos anteriores y confirmada por otros autores (Mingarro et al., 1996).

El comportamiento diferente de las muestras MB7, MB6 y MB5 con respecto a las demás muestras es debido a que:

- En la Muestra MB6 la disminución de la absorción capilar es menor que en las muestras anteriores. Esto se debe a la disminución de la comunicabilidad como consecuencia de los cambios alternantes de granulometría asociados a la presencia de laminaciones sedimentarias.

- En las muestras MB5 y MB7 el bajo coeficiente de absorción capilar y el bajo grado de saturación es debido a su contenido en arcillas (5-10%). Éstas obstruyen total o parcialmente los pequeños accesos de los poros, lo que disminuye la conectividad de la red porosa y, por consecuencia, la velocidad de absorción de agua aunque tengan menor tamaño de acceso de poro.

Se observa que las muestras en las que la estratificación es perpendicular al flujo ascendente de agua, se saturan más que las colocadas con la estratificación paralela al flujo ascendente, pero las diferencias son escasas, lo que indica que la anisotropía de la textura no es muy marcada. Esta pequeña diferencia es debida a la compactación sufrida por estas areniscas, que es de dirección perpendicular a la estratificación y que provoca la aparición de



contactos cóncavo-convexos entre los granos, sólo en la dirección perpendicular a la de la compactación. Esto hará que se junten y suelden los granos predominantemente en la dirección perpendicular a la estratificación y que disminuya algo la porosidad y, sobretodo, la comunicabilidad en la dirección paralela a la estratificación.

Diferencias entre la porosidad atrapante y la no accesible en la textura petrográfica:

La diferencia entre los valores de saturación en agua obtenidos en condiciones de vacío y por capilaridad corresponde, según Bousquié (1979), a la porosidad atrapante ( $N_p$ ) (porosidad no accesible a presión ambiental). La porosidad libre ( $N_l$ ) corresponde al contenido de agua en el momento donde la curva cambia de pendiente (Fig. VII.8). La porosidad atrapante se deduce entonces de la porosidad total ( $N_t$ ) obtenida bajo vacío ( $N_p = N_t - N_l$ ).

La porosidad atrapante calculada a partir de la porosimetría de mercurio proporciona valores muy inferiores a los obtenidos por capilaridad (tabla VII.12). Ésto pone en cuestión esta metodología para la determinación de la porosidad atrapante. Sin embargo, si consideramos los valores obtenidos por porosimetría de mercurio para la porosidad inferior a  $0,1 \mu\text{m}$ , los resultados obtenidos son muy parecidos a la porosidad atrapante calculada a partir del ensayo de capilaridad según el método de Bousquié, 1979 (tabla VII.13). El comportamiento hídrico de estos litotipos confirma por tanto la teoría avanzada por (Lautridou, 1971; Aubry, 1974; Lautridou y Leneuf, 1974) que consideran los poros con diámetros inferiores a  $0,1 \mu\text{m}$  como poros muy difícilmente accesibles al agua, sin tener que confundir la porosidad atrapante con la porosidad difícilmente accesible.

Tabla VII.12: Valores de la porosidad atrapante calculada por el método de la porosimetría de mercurio (Pat) y por capilaridad ( $N_p$ ).

	$N_p$ (%)	Pat (%)
MB2	3,83	1,03
MB3	4,01	1,2
MB4	3,95	2,03
MB5	4,63	0,96
MB7	4,2	0,985

El ensayo de porosimetría de mercurio demuestra que una proporción variable de la porosidad no accesible por capilaridad no es atrapante, si no que, si se fuerza, su extrusión puede producirse.

Tabla VII.13: Relación entre porosidad no saturada por capilaridad (Np) y porosidad cuyo tamaño de poro inferior a 0,1  $\mu\text{m}$  (Pi).

	Pi (%)	Np (%)
MB2	3,8	2,53
MB3	3,42	2,82
MB4	3,81	2,72
MB5	2,57	3,05
MB7	1,76	3,07

En la práctica consideramos que, en el muro de un monumento o edificio, el límite de saturación es la porosidad no accesible por capilaridad. Este valor (Np) coincide con el agua retenida en forma líquida (Wc) en el proceso de desorción (tabla VII.14).

Tabla VII.14: Relación entre porosidad no saturada por capilaridad (Np) y el contenido en agua crítico (Wc).

	Wc (%)	Np (%)
MB2	2,26	2,53
MB3	2,21	2,82
MB4	2,17	2,72
MB5	3	3,05
MB7	2,69	3,07

La conclusión es que no hay que confundir la terminología. En el caso descrito por Bousquié (1979), se puede considerar la porosidad no accesible al agua en condiciones de presión atmosférica como porosidad atrapante, que corresponde al agua retenida por fuerzas capilares en el proceso de desorción (Wc) y que estos conceptos son aplicables tanto en una piedra como en un monumento, aunque, físicamente, este agua se pierde en forma de vapor cuando las condiciones ambientales lo permiten.

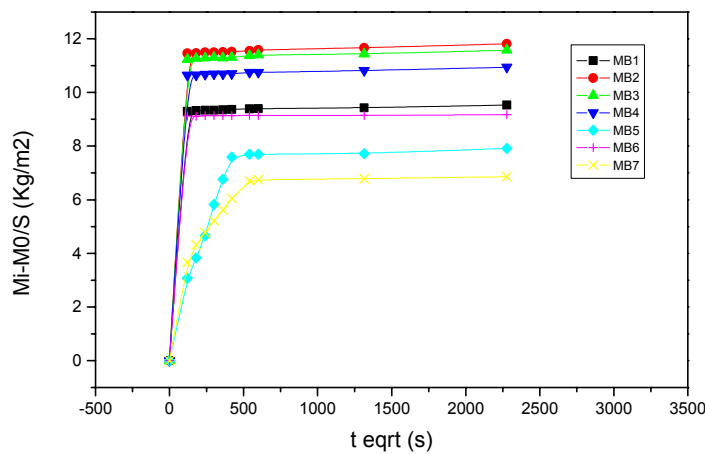


Fig. VII.8: Absorción de agua por capilaridad, muestras en blanco.

#### VII.1.1.3.1.4. Absorción de agua a baja presión:

Debido a la rápida absorción del sustrato, no se ha podido elaborar una gráfica, en función del tiempo como indica la norma. Por esta razón, se ha medido con un cronómetro el tiempo necesario para la absorción de 9 ml de agua, a baja presión, por parte de cada tipo de muestra. A partir de los tiempos obtenidos se calculan las velocidades de absorción de agua por cada muestra, expresadas en ml/s (Tabla VII.15).

Tabla VII.15: Los resultados obtenidos en el ensayo de absorción de agua a baja presión para muestras de dimensiones 5x5x10.

9 (ml)	MB8	MB9	MB10	MB11	MB12	MB13	MB14
Tiempo (s)	30 s	363,6 s	59 s	420 s	1920	391,2 s	30 s
V (ml/s)	0,3	0,025	0,15	0,021	0,005	0,023	0,3

Las muestras MB8, MB10 y MB14 de color amarillo, correspondientes a un contenido casi nulo en arcillas, absorben agua con mucha facilidad y en tiempo muy breve como lo muestran los valores presentados en la Tabla.

Las muestras que presentan matriz arcillosa y una buena selección, MB9, MB11 y MB13, absorben el agua con menor velocidad respecto a las muestras que no tienen arcillas.

En la muestra MB12, existen dos factores acumulados que reducen la velocidad de absorción de agua. Estos son el contenido en arcillas y la baja selección, ya que, esta última modifica la configuración de la red porosa dificultando su comunicabilidad.

El estudio petrográfico, como ya hemos indicado en la interpretación de los ensayos anteriores, muestra que las arcillas recubren parcialmente los granos del esqueleto y taponan así los accesos de poros, lo que dificulta la penetración del agua en los poros incluso a baja presión (Fig. VII.4) ya que al microscopio óptico se observa que la red porosa está mejor comunicada en las muestras sin arcillas que en las muestras con arcillas. Por otra parte, los resultados de la porosimetría de mercurio muestran que los tamaños de los accesos de poros son mayores en el caso de las muestras sin arcillas que en el de las muestras con arcillas.

### VII.1.1.3.1.5. La permeabilidad al vapor de agua:

La realización de este ensayo sobre muestras de las diferentes variedades de la roca ha dado los resultados siguientes:

Tabla VII.16: Resultados de la permeabilidad a la vapor de agua.

Muestras	$q_v (10^{-6})$	$\delta (10^{-9})$	$\mu (10^{-6})$
MB15	4,58	54,52	33,96
MB16	5,78	68,8	29,91
MB17	5,06	60,24	30,74
MB18	3,02	38,09	51,5
MB19	3,47	41,28	44,83
MB20	3,68	43,87	42,24
MB21	3,32	39,57	46,85
MB22	4,7	55,92	33,09
MB23	2,82	33,55	55,16
PROMEDIO	4,05	48,43	40,92
DESV. EST	1,02	11,87	9,36

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

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

$\mu$  = coeficiente de resistencia a la difusión de vapor de agua.

Los valores muestran una alta permeabilidad al vapor, coherente con el grado de comunicación de la red porosa evidenciado por los ensayos anteriores.

Las muestras MB15, MB16, MB17, que son de grano fino y sin arcillas, presentan los valores más altos de permeabilidad al vapor de agua.

La muestra MB8 posee peor selección, un tamaño de grano más grueso y no presenta arcillas. En cambio, tiene unos valores de permeabilidad al vapor muy parecidos a los anteriores, lo que demuestra que la selección y el tamaño de grano no afectan a esta propiedad. Esto es debido a que la difusión del agua en forma de vapor es mucho mayor que el del agua líquida y no se ve afectada por los cambios en la red porosa producidos por el grado de selección y las variaciones moderadas del tamaño de grano.

Las muestras MB18, MB19, MB20, MB21 y MB22 presentan valores más bajos de permeabilidad al vapor de agua, debido a la presencia de arcillas (5-10%). Esta presencia sí que afecta a la difusión del vapor de agua y este efecto se produce por dos mecanismos. El primero consiste en que las partículas de arcilla adsorben el vapor de agua por condensación. El segundo radica en el hecho que las arcillas, como se ha demostrado anteriormente, obstruyen los estrechamientos de la red porosa cambiando la configuración del sistema poroso y dificultando su comunicabilidad.

**VII.1.1.3.1.6. Hinchamiento:**

La realización de este ensayo ha mostrado que el material presenta una dilatación hídrica nula a pesar de la presencia de las arcillas que son de tipo interestratificado illita-esmectita, por lo que se puede concluir que éstas no tienen un carácter expansible.

**VII.1.1.3.2. Estudio del comportamiento mecánico****VII.1.1.3.2.1. Ensayo de la resistencia a la compresión:**

Los resultados obtenidos tras la realización del ensayo de la resistencia a la compresión muestran que la roca tiene una baja resistencia mecánica como desprende de los valores presentados en la tabla VII.17.

Tabla VII.17: resultados del ensayo de la resistencia a la compresión.

GRUPOS	MUESTRAS	Tamaño de grano	R (Kg/cm <sup>2</sup> )	R (Mpa)
GRUPO. A	MB24	Fino	228	22,36
	MB25	Fino	168	16,47
	MB26	Fino	248	24,32
	MB27	Fino	208	20,39
	MB28	Fino	160	15,69
GRUPO. B	MB29	Medio	56	5,49
	MB30	Medio	44	4,32
	PROMEDIO	--	158,86	15,58
	DESV. EST	--	80,62	7,90

R (Mpa): resistencia a la compresión en Megapascal.

R (Kg/cm<sup>2</sup>): resistencia a la compresión en Kg por centímetro cuadrado.

Esta baja resistencia es debida a:

- una presencia escasa o ausencia total de una fase aglomerante,
- una alta porosidad,
- una alta esfericidad de los granos de cuarzo, que hace que el contacto entre granos sea puntual.
- Una baja compactación de la roca,

Los resultados obtenidos muestran una dispersión muy marcada que permite subdividir en dos grupos (A y B) las muestras estudiadas (Tabla VII.17, Fig. VII.9). Dicha dispersión es debida exclusivamente al tamaño de grano. Se observa que cuanto más fino, es el tamaño de grano más resistente se hace la roca, debido a que las muestras finas se encuentran más litificadas que las gruesas (véase apartado VII-1-1-1-2).

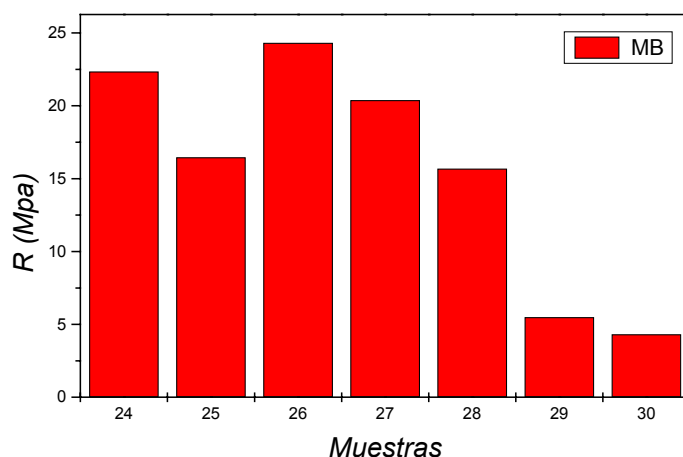


Fig. VII. 9: Presentación gráfica de los resultados del ensayo de compresión de las muestras sin tratar

Para poder entender esta relación directa entre la resistencia a la compresión y el tamaño de grano de la muestra, se ha realizado el contaje de tres muestras ensayadas, representativas de las diferentes texturas (tamaño y selección), y así determinar el grado de litificación de la roca. Para ello se ha determinado el grado de compactación de la roca a partir del volumen intergranular perdido por compactación (VIGC), obtenido a partir de la diferencia entre el volumen intergranular observado (VIGF) y el inicial (VIGI). Este último ha sido determinado a partir de los valores dados por Beard y Weyl (1973) para areniscas no consolidadas y de texturas similares a las observadas.

En la Tabla VII.18 se muestra la relación existente entre el tamaño de grano, la compactación o litificación y la resistencia mecánica.

Tabla VII.18: Relación entre el tamaño de grano, la compactación y la resistencia a la compresión.

	MB9	MB 12	MB 14
Tamaño de grano	Fino (0.210 mm)	Medio (0.420 mm)	Fino a medio (0,210-0,420 mm)
Selección	Extremadamente bien seleccionada (So 1.0-1.1)	Moderadamente bien seleccionada (So 1.4-2.0)	Muy bien seleccionada cambios granulométricos (So 1.1-1.2)
Contactos C-C	2,11	4,65	3,3
Superficie de presión- disolución	53,2	20,22	20,64
número de contactos	24	12	6
VIG. inicial (%)	41,3	34,2	40,2-38,1
VIG. inicial (%)	27,50	23,9	24,9
VIG. Compactado (%)	13,8	10,91	15,3-13,2
Resis. a la comp.(Mpa)	16,47	5,49	4,32

Observando los valores se puede decir que las muestras finas, que son los más resistentes a la compresión, han sufrido una mayor compactación. Eso es debido a las razones ya explicadas en el apartado VII-1-1-1-2 y que son las siguientes:

Las muestras de tamaño de grano fino (MB9) presentan un mayor número de contactos entre granos en un mismo volumen de roca, que durante la compactación química generará una mayor superficie de contactos de presión-disolución (53,2%). Esta mayor superficie implica una mayor soldadura entre granos y por tanto, la mayor litificación de las muestras de tamaño fino. (Fig. VII.1, Tablas VII. 3 y VII.17).

Aunque en las muestras finas el grado de penetración entre granos es menor (representado por un número inferior de contactos cóncavo-convexos; 2,11%), la superficie de contactos de presión-disolución es mayor (53,2%) y está repartida en más puntos lo que hace adquirir a la roca una mayor cohesión entre granos y por tanto, una mejor resistencia mecánica (Fig. VII.9).

Las muestras tipo MB14, presentan cambios granulométricos a favor de la laminación con tamaños de grano que varían de fino (upper fine) a grueso (upper médium a lower coarse), según la clasificación de Beard y Weyl (1973). Esto implica, como ya se ha explicado, la aparición de zonas de debilidad correspondientes a las láminas de tamaño medio a grueso, debido a su menor litificación, lo que rebaja considerablemente la resistencia mecánica total de la muestra, al no comportarse homogéneamente.

#### **VII.1.1.3.2.2. Ensayo de desgaste por rozamiento:**

Los valores obtenidos tras la realización de este ensayo (Tabla VII.19) muestran una dispersión significativa.

Tabla VII.19: Resultados del ensayo del desgaste por rozamiento.

Muestras	Longitud L (mm)	V (mm <sup>3</sup> )
MB31	34,04-34	330
MB32	36,95-37	427
MB33	36,87-37	427
MB34	36,95-37	427
MB35	38,9-39	500
MB36	49,74-50	1062
MB37	50,08-50	1062
PROMEDIO	40,50	605
DESV. EST	6,58	316

L: Longitud en milímetros de la cuerda.

V: Volumen de materia perdida en mm<sup>3</sup>.

Generalmente, se observa una pérdida importante de materia, lo que indica que este material tiene muy baja resistencia a la abrasión.

Las muestras MB36 y MB37 son las que presentan la mayor pérdida de volumen por rozamiento, esto se debe a que tienen un tamaño de grano medio a grueso (0,4-0,59 mm) y a su baja compactación. Este comportamiento se relaciona muy bien con la baja resistencia observada en los ensayos mecánicos de resistencia a la compresión (tabla VII.16), lógicamente las muestras más finas y con mejor compactación, MB31-MB35, son las que presentan la menor pérdida de volumen (Fig. VII.10).

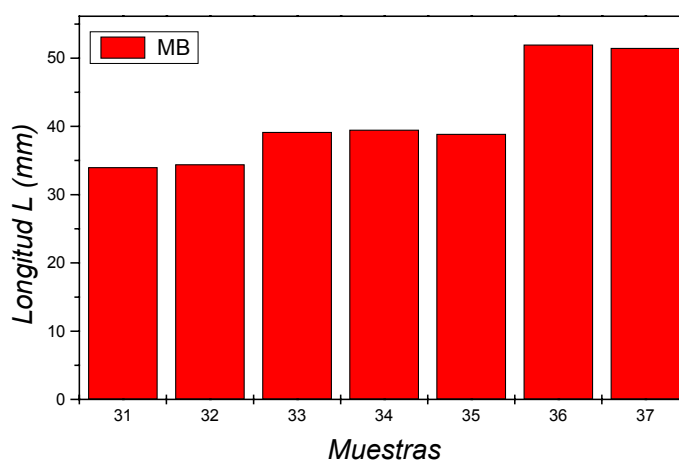


Fig. VII.10: Representación gráfica de los resultados obtenidos en muestras no tratadas en el ensayo de desgaste por rozamiento.

## VII.1.2. ESTUDIO DE LA ALTERABILIDAD:

Los resultados correspondientes a estos ensayos han sido valorados mediante la pérdida de peso experimentada al ser sometida a ciclos de cristalización del sulfato sódico. Las diferentes características texturales y de alterabilidad de las muestras ensayadas han sido recogidas en la Tabla VII.20 y la pérdida de peso correspondiente a cada ciclo salino está representada en el gráfico de la Fig. VII.11.

No se ha podido conseguir el valor la pérdida de peso al final del ensayo, es decir después de 12 ciclos de cristalización y después de lavar las muestras, tal como recomienda la norma RILEM porque aquellas se desmoronaron en la solución salina en el cuarto ciclo, con excepción de las muestras MB1 y MB2 que se desmoronaron al octavo. Por eso, se ha calculado la diferencia de peso al finalizar el tercer ciclo.



Tabla VII.20: Perdida de peso de las muestras sin tratar después de la realización del ensayo de cristalización del sulfato sódico.

Muestras	Tamaño de grano	Laminación	Arcillas	Alterabilidad
MB1	fino	no	escasa	baja
MB2	fino	no	no	muy baja
MB3	medio-grueso	si	si	alta
MB4	media	no	escasa	media alta
MB5	medio-grueso	si-abundante	si	muy alta

Nota: Aunque las muestras llevan la misma numeración que las utilizadas en los ensayos hídricos, no son de las mismas, pero presentan idénticas características petrográficas.

Observando las curvas de la Fig. VII.11 se puede notar un aumento de peso durante el primero ciclo correspondiente a la cristalización de la tenardita dentro de los poros. La cristalización de la tenardita dentro de la porosidad de la roca no provoca ningún efecto disruptivo (Fig. VII.12A y B). Desde el segundo ciclo de cristalización empieza la hidratación de tenardita a mirabilita y empieza, con ello, la arenización de las muestras (Fig. VII.12. C). Esta arenización se debe a la tendencia que tienen estos sulfatos a cristalizar en las capas más externas de la materia (Rodríguez Navarro et al., 1996), facilitando la desagregación de la textura superficial.

Las muestras que han resistido mejor al ataque salino son las muestras que presentan una granulometría fina y libre de laminaciones cruzadas, es decir, las muestras MB1 y MB2, que pudieron resistir hasta el octavo ciclo (Fig. VII.12F). Las muestras de tamaño de grano medio y grueso (MB4) se desmoronaron totalmente al final del cuarto ciclo, pero además las que tienen laminaciones cruzadas se fragmentan y se desplazan de forma paralela a estas laminaciones, de origen sedimentario ya desde el segundo y el tercer ciclo de inmersión según la abundancia de las laminaciones cruzadas como es el caso de las muestras MB3 y MB5 (Fig. VII.12D). Este último fenómeno es debido a la acumulación de la sal (tenardita) dentro de estas zonas de discontinuidad. Al hidratarse, el esfuerzo disruptivo resultante provoca la desplazación de las muestras. La debilidad que muestran estas laminaciones se deben a dos factores. En primer lugar, a la menor cohesión que tienen las láminas de tamaño grueso y en segundo lugar, a la retención de fluidos que se producen en la interfases que representan las laminaciones, debido a una variación sustancial en el sistema poroso, inducida por el cambio textural y granulométrico.

La presencia de arcillas también favorece la alterabilidad como se observa en los resultados de la Tabla VII.20 porque aumenta la retención de la humedad y de las disoluciones salinas y sobretodo porque disminuye, como se ha visto antes el tamaño de los

poros, aunque este factor parece tener una menor incidencia en la alterabilidad que el tamaño de grano y la presencia de laminación.

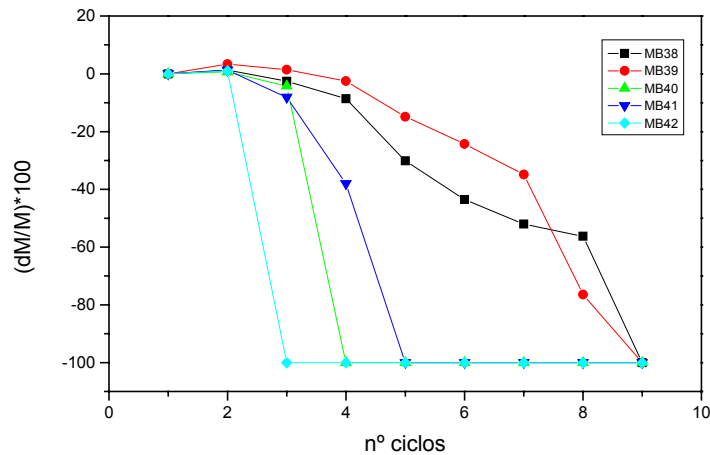


Fig. VII.11: Representación gráfica de la pérdida de peso durante los ensayos de cristalización de sales.

Diferentes autores relacionan la intensidad de alteración al porcentaje de microporos existente en la roca (Gauri y Punuru, 1989) y al tamaño de los accesos de poros, es decir, cuanto más pequeño es el tamaño de acceso de poro, más agresiva es la alteración (Esbert, 1984). En este caso, el porcentaje de microporos es muy bajo y el tamaño de acceso de los poros es alto como se ha mostrado por porosimetría de mercurio. Por ello, la baja resistencia de esta roca a la alteración mediante sales se puede atribuir a:

- la ausencia de fase aglomerante,
- la baja cohesión entre los elementos de la roca y,
- el bajo coeficiente de compactación de la roca.



Figura VII.12: Aspecto de las muestras sin tratar durante el ensayo de cristalización de sales. (A) Aspecto de las muestras antes de empezar los ciclos de cristalización de sal. (B) Aspecto intacto de las muestras al finalizar el primer ciclo de cristalización del sulfato sódico (cristalización de tenardita). (C) Aspecto arenizado de las muestras después del segundo ciclo de cristalización de sales (primer ciclo de hidratación de la tenardita). (D) Desplacación de la muestra a favor de la laminación cruzada en el segundo ciclo. (E) Aspecto desmoronado de las muestras con granulometría gruesa y de las de granulometría fina al final del tercer ciclo. (F) Aspecto de las muestras finas (MB1 y MB2) al final del séptimo ciclo de alteración.

Se realizaron ensayos mecánicos sobre la piedra alterada artificialmente mediante la realización de 3 ciclos de cristalización de sulfato sódico, para valorar el efecto del ataque salino sobre la resistencia mecánica de la misma y se han obtenido los siguientes resultados:

Tabla VII.21: Resultados de los ensayos mecánicos de la roca alterada artificialmente.

	<i>Carga (MPa)</i>	<i>Longitud L (mm)</i>	<i>V (mm<sup>3</sup>)</i>
MB38	4,7	42,25- 42	626
MB39	9,57	49,87-50	1062
MB40	7,84	49,84	1062
MB41	9,26	41,46-41,5	603
MB42	9,26	51,49-51,5	1162
MB43	--	52,24-52	1196

Los resultados confirman la elevada alterabilidad por ciclos de cristalización de sales de estas texturas petrográficas (Fig. VII.13, VII.14), ya que, indican una drástica reducción de su resistencia mecánica y un aumento notable de su desgaste por rozamiento (Tabla VII.21). Esto es debido a que la cristalización del sulfato sódico ha afectado a la cohesión de los granos de cuarzo, rebajando su compactación, con las consiguientes consecuencias mecánicas.

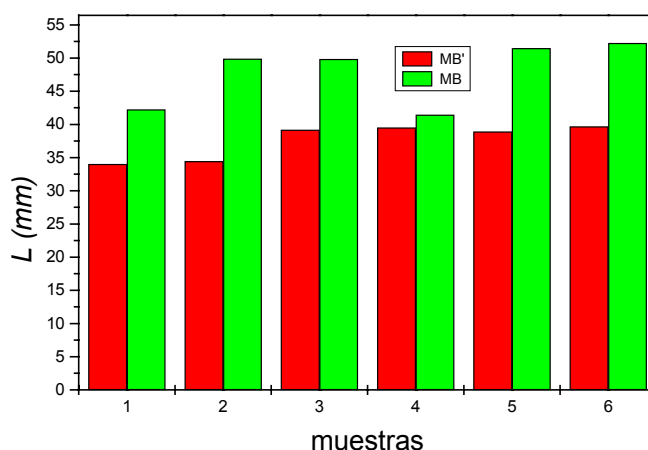


Fig. VII.13: Longitud  $L$  obtenida por desgaste de las muestras en blanco sin alterar (MB) y alteradas artificialmente con el sulfato sódico (MB').

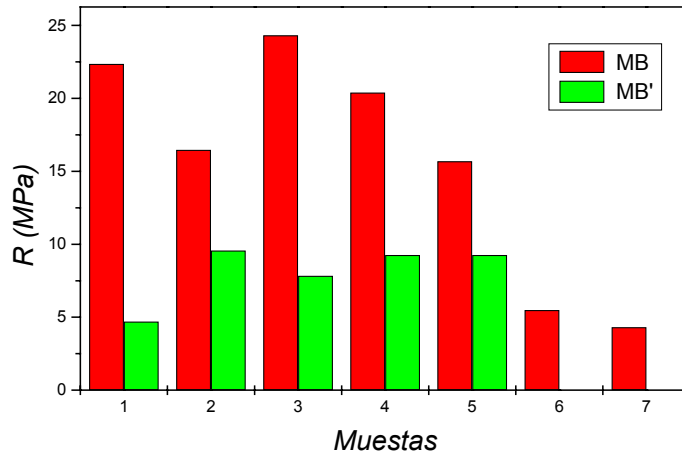


Fig. VII.14: Resistencia a la compresión de las muestras en blanco sin alterar (MB) y alteradas artificialmente con el sulfato sódico (MB').

Los resultados comparativos entre muestras alteradas artificialmente y sin alterar recogidos en la Tabla VII.22 se han obtenido ensayando sólo las muestras de tamaño fino, ya que, las gruesas se rompen al cabo de unas pocas vueltas de cilindro. Por tanto, se ha calculado un nuevo promedio de la longitud  $L$  de las muestras en blanco teniendo en cuenta la variedad de arenisca de tamaño fino sobre la que se realizó el ensayo de las muestras tratadas con sal.

Tabla VII.22: Resultados comparativos de los ensayos mecánicos de la roca alterada artificialmente y sin alterar:

	Carga (Mpa)		Longitud $L$ (mm)	
	Sin alterar	alteradas	Sin alterar	alteradas
PROMEDIO	15,58	8,13	36,74	47,86
DESV. EST	7,90	2,03	1,74	4,75

### VII.1.3. VALORACIÓN DEL MATERIAL Y LOS FACTORES INTRÍNSECOS DE ALTERABILIDAD

El estudio petrográfico ha mostrado que existen cuatro variedades de arenisca en la cantera que son:

- arenisca de grano fino y sin arcillas
- arenisca de grano fino y con arcillas
- areniscas de grano grueso y sin arcillas
- arenisca de grano grueso y con arcillas

Los parámetros resumidos en la tabla VII.23 muestran que la piedra tiene:

- una alta porosidad.
- una alta comunicación de la red porosa,
- la porosidad es de tipo macro y,
- un alto coeficiente de absorción capilar.

Estos parámetros pueden indicar un mal comportamiento del material de construcción, ya que, estas características favorecen la absorción y la circulación del agua en la que están disueltos los agentes contaminantes que acaban atacando a los componentes de la roca, provocando su alteración. Pero hay que tener en cuenta el carácter monomítico de la roca formada principalmente por cuarzo, que le hace muy resistente a la alteración química.

Tabla VII.23: Resumen de los parámetros más significativos de la roca sin tratar.

	Ws (%)	n (%)	C.A.C (Kg/m <sup>2</sup> /s)	Se (%)	Si (%)	C.E (%/min)	Wc (%)	ΔM (%)	L (mm)	Carga (Kg/25 cm <sup>2</sup> )
PROMEDIO	11,07	22,58	0,510	0,70	80,49	0,02	2,54	13,46	40,50	3683,33
DESV. EST	1,705	2,759	0,270	0,66	4,51	0,01	0,85	14,36	6,58	2043,93

El alto coeficiente de evaporación y el bajo contenido en agua crítico (Wc), así como el muy bajo contenido final en agua (Se) muestran que la solución de alteración o el agua, de una manera general, no es retenida por la piedra lo que la protege contra cualquier tipo de alteración en relación con la humedad. A pesar de que la roca muestra una baja resistencia a la acción de las sales, a la compresión y al desgaste por rozamiento.

Los factores intrínsecos que condicionan este comportamiento hídrico, de alterabilidad y su resistencia mecánica son los siguientes:

- alta porosidad
- alta comunicación de la red porosa
- ausencia de cemento

Los factores que rigen las diferencias en el comportamiento entre las variedades de la roca son:

- la presencia de arcillas y,
- la litificación de la roca, que en este caso está en relación con el tamaño de grano.

También, se ha observado que las muestras que presentan fracción arcillosa absorben el agua con más dificultades, tanto por capilaridad como a baja, presión debido a la presencia de la matriz arcillosa infiltrada entre los granos y que tapa total o parcialmente los accesos de los poros, disminuyendo sus diámetros.

Se ha observado, también, que las muestras con granulometría gruesa se corresponden con una baja resistencia mecánica y una muy baja resistencia a la acción de las sales. Esto es debido, como se ha expuesto anteriormente, a que las muestras finas están mejor litificadas que las gruesas.

#### **VII.1.4. CONCLUSIÓN:**

Atendiendo a los resultados de los análisis petrográficos, hídricos, mecánicos y de alterabilidad se puede deducir, que los mecanismos de alteración de esta piedra sólo pueden ser mecánicos o físicos, ya que la composición monomítica cuarzosa de la roca, la ausencia de minerales y de cemento alterables junto con su excelente comportamiento hídrico, imposibilitan todo tipo de alteración química de la roca. Por tanto, tal y como ha sido explicado durante los ensayos, la vulnerabilidad de este material radica en su baja resistencia mecánica, que es debida a su bajo grado de litificación. En conclusión, esta roca será muy vulnerable a los agentes de alteración cuyos mecanismos implican fuerzas mecánicas disruptivas como es el caso de los ciclos de cristalización de sales solubles, el de los ciclos del hielo-deshielo o el de los ciclos de dilatación térmica.

## VII.2. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL DEL MONUMENTO:

### VII.2.1. ESTUDIO PETROGRÁFICO:

El estudio petrográfico no ha mostrado ninguna diferencia en la composición mineralógica de las muestras del acueducto con respecto a las muestras de la cantera ni en el microscopio óptico ni en microscopio electrónico. No se ha detectado ningún producto de alteración ni de neoformación. Las muestras estudiadas son muy parecidas a las procedentes de las canteras romanas y, por tanto, los datos petrográficos son muy similares a los recogidos en la tabla VII.1 de este capítulo.

### VII.2.2. ESTUDIO DEL SISTEMA POROSO:

Los resultados dados por la porosimetría de mercurio son muy similares a los datos obtenidos de las rocas de la cantera lo que indica, que el sistema poroso no ha sufrido ningún cambio.

Los resultados obtenidos por la porosimetría de mercurio están resumidos en la tabla VII.24.

Tabla VII.24: Los resultados de la porosimetría de mercurio de las muestras del monumento.

	n (%)	Dre	Dap	Macro (%)	Micro (%)	Inf (%)	n. at (%)	D.m.p (µm)
A1	21,76	2,628	2,0563	88,84	10,12	1,04	2,55	47,10
A2	21,29	2,64	2,058	87,72	11,28	1,06	2,51	37
A3	21,06	2,633	2,079	85,68	12,63	1,68	3,65	38,4
A4	21,80	2,616	2,0459	88,67	10,02	1,31	3,66	31,67

A1: Arenisca de tamaño de grano grueso y con una moderada selección.

A2: Arenisca de tamaño de grano grueso y con una moderada selección.

A3. Arenisca de tamaño fino (Lower fine).

A4: Arenisca de tamaño fino (Upper fine).

n (%): Porosidad total.

Dre (Kg/m<sup>3</sup>): Densidad real.

Dap (Kg/m<sup>3</sup>): Densidad aparente.

Macro (%): Macroporosidad.

Micro (%): Microporosidad.

Inf (%): Infraporosidad.

n. at (%): Porosidad atrapante.

D.m.p (µm): Diámetro medio de poro.

Podemos observar que, independientemente del tamaño de grano de las muestras, los valores de la distribución porosa obtenidos son muy parecidos. Con la excepción que las



gruesas con selección moderada (A1 y A2) presentan más variedad de tamaños de acceso de poros (Tabla VII.25) debido a las razones ya explicadas en el apartado VII-1-1-2-1.

Tabla VII.25. Porcentaje de porosidad correspondiente a la máxima intrusión de mercurio.

Muestras	Radios correspondientes a la	Porcentaje de porosidad
A1	38,88-69,58	69,84 %
A2	28,25-53,49	66,53 %
A3	32,24-45,62	56,86 %
A4	28,78-39,85	67,07 %

Los resultados muestran que el cambio de la granulometría afecta al tamaño de los accesos de los poros, ya cuando más gruesas son las muestras más grandes se hacen los accesos de poros.

### VII.2.3. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HÍDRICO

#### VII.2.3.1. Absorción al vacío:

Los resultados obtenidos por el ensayo de absorción al vacío están resumidos en la tabla siguiente:

Tabla VII.26: Resultados del ensayo de absorción al vacío de las muestras sin tratar procedentes del monumento.

Muestras	Dap	Dre	Ws %	n %
AQ101	2,06	2,65	10,75	22,17
AQ102	2,06	2,65	10,83	22,3
AQ103	2,04	2,65	11,23	22,93
AQ201	2,09	2,65	10,03	20,98
AQ202	2,05	2,64	10,99	22,54
AQ203	2,1	2,64	9,7	20,44
PROMEDIO	2,07	2,65	10,59	21,89
DESV. EST	0,023	0,005	0,593	0,968

n (%) : Porosidad accesible.

Dap. : Densidad aparente (gr/cm<sup>3</sup>)

Dre. : Densidad real hidrostática.

Ws (%) : Contenido en agua a saturación.

La porosidad es alta y viene acompañada de un coeficiente de saturación importante que es independiente de la granulometría de las muestras ensayadas.

#### VII.2.3.2. Desorción:

La realización del ensayo de la desorción con las muestras saturadas al vacío, y procedentes del ensayo de la absorción al vacío, han dado los siguientes resultados:

Tabla VII.27: Resultados del ensayo de absorción al vacío de las muestras sin tratar procedentes del monumento.

Muestras	Se %	Wd %	C.E %	Wc (%)
AQ101	0,06	0,007	0,038	2,49
AQ102	0,01	0,015	0,037	2,81
AQ103	0,03	0,004	0,039	2,67
AQ201	0,07	0,025	0,033	2,33
AQ202	0,1	0,011	0,034	2,57
AQ203	0,016	0,01	0,035	2,1
PROMEDIO	0,048	0,012	0,036	2,50
DESV. EST	0,035	0,007	0,002	0,252

C.E (%/min) : Coeficiente de evaporación.  
 Se (%): Grado de saturación final respecto al máximo contenido de agua absorbida.  
 Wd (%) : Grado de saturación final respecto al peso de la muestra.  
 Wc (%) : Contenido en agua crítico

El agua retenida por parte de las muestras al final del proceso de secado es casi nula como muestran los valores de Se presentados en la Tabla VII.27.

El contenido en agua crítico (Wc) es muy bajo y se sitúa alrededor del 2 % del contenido en agua máximo, lo que indica una alta velocidad de evaporación.

La forma de la curva (Fig. VII.15) muestra que la evaporación se hace según una recta, lo que indica que el proceso de secado no puede ser más rápido. El conjunto de estas observaciones indican una muy buena comunicabilidad de la red porosa.

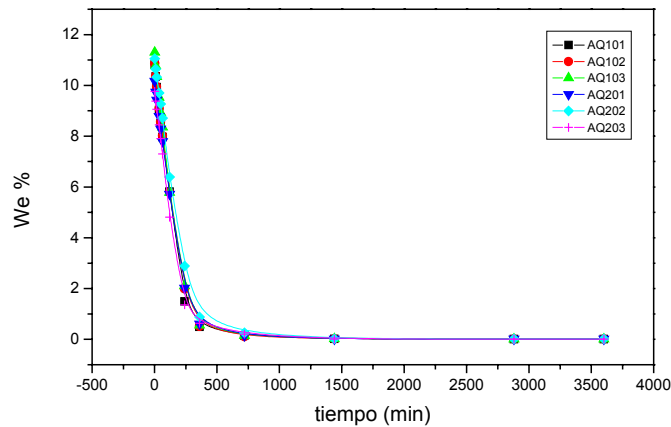


Fig. VII.15: Desorción de las muestras sin tratar procedentes del acueducto.

### VII.2.3.3. Absorción capilar:

El coeficiente de absorción capilar y el grado de saturación final obtenido a final de este ensayo están representados en la tabla siguiente:

Tabla VII.28: Resultados de la absorción capilar de las muestras sin tratar procedentes del monumento.

Muestras	St (%)	Si (%)	C.A.C
AQ101	9,18	85,39	0,539
AQ102	9,39	86,7	0,53
AQ103	9,63	85,75	0,533
AQ201	8,47	84,44	0,489
AQ202	9,46	86,08	0,531
AQ203	8,55	88,14	0,52
PROMEDIO	9,11	86,08	0,52
DESV. EST	0,49	1,26	0,02

St (%): Contenido de agua adquirido.

Si (%): Grado de saturación alcanzado, respecto al contenido total de agua en saturación  $W_s$ .

C.A.C ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$ ): Coeficiente de absorción capilar ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$ ).

El coeficiente de absorción capilar muestra valores muy altos y viene confirmado por la llegada del agua a la cara superior de las muestras en los primeros segundos (Fig. VII.16).

Los valores de Si reflejan que las muestras absorben agua incluso hasta más del 85 % de la cantidad de agua absorbida al vacío, y solo por fuerzas capilares. Este valor implica una muy buena comunicabilidad de la red porosa. Alonso et al., (1987) consideran este parámetro como el coeficiente de comunicabilidad de la red porosa.

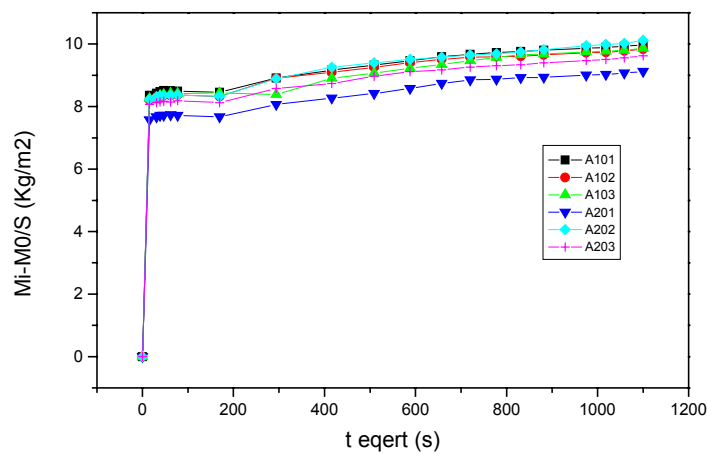


Fig. VII.16: Capilaridad de las muestras sin tratar procedentes del acueducto.

La curva de absorción capilar (Fig. VII.16) muestra que las probetas absorben, en los primeros segundos, una cantidad muy importante del agua total absorbida durante el proceso de absorción capilar. El punto de inflexión de la curva se encuentra a unos pocos segundos del principio del ensayo. La pendiente es muy importante, se acerca a 90°. Este conjunto de observaciones indica una velocidad muy alta del proceso de absorción capilar.

#### **V.2.4.CONCLUSIÓN:**

Los resultados petrográficos e hídricos obtenidos a partir de las muestras del monumento no presentan ningún tipo de variación con respecto a las muestras procedentes de la cantera, lo que es indicativo de que no se han producido daños internos en la roca. Generalmente, estos daños se manifiestan por cambios en el comportamiento hídrico inducidos por cambios en el sistema poroso y/o en la composición mineralógica o química de la roca. En nuestro caso, la similitud entre los resultados del comportamiento hídrico de las muestras procedentes de la cantera y del monumento es debida a la invariabilidad de las características petrográficas y del sistema poroso a lo largo de los siglos de exposición a la intemperie. Esto indica que la roca ha permanecido intacta desde su puesta en obra y que las únicas variaciones que ha sufrido son de un orden estético (pátinas de envejecimiento) junto con una ligera arenización superficial ocasionada por la dilatación térmica diferencial de los granos de cuarzo en la superficie de la roca y que no afecta a su interior por la baja conductividad térmica del cuarzo. Por todo ello, se ha considerado innecesario seguir con más ensayos y análisis sobre la roca del monumento y se ha dirigido la investigación a buscar, dentro de la gama de productos comerciales de restauración y de protección de la piedra, los más idóneos. La finalidad es intentar mejorar las características mecánicas de la roca y, al mismo tiempo, protegerla de los agentes más agresivos que condicionan su alterabilidad como es el caso de las sales. Pero todo ello sin perjudicar a sus características físicas originales, ya que éstas son las que han garantizado su gran resistencia hasta la época actual en un ambiente libre de sales solubles que tal y como se ha demostrado, es el único agente de alteración realmente dañino, que puede actuar en las condiciones climáticas que reinan en la zona donde se ubica el monumento.