Estudio de las propiedades físicas de unas muestras de roca de construcción del conjunto Palacio de San Esteban. Murcia.
Extraido de:
Arana, R.; Mancheño, M.A.; y Hernández, J.M. (2000) *Estudio Del Estado De Deterioro Del Conjunto Arquitectónico De San Esteban*. Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.

Departamento de Química Agrícola, Geología y Edafología.
Universidad de Murcia.

5.2.7.1. Densidades real y aparente

A partir de las pesadas de las muestras secas y saturadas de agua a vacío efectuadas en el aire y saturadas de agua medidas en el seno del agua, se determinan mediante un sencillo cálculo:

- el volumen total de la roca o volumen aparente,
- el volumen real que ocupan los granos cristalinos y
- el volumen de poros

y a partir de estos se determinan:

- Densidad real
- Densidad aparente
- Porosidad accesible al agua
- Porosidad total o absoluta
- Porosidad aparente y
- Compacidad

La media de los resultados obtenidos es:

	Densidad (g/cm^3)		Porosidad (%)			Compacidad (%)
Muestra	real	aparente	accesible	absoluta	aparente	
Sillares	2,64	1,66	37,07	58,90	22,32	62,93
Cantera	2,71	1,73	36,22	56,78	20,98	63,78

Se puede observar en los sillares del monumento una disminución de la densidad real respecto a los valores medidos en la roca de cantera debido a la formación de productos nuevos en los procesos de alteración de la roca. Así mismo, la densidad aparente es algo inferior porque se forman nuevos huecos al separarse los materiales formados a expensas de los minerales existentes.

Las porosidades aumentan, tanto la accesible al agua como la absoluta y la aparente, sobre todo esta última que lo hace en torno a un 6% de su valor inicial. El aumento de las porosidades permitirá un mayor transporte de materia a través de la roca y los procesos de alteración pueden verse incrementados.

La compacidad disminuye ligeramente como consecuencia del aumento de volumen de poros y permite deducir que la roca presente en los sillares se hace más porosa y menos resistente que la extraída de la cantera.

5.2.7.2. Carga de rotura o resistencia a la compresión

Los ensayos efectuados sobre un conjunto de probetas se reflejan en la siguiente tabla:

Muestra	Valor medio Kg/cm^2	Valor máximo Kg/cm^2	Valor mínimo Kg/cm^2
Cantera	96,1	117,27	74,5

Se puede afirmar que la piedra utilizada en la construcción del edificio esta catalogada como de resistencia débil según la clasificación de Hawkes y Mellor (1970) al estar comprendida entre 70 y 200.

5.2.7.3. Comportamiento hídrico

En el estudio del comportamiento hídrico se han tenido en cuenta los poderes de absorción libre de agua, el poder de succión y ascenso capilar y la desorción libre o secado. Estos comportamientos nos dan una idea de la capacidad de movimiento del agua dentro del sistema poroso de la roca.

5.2.7.3.1. Absorción libre de agua

Se efectúa colocando una de las caras de las probetas sobre el agua de tal forma que queden sumergidas hasta una altura constante de 2 mm en la misma; a continuación se miden a intervalos de tiempo el peso y la altura que alcanza la mancha de humedad.
A partir de estas medidas representadas frente al tiempo, se obtienen las curvas de absorción libre de agua, poder de succión y ascensión capilar.
En el gráfico 5.1 se puede observar que las muestras de sillares absorben más agua que la roca de cantera y también lo hacen más rápidamente; esto quiere decir que además de ser capaces de albergar más agua, la absorción se efectúa en menos tiempo, por lo cual los procesos de alteración inherentes al paso del agua serán más efectivos en las rocas alteradas.

5.2.7.3.2. Ascensión capilar y poder de succión

El ascenso capilar sigue la misma norma observada para la absorción (Gráfico 5.2), alcanzando valores máximos de 1,77 cm frente a 1,22 de la cantera. La ascensión capilar es por supuesto superior a los valores en equilibrio alcanzados en el gráfico, pero para poder comparar los valores de cantera con los del monumento sólo podemos considerar la parte inicial de la curva debido a que las probetas obtenidas de los sillares no sobrepasan los 15 mm de arista máxima. De igual modo, los poderes de succión son

muy superiores en las muestras alteradas (Gráfico 5.3). Estos valores llegan hasta 1,17 g/cm^2 frente a 0,37 g/ cm^2, que justifican la rápida absorción del agua en el edificio.
Para la roca de cantera, realizando medidas sobre probetas de tamaño adecuado, los datos de ascensión capilar son los siguientes:

Tiempo	Altura (cm)
5	2,5
10	3,7
30	6,5
60	10,2
90	12,5
120	14,0

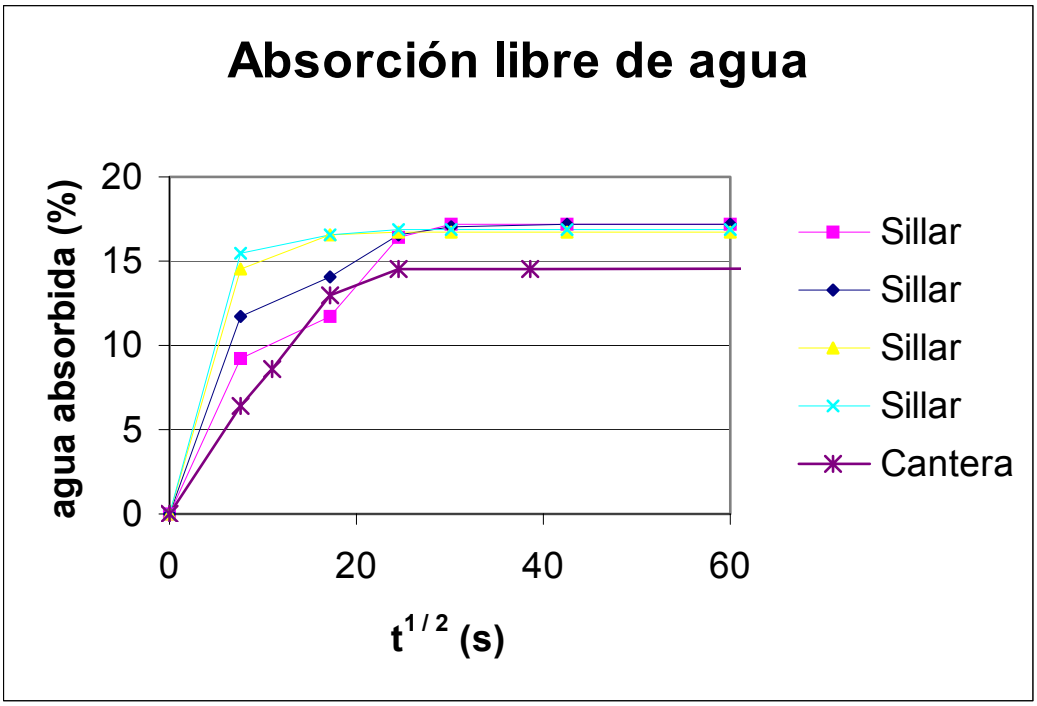

Gráfico 5.1.

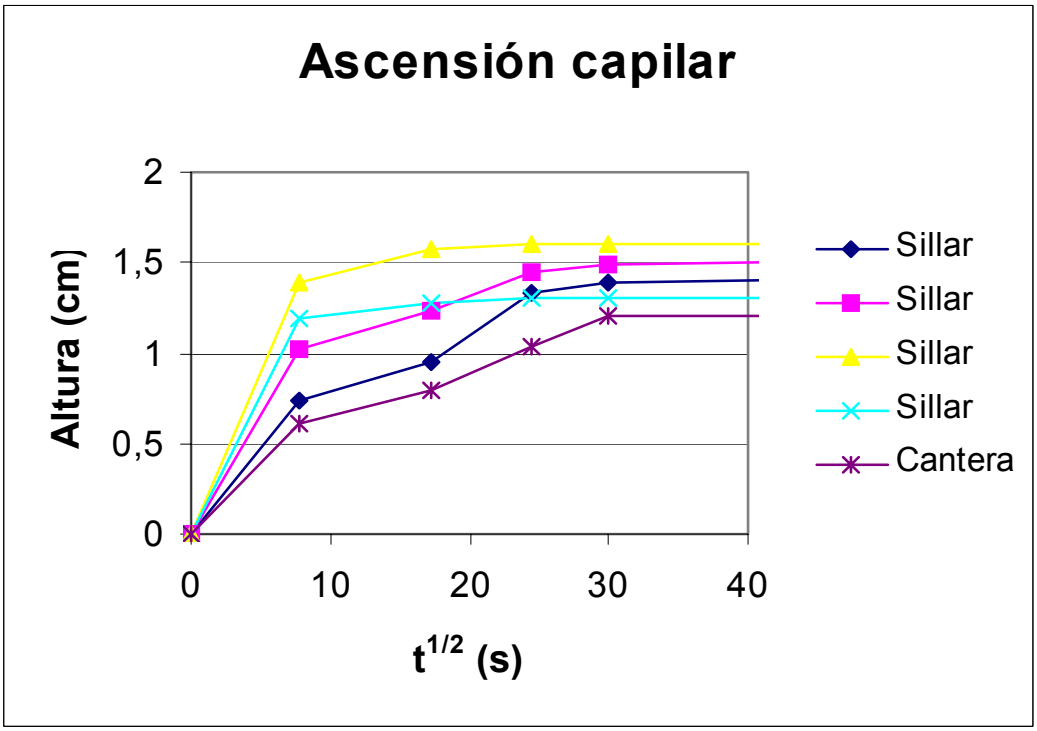

Gráfico 5.2

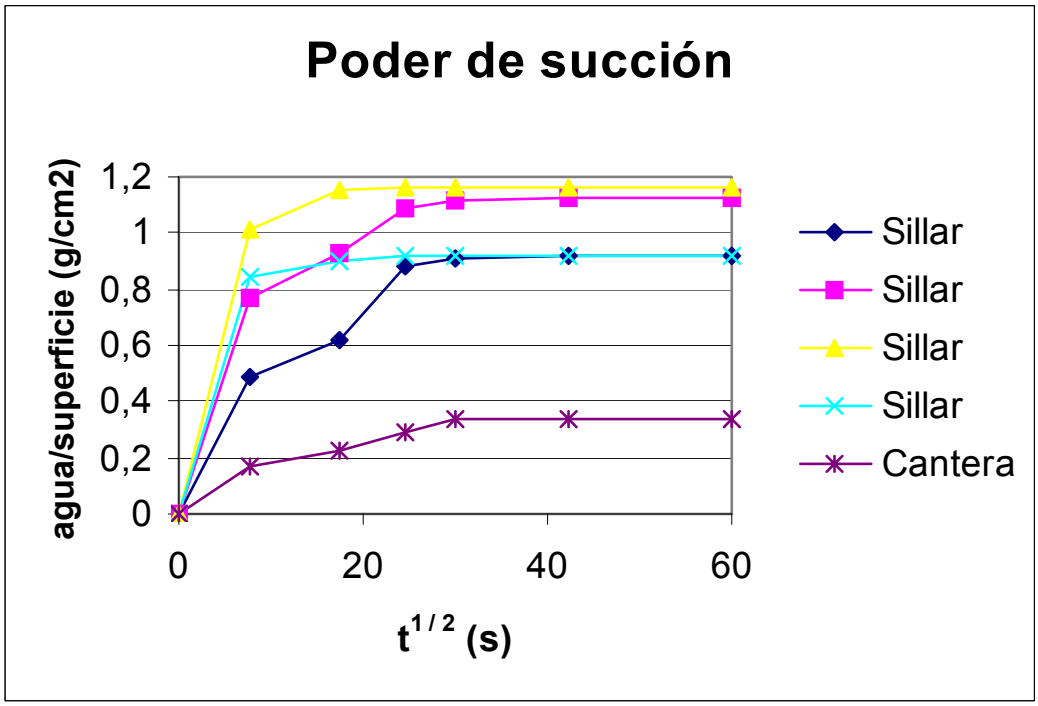

Gráfico 5.3

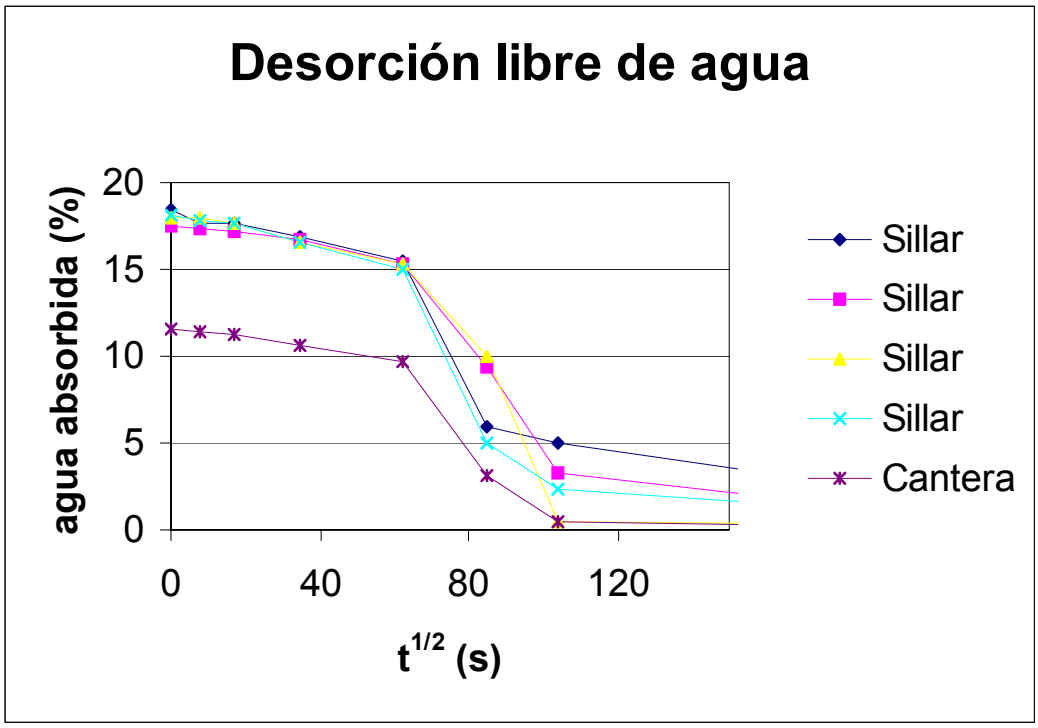

Gráfico 5.4

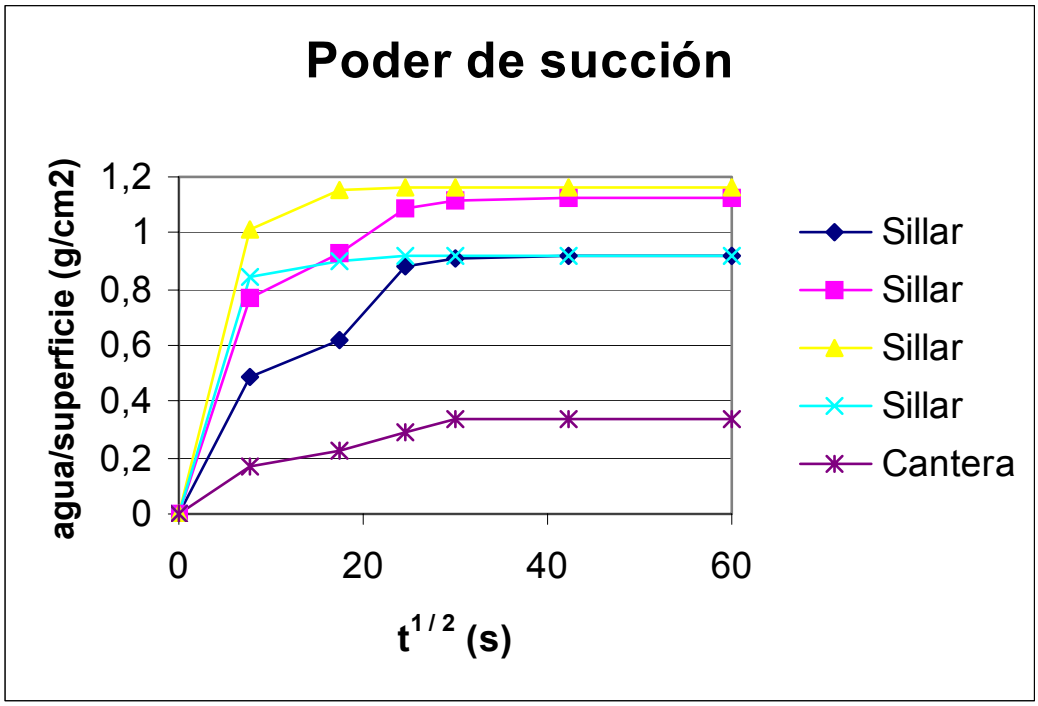

Gráfico 5.3

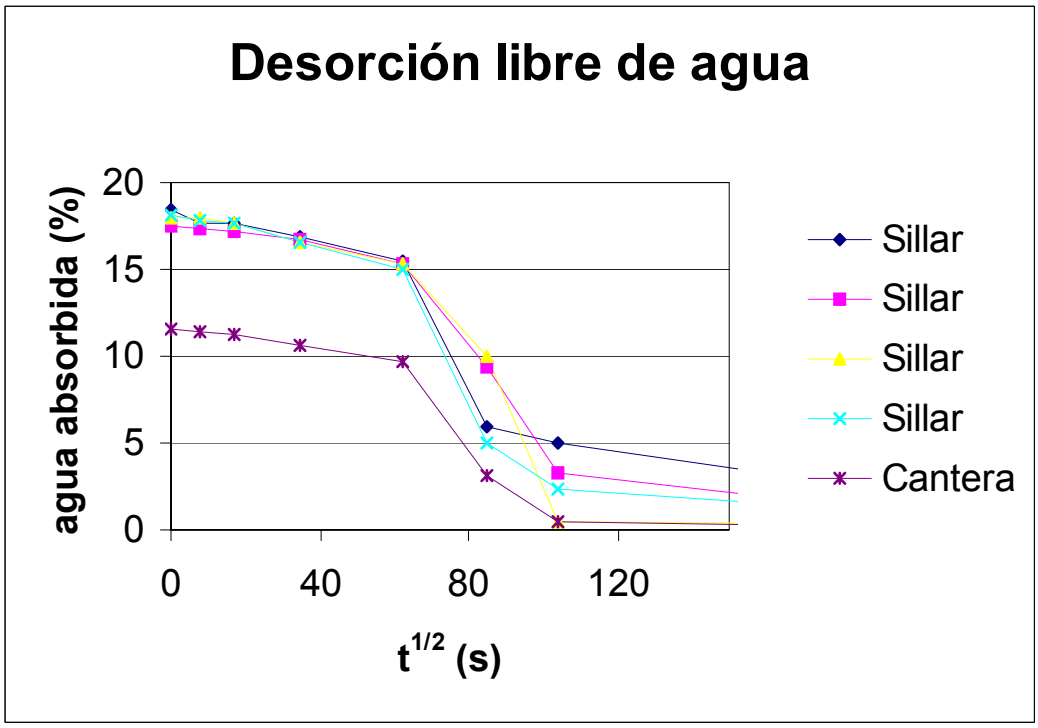

Gráfico 5.4

5.2.7.3.3. Desorción libre de agua

Observando las curvas de secado del gráfico 5.4, se extrae la conclusión de que las velocidades de secado de las muestras de sillares son similares a las de la cantera, de lo que se deduce que la distribución del sistema poroso es similar en los dos casos. Al final de la curva, se puede comprobar que la cantidad de agua retenida, una vez alcanzado el equilibrio en condiciones climáticas normales, es superior en las muestras primeras y el secado completo tarda varios días, hecho que está en consonancia con el aumento de porosidad que han sufrido dichas muestras.

5.2.8. Ensayos de laboratorio

Se han realizado una serie de tratamientos sobre la roca de cantera con objeto de averiguar la forma de hacerla más resistente a los agentes atmosféricos responsables del deterioro de la misma.

5.2.8.1 Tratamientos de consolidación

Con objeto de mejorar las propiedades mecánicas de los sillares, se utilizan una serie de productos denominados consolidantes que tienen la misión de corregir algunas de ellas para que en suma la roca soporte mejor los esfuerzos a los que se ve sometida.
Todos ellos se basan en depositar una película sobre los granos cristalinos de roca, recubrimiento que puede ser de distinta naturaleza. Entre estos compuestos, se encuentran las resinas acrílicas y los silicatos de etilo; las primeras actúan como un adhesivo que impide que la roca se disgregue y los segundos aportan a la roca sílice como cemento intergranular.

Tanto unos como otros deben ser aplicados en disolución para disminuir su viscosidad con el objeto de conseguir una buena penetración en el seno de la roca y comunicar sus propiedades a la mayor masa posible de piedra. Dependiendo de los disolventes con los que se prepare cada tratamiento se pueden obtener distintos resultados; por ello los laboratorios fabricantes proporcionan distintos preparados que en ocasiones sólo difieren en los aditivos y es preciso ensayarlos sobre el sustrato que nos ocupa para elegir el que mejor se adapte a nuestros propósitos. Una vez absorbidos por la piedra, el producto evoluciona químicamente polimerizando y proporcionando una película de recubrimiento que aporta las propiedades buscadas.

Entre los consolidantes estudiados se encuentran:

Denominación comercial	Sustancia activa	Disolvente	Fabricante
Acrisil 201/ON	Resina acrílica	Acetato Etilo	CTS
Consolidante 1	Silicato de Etilo	White Spirit	---------
Estel 1000	Silicato de Etilo	-----	CTS

Estel 1100	Silicato de Etilo hidrofugante	-----	CTS

El consumo de material según el producto aplicado se refleja en la tabla siguiente:

Producto	Aumento de peso seco %	Carga acumulada g/m^2	Rendimiento estimado Kg/m^2
Acrisil	0,21 - 0,24	103	0,25
Consolidante 1	0,78 - 1,1	419	0,6
Estel 1000	0,50 - 0,75	337	0,4
Estel 1100	0,84 – 0,90	391	0,45

Una vez transcurridos los tiempos de secado y polimerización, las probetas han sido sometidas a los siguientes ensayos:

- Densidad real y aparente
- Resistencia a la compresión
- Estudio por SEM

Los resultados obtenidos para las probetas tratadas se tabulan de igual forma que los de las muestras de la cantera, de esta forma podremos comparar las variaciones respecto a las que no han recibido ningún tratamiento.

5.2.8.1.1. Densidad real y aparente
Se expresan en la siguiente tabla

Muestra	Densidad (g/cm^3)		Porosidad (%)			Compacidad (%)
	real	aparente	accesible	absoluta	aparente	
Acrisil	2,67	1,78	33,08	49,61	18,60	66,92
Consolidante 1	2,64	1,83	30,66	44,22	16,77	69,34
Estel 1000	2,57	1,85	27,91	38,75	15,05	72,09
Estel 1100	2,63	1,89	28,01	38,91	14,79	71,99
Cantera	2,71	1,73	36,22	56,78	20,98	63,78

Todos los productos disminuyen ligeramente la densidad real al tener el producto seco una densidad mas baja que la piedra, sin embargo aumentan la densidad aparente porque en mayor o menor medida rellenan huecos de la roca.
De acuerdo con lo anterior la porosidad disminuye sensiblemente y la compacidad aumenta en el mismo grado.

El cambio de estas propiedades es lógico, ya que de hecho se deposita una capa de producto sobre las paredes del sistema poroso de la roca y esta capa tiene un espesor apreciable, por tanto estas variaciones son las que cabe esperar.

5.2.8.1.2. Carga de rotura o resistencia a la compresión

Los resultados que se muestran en la tabla siguiente indican que todos los productos, en mayor o menor medida aumentan el valor de la carga de rotura, dándose la circunstancia que este valor es ligeramente mayor en las muestras en las que se ha consumido una cantidad levemente menor de producto en el tratamiento. Basándose en este hecho será necesario seguir estrictamente la aplicación idónea del producto elegido a fin de no mermar las propiedades por un exceso de cantidad de consolidante aplicada.

Muestra	Valor medio Kg/cm^2	Valor máximo Kg/cm^2	Valor mínimo Kg/cm^2
Acrisil	137,1	138,8	135,6
Consolidante 1	170,8	183,6	159,6
Estel 1000	199,5	252,8	147,6
Estel 1100	186,5	186,8	186,4
Cantera	96,1	117,2	74,5

5.2.8.1.3. Cambio de color

El color es una propiedad que no debe cambiar ni durante el tratamiento ni con posterioridad al mismo, ya que produce un efecto visual indeseado sobre las paredes del monumento.

Se ha medido con la escala colores de comparación subjetiva de Munsell, encontrándose que solo uno de los tratamientos produce sobre la superficie de la piedra un cambio apreciable en el mismo, dejando un aspecto de mojado con superficies brillantes que producen algunos reflejos de la luz solar; este mismo tratamiento produce una coloración menos intensa en el interior de la roca, siendo menos apreciable que el que se produce en las caras externas.

Muestra	Color
Acrisil	7/2 2,5Y a 8/1 YR
Consolidante 1	8/1 10YR
Estel 1000	8/1 10YR
Estel 1100	8/1 10YR
Cantera	8/1 10YR

Este cambio de color supone un oscurecimiento de la roca y puede ser una condición determinante para la **no-elección** de dicho preparado

5.2.8.1.4. Estudio SEM

En el ámbito microscópico, los diversos tratamientos ensayados muestran también diferente comportamiento. Los hidrofugantes no dejan apreciablemente una película de dimensiones lo suficientemente grandes como para ser observada, mientras que los consolidantes si lo hacen, y dicha película es fácilmente identificada y estudiada. De tal forma, este tipo de estudio no ha arrojado datos relevantes en cuanto al comportamiento de los distintos productos ensayados.

Haciendo una referencia a los cuatro consolidantes estudiados, se ha encontrado lo siguiente:

Acrisil
Deja una capa que forma islotes de 20 a 140 μm de diámetro, entre los cuales la roca aparece sin recubrir. En las zonas donde se adhiere, tapona por completo el sistema poroso y toma la apariencia de una costra parcialmente desprendida y levantada por sus bordes (Foto SEM 12).

Consolidante 1
Tiene un poder de recubrimiento bastante bueno, tapizando bien los poros de la roca; la película aparece fragmentada prácticamente en toda su extensión en trozos de tamaño que oscila entre 2 y 15 μm dejando aberturas de 1 a 2 μm de anchura. Los bordes de dichas aberturas tienden a despegarse del sustrato y se levantan del mismo, quedando adheridos los fragmentos del depósito solo por su parte central (Foto SEM 13).

Estel 1000
Forma una película que recubre muy bien los granos cristalinos de la roca con una película muy fina de espesor bastante uniforme; también presenta resquebrajamientos que hacen aparecer fragmentos de 2 a 10 μm de anchura, aunque algunas zonas no se resquebrajan dejando superficies de más de 20 μm sin solución de continuidad. Los bordes de la superficie craquelada tienden fuertemente a levantarse en los fragmentos pequeños, apareciendo casi enroscados sobre sí, y lo hacen débilmente en los grandes, permaneciendo casi totalmente adheridos al sustrato (Foto SEM 14).

Estel 1100
Manifiesta un comportamiento similar al producto anterior, con poderes de recubrimiento y penetración muy buenos, resultando películas muy adheridas que dejan manifestar las formas cristalinas de las superficies que recubren. La fragmentación que presenta el recubrimiento es de tal forma, que permite la continuidad de la misma y si se pudiera despegar estaría en una sola pieza, dejando fragmentos sueltos en raras ocasiones. Los bordes de las fisuras de la película se levantan débilmente, dejando aberturas de 0,5 a 2 μm de anchura, dando una apariencia general muy compacta pero porosa (Foto SEM 15).

Los granos cristalinos que aparecen sueltos sobre la superficie de los recubrimientos son debidos a los desprendimientos que produce la manipulación de la muestra en su preparación, ya que se han observado zonas del interior de los poros de una cara de fractura de la roca tratada con el correspondiente producto.

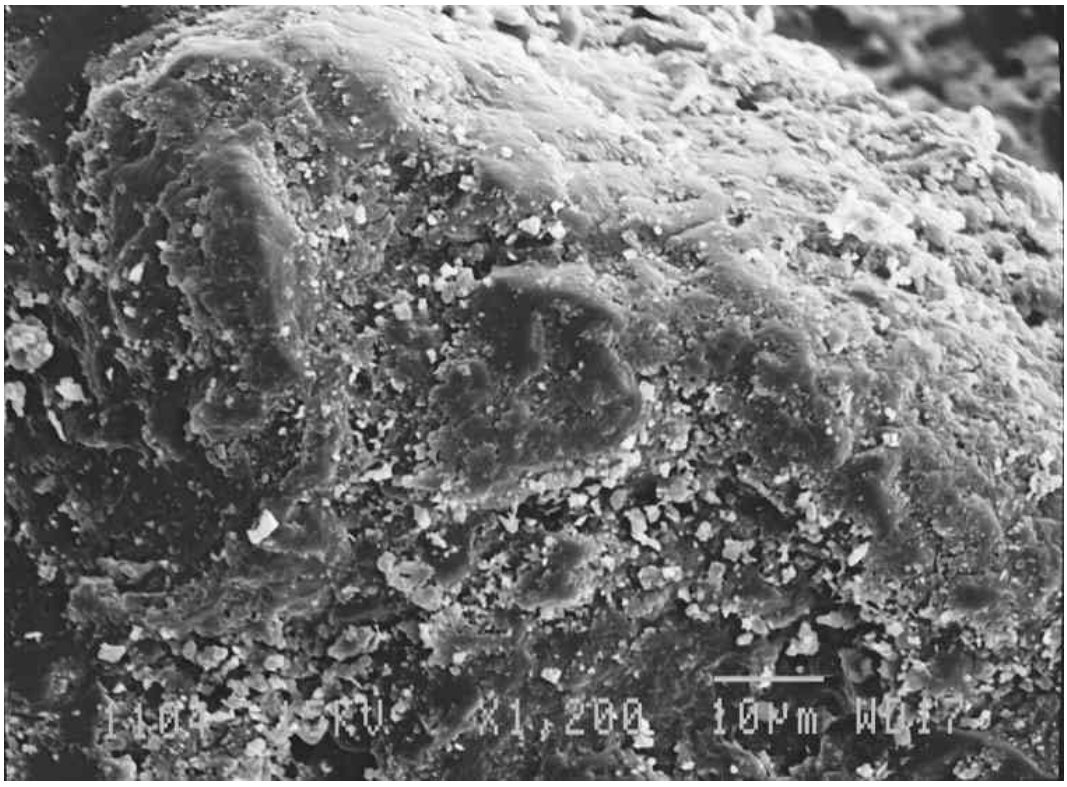

Foto SEM 12. Acrisil. 2700X (reales)

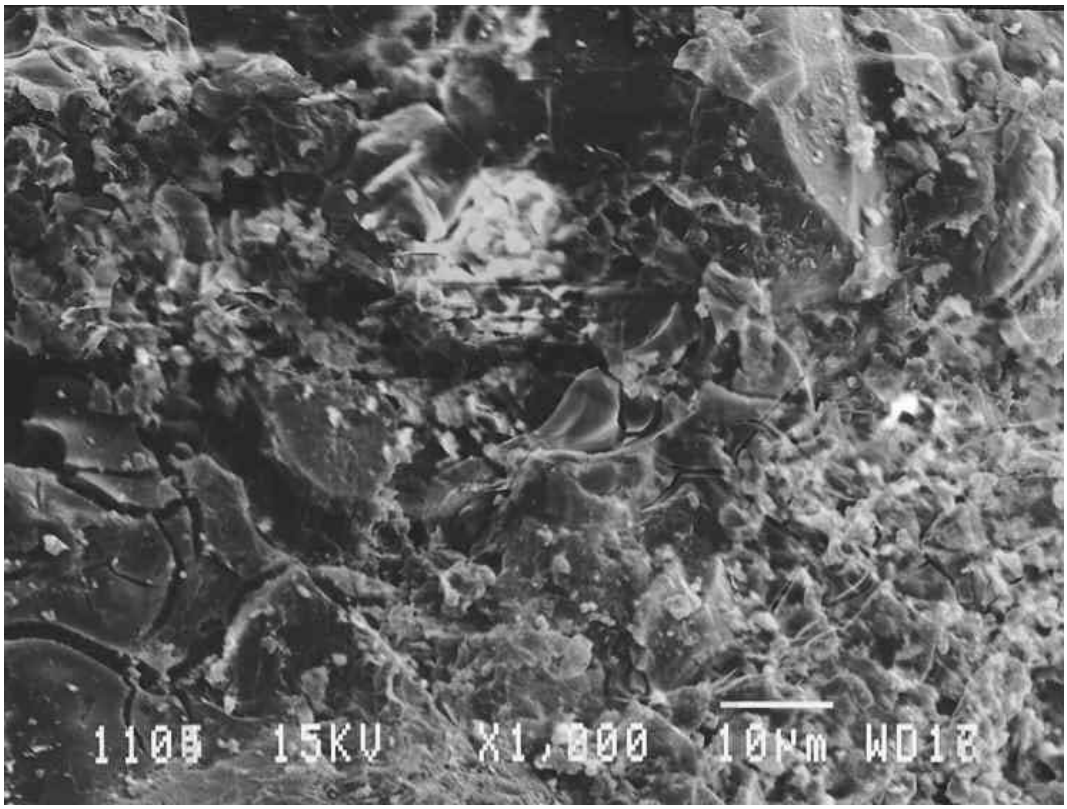

Foto SEM 13. Consolidante 1. 2640X (reales)

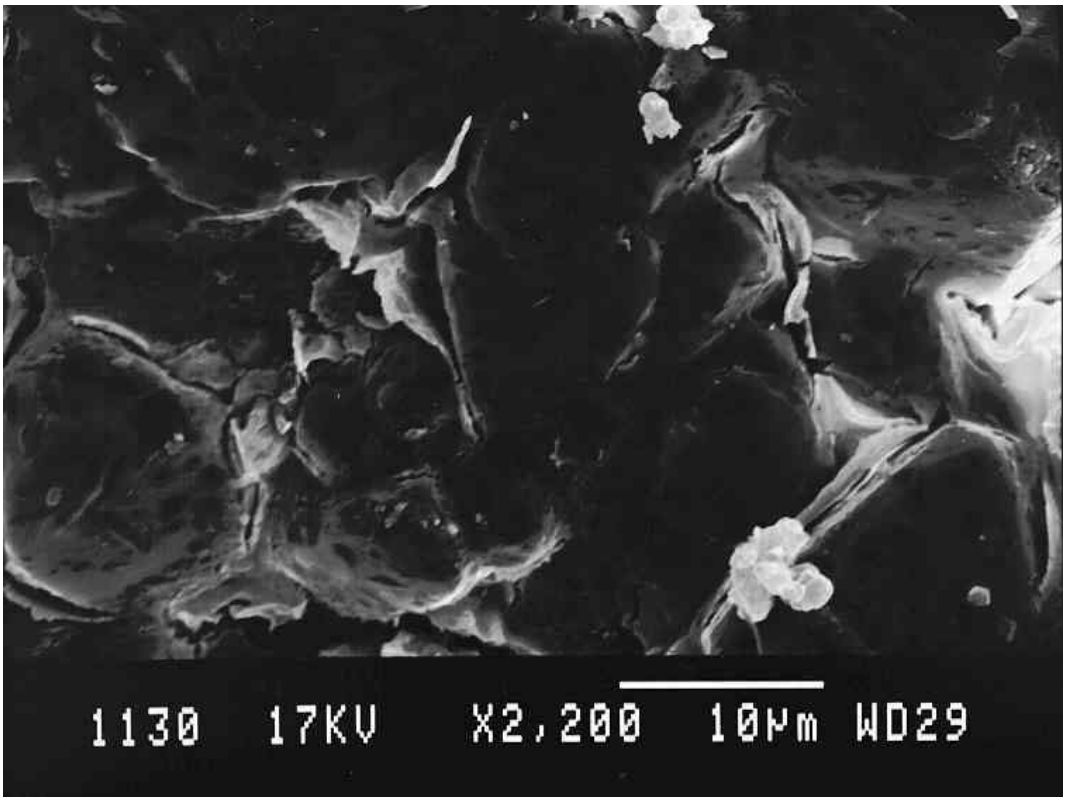

Foto SEM 14. Estel 1000 4800X (reales)

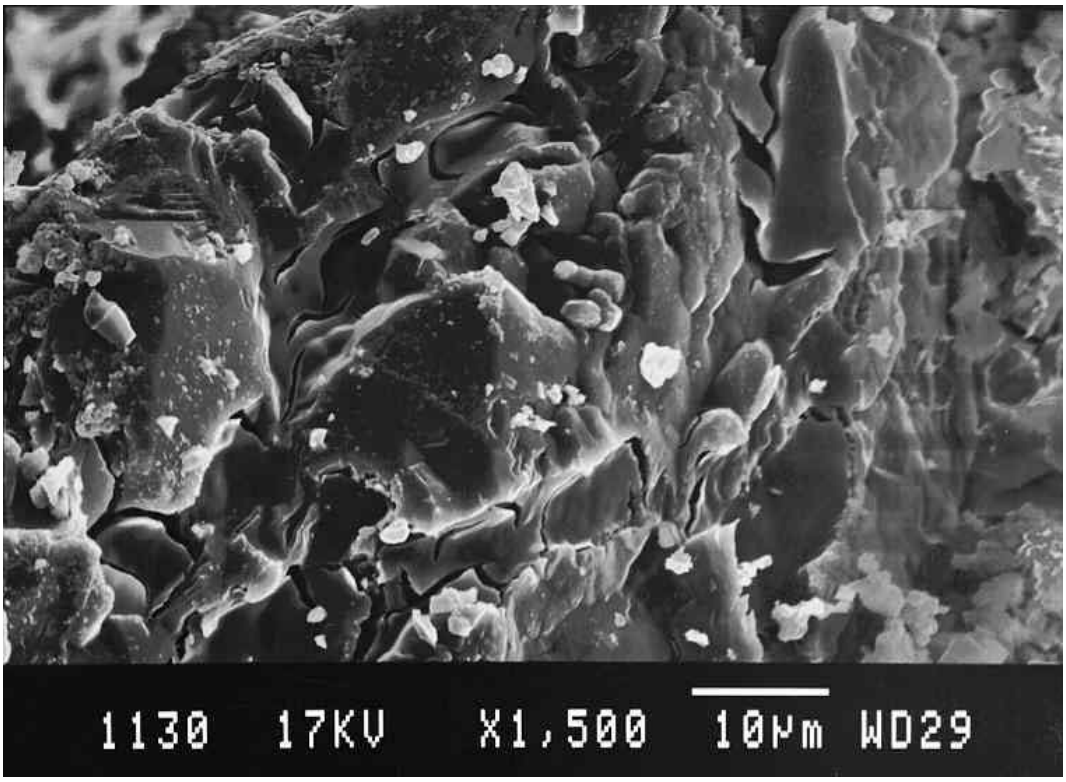

Foto SEM 15. Estel 1100. 3300X (reales)

5.2.8.2 Tratamiento de hidrofugación

Se han utilizado tres preparados hidrofugantes:

Denominación comercial	Sustancia activa	Concentración	Disolvente	Fabricante
Hidrofugante 1	Polisiloxano	15%	White Spirit	----------
Silo 111	Polisiloxano	-----	-----	CTS
Estel 1100	Silicato de Etilo hidrofugante	-----	-----	CTS

Los productos han sido aplicados según las recomendaciones de cada fabricante y al objeto de que no puedan interferir entre sí componentes de distinta naturaleza, se ha utilizado sobre cada consolidante el hidrofugante fabricado por la misma firma comercial. Así, en la tabla siguiente quedan reflejadas las asociaciones de productos

Consolidante	Hidrofugante
Acrisil	----------
Consolidante 1	Hidrofugante 1
Estel 1000	Silo 111
Estel 1100	----------

El consumo de material según el producto aplicado se refleja en la tabla siguiente:

Producto	Aumento de peso seco %	Carga acumulada g/m^2	Rendimiento estimado Kg/m^2
Hidrofugante 1 (*)	0,13 – 0,19	73	0,09
Silo 111	0,08 - 0,13	59	0,07
Estel 1100	0,84 – 0,90	391	0,45

(*) Disolución al 15% del preparado comercial

5.2.8.3. Comportamiento hídrico

5.2.8.3.1. Absorción libre de agua

De modo similar a la roca de cantera, se muestran los gráficos comparativos de las aplicaciones de los consolidantes.

Todos reducen drásticamente tanto la velocidad de absorción como la cantidad total de agua absorbida (gráfico5.5), mostrando una efectividad bastante alta hasta las 8 horas de contacto con el agua, tiempo en el que las muestras impregnadas con Estel 1000 + Silo 111 comienzan a incorporar agua a su sistema poroso, llegando después de dos días a alcanzar valores similares a las muestras no tratadas. En el tratamiento con Consolidante 1 + Hidrofugante 1 la barrera se rompe de igual forma aunque el agua absorbida no supera el 4% del peso de la piedra. El tratamiento con Estel 1100 permanece con una absorción de agua inferior a 0,5% aun después de 7 días de contacto con el agua, formando una autentica barrera contra la ascensión capilar.

5.2.8.3.2. Poder de succión

Teniendo en cuenta que el cálculo se efectúa sobre los mismos datos, se obtienen resultados similares a la discusión anterior (Gráfico 5.6). El menor poder se consigue con Estel 1100 seguido de Consolidante 1 + Hidrofugante 1, Estel 1100 + Silo y Acrisil.

5.2.8.3.3. Desorción libre de agua.

La velocidad de secado se ve alterada por Acrisil, siendo ligeramente superior en los otros tratamientos, esto se explica por que el agua no se adhiere a las paredes de los poros y tiene menor dificultad en abandonar la roca. Si observamos el gráfico 5.7, comprobamos que las velocidades de secado son menores en Acrisil, seguidas por la roca sin tratar, Estel 1000 + Silo, Consolidante 1 + Hidrofugante 1 y Estel 1100 que consigue la mayor de todos los tratamientos.

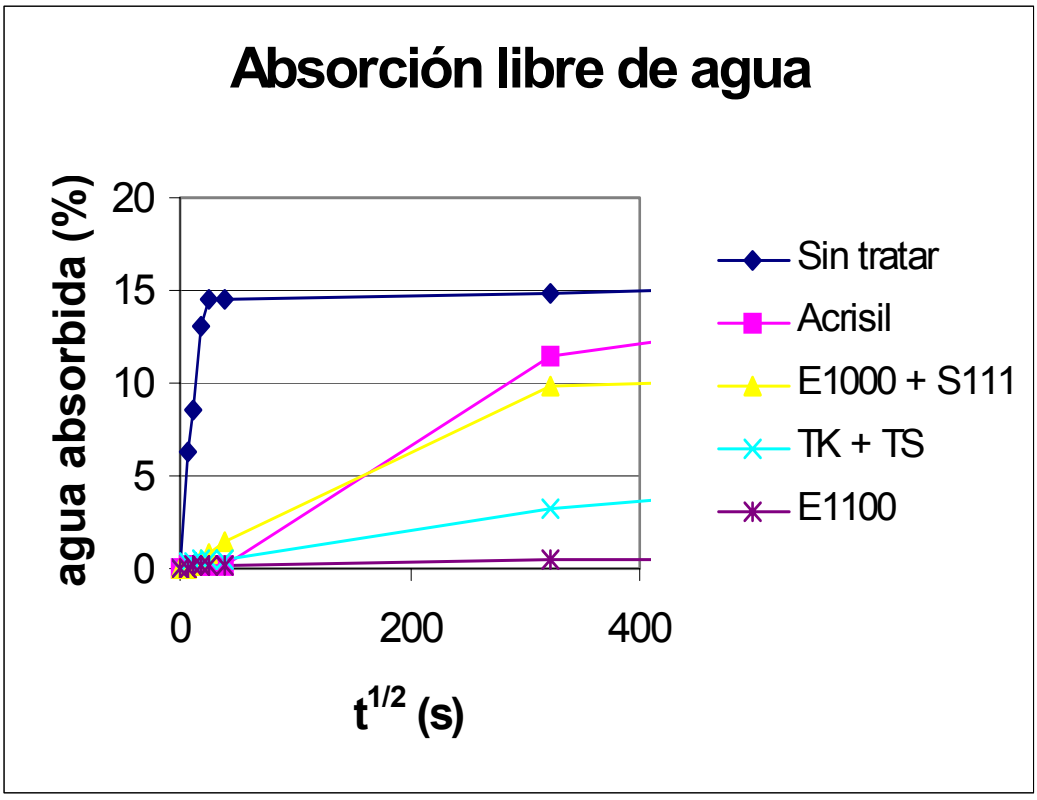

Gráfico 5.5

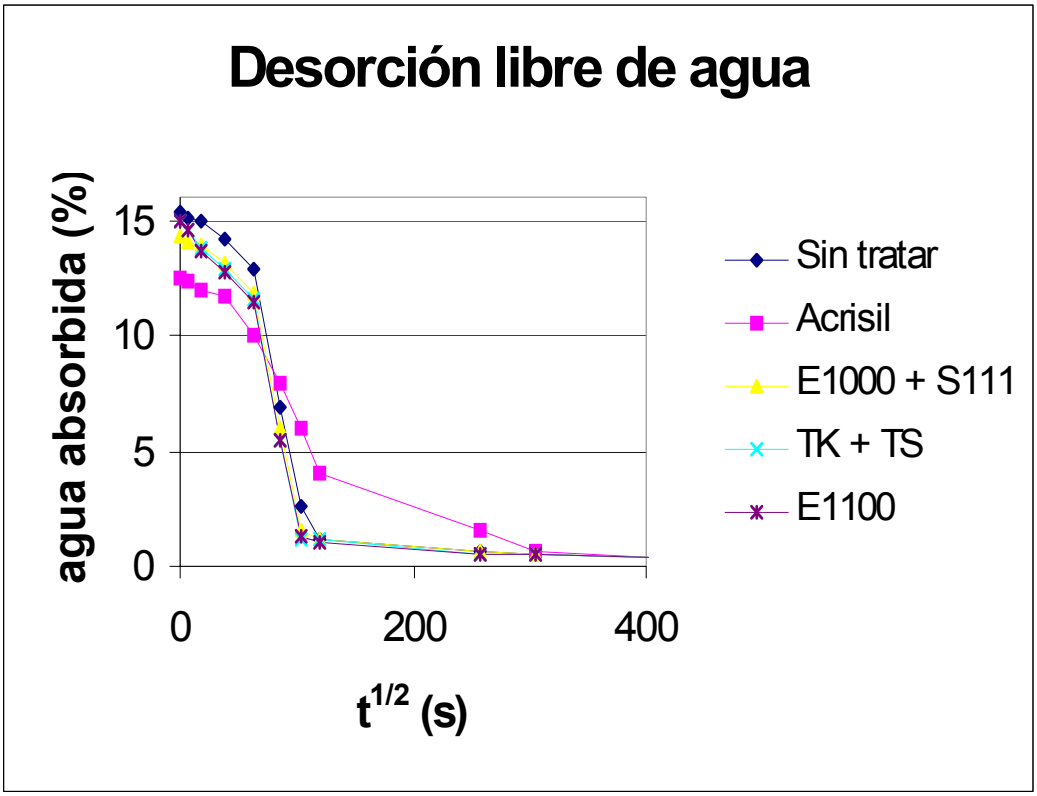

Gráfico 5.7

5.2.8.4. Ensayos de envejecimiento

Una vez efectuados los tratamientos de conservación sobre las muestras, es preciso predecir su comportamiento a largo plazo. Para ello se realizan experiencias de alteración acelerada que realizan una acción violenta en un corto espacio de tiempo. Estos ensayos se realizan variando y repitiendo cíclicamente las condiciones a las que son sometidas las probetas con objeto de observar su comportamiento.

El clima de la ciudad de Murcia no justifica el ensayo de cambio de temperatura y humedad y por tanto, de entre los varios ensayos disponibles, se han utilizado los ciclos de cristalización de sales por ser una de las pruebas más agresivas para la roca.

Este ensayo de cristalización de sales consiste en saturar las probetas durante dos horas con una disolución al 10% de sulfato sódico decahidratado ($Na_2SO_4 \cdot 10\ H_2O$), ya que esta sal presenta una expansión en volumen del 308% respecto a la forma anhidra y simula perfectamente las tensiones originadas en la roca por la cristalización de sales. Una vez transcurrido este tiempo, son llevadas a una estufa a 80 ºC durante 21,5 horas para garantizar la pérdida total de agua. Posteriormente se enfrían a temperatura ambiente media hora y se repite el ciclo diez veces.

Una vez efectuados estos ciclos se evalúan las variaciones de peso y se comparan los resultados.

Tratamiento	Δ Peso %
Sin tratamiento	+ 6,5
Acrisil	+ 0,6
Consolidante 1 + Hidrofugante 1	+ 1,3
Estel 1000 + Silo 111	+ 1,8
Estel 1100	+ 0,5

Mayores incrementos de peso significan una mayor acumulación de la sal cristalizada y por tanto una posibilidad tanto mayor de ser deterioradas las probetas. Estos aumentos de peso se ven paliados en cierta forma por la materia que se desprende de las caras de la roca, y que aquí no se tienen en cuenta por quedar en el seno del líquido de impregnación; por tanto pueden ser superiores en aquellas en las que aparece una arenización superficial.

En el análisis visual, se determinó lo siguiente:

Las probetas sin tratar presentaban fisuras a partir del cuarto ciclo y se rompieron en el octavo, perdiendo la integridad de la forma y haciendo patente la fuerza destructiva de este tratamiento; las caras adquirieron un aspecto granuloso y las aristas perdieron su definición, quedando disgregadas en pequeños fragmentos después de los diez ciclos.

El tratamiento con Acrisil hace aparecer manchas blancas sobre las caras, quedando éstas con un tacto algo arenoso pero con buena apariencia externa. Las aristas presentan pequeñas desplacaduras, perdiendo en parte su forma original.

Las probetas tratadas con la mezcla de Consolidante 1 + Hidrofugante 1 se mantienen con un velo blanquecino sobre el fondo de la roca, con buena definición de aristas y caras lisas. El envejecimiento no causó efectos fuertemente apreciables.

El tratamiento con Estel 1000 + Silo 111 ofrece un buen resultado ya que el velo es casi imperceptible, las aristas están bien definidas y las caras presentan un aspecto liso y uniforme.

Por último, Estel 1100 consigue una apariencia similar a la del tratamiento anterior, si bien, el menor aumento de peso indica que este tratamiento ofrece la mejor barrera contra la humedad que arrastra las sales y por tanto los efectos de este ensayo son menos acusados.