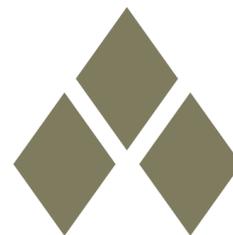
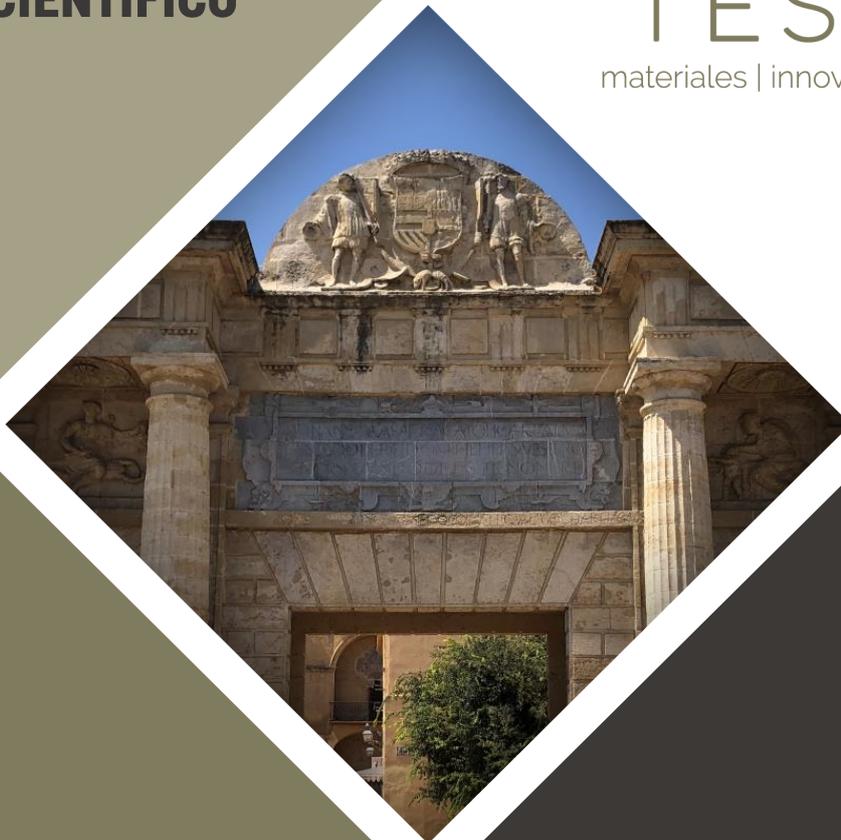


INFORME TÉCNICO-CIENTÍFICO



TESELA

materiales | innovación | patrimonio



TESELA, Materiales, Innovación y Patrimonio S.L.
Clúster CSA, Calle Angustias, 99, Módulo C2, 18640 Padul, Granada
info@teselainnova.com - www.teselainnova.com

Informe Nº: 2204

Peticionario: CONSTRUCCIONES ANTROJU, S.L.

Fecha de emisión: 18/2/2022

ESTUDIO DE MATERIALES Y EVALUACIÓN DE TRATAMIENTOS CONSOLIDANTES EN LA PUERTA DEL PUENTE ROMANO DE CÓRDOBA (Informe 3)

ÍNDICE

I. OBJETIVOS

II. DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS

III. TÉCNICAS DE ANÁLISIS

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

V. CONCLUSIONES

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

I. OBJETIVOS

Este estudio ha tenido como objetivo la evaluación de los productos consolidantes (Nanocal y Mixostone) aplicados en diferentes zonas de la Puerta del Puente Romano de Córdoba. Adicionalmente se presentan en este informe los resultados comparativos de parámetros hídricos de un material pétreo original y uno de reposición empleado en la restauración del inmueble.

II. DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS

Se han analizado un total de 9 muestras cuya referencia, localización, descripción y análisis realizados en cada una de ellas se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Relación de muestras analizadas, descripción, imagen y técnicas de análisis llevadas a cabo en cada una de las muestras. Las siglas se refieren a PIM: porosimetría por intrusión de mercurio.

Nombre de la Muestra	Descripción	Análisis realizados
P2 Pre	Piedra original localizada en el pedestal oeste (cara sur)	<ul style="list-style-type: none"> - PIM - Estudio colorimétrico - Dureza superficial - Esponja de contacto - Peeling test
P2 Post	Piedra original localizada en el pedestal oeste (cara sur) tras consolidación con nanocal	<ul style="list-style-type: none"> - PIM - Estudio colorimétrico - Dureza superficial - Esponja de contacto - Peeling test
P3 Pre	Piedra original localizada en el pedestal oeste (cara norte)	<ul style="list-style-type: none"> - PIM - Estudio colorimétrico - Dureza superficial - Esponja de contacto - Peeling test
P3 Post	Piedra original localizada en el pedestal oeste (cara norte) tras consolidación con Mixostone	<ul style="list-style-type: none"> - PIM - Estudio colorimétrico - Dureza superficial - Esponja de contacto - Peeling test
P4 Pre	Piedra original localizada en el pedestal este (cara este)	<ul style="list-style-type: none"> - PIM - Estudio colorimétrico - Dureza superficial - Esponja de contacto - Peeling test

P4i Post	Piedra original localizada en el pedestal este (cara este - mitad izquierda del sillar) tras consolidación con nanocal	<ul style="list-style-type: none"> - PIM - Estudio colorimétrico - Dureza superficial - Esponja de contacto - Peeling test
P4d Post	Piedra original localizada en el pedestal este (cara este - mitad derecha del sillar) tras consolidación con Mixostone	<ul style="list-style-type: none"> - PIM - Estudio colorimétrico - Dureza superficial - Esponja de contacto - Peeling test
ALBERO	Piedra de sustitución	<ul style="list-style-type: none"> - Ensayos hídricos: - Determinación de la absorción de agua a presión atmosférica - Determinación de la desorción (secado) libre de agua - Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad
Original	Fragmento de sillar original extraído del paramento	<ul style="list-style-type: none"> - Ensayos hídricos: - Determinación de la absorción de agua a presión atmosférica - Determinación de la desorción (secado) libre de agua - Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad

III. TÉCNICAS DE ANÁLISIS

Para el estudio de las muestras se han utilizado los equipos y técnicas analíticas que se describen a continuación:

III. 1. Porosimetría por intrusión de mercurio (PIM)

Esta técnica se ha empleado para determinar la distribución de tamaño de poros y el valor de porosidad de los materiales pétreos. Para ello se ha utilizado un porosímetro POREMASTER- 60 GT de la marca QUANTACHROME INSTRUMENTS, que puede generar una presión de hasta 60.000 psi, cubriendo el rango de diámetro de poro desde aproximadamente 4 nm hasta 900 μm .

III. 2. Estudio colorimétrico mediante espectrofotómetro

Este estudio se ha realizado para determinar el color y su variación en las distintas muestras. Para ello se utilizó un espectrofotómetro marca Konica Minolta, modelo CM-700d, dotado de una apertura con un diámetro de medición de 3 mm. Esta técnica permite medir y expresar cuantitativamente el color en función de la cantidad de luz reflejada por la superficie analizada. Por lo tanto, la colorimetría consiste en la designación de los tres colores primarios y en la determinación de la cantidad de cada uno de ellos que debe emplearse para reproducir el color requerido.

Los colores se especifican a menudo en un diagrama bidimensional, llamado diagrama de cromaticidad, recomendado por la CIE (Commission Internationale de l'Eclairage), el cual muestra las relaciones entre los valores triestimulares independientemente de la luminosidad. El sistema de color CIELab, establece que distancias iguales son aproximadamente diferencias iguales en la percepción del color. Los valores $L^*a^*b^*$ se definen a partir de los valores triestímulo de un objeto (Wyszecki y Stiles, 1982). L^* es la variable luminosidad con valores comprendidos entre -100 (negro) y +100 (blanco), a^* y b^* son las coordenadas de cromaticidad, variando a^* de -60 (verde) a +60 (rojo) y b^* de -60 (azul) a +60 (amarillo).

En el caso de la evaluación de productos consolidantes, esta técnica ha permitido cuantificar la variación de color de la superficie, expresado como ΔE y calculado mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2}$$

Según la CIE, valores de $\Delta E \geq 3,5$ representan variaciones de color que son percibidas por el ojo humano (Mokrzycki & Tatol 2011). Sin embargo, en el ámbito de la restauración de monumentos y edificios históricos se aceptan valores de hasta $\Delta E \leq 5$.

La toma de datos con el espectrofotómetro se realizó haciendo un total de 18 lecturas en cada zona a estudiar antes y después de los tratamientos de consolidación, mientras que el cálculo de la variación de color se ha realizado con el promedio de estas lecturas.

III. 3. Determinación de la dureza superficial mediante equipo portátil

Esta técnica se ha utilizado para medir la dureza en la capa superficial de las diferentes muestras. Para ello se ha utilizado un durómetro portátil PCE-2500N, de la marca PCE Ibérica. Este dispositivo permite realizar mediciones no destructivas en los materiales pétreos y su funcionamiento está basado en el impacto contra la superficie de una bola de carburo de tungsteno de 3 mm de diámetro accionada por un muelle. El valor de dureza se expresa como el índice "HL" (*Dureza Leeb*), calculado a partir de la relación entre la velocidad de rebote y la velocidad de impacto.

El ensayo de dureza superficial se ha realizado tomando 20 medidas en cada zona a estudiar antes y después de la aplicación de los tratamientos de consolidación.

III. 4. Determinación de absorción por capilaridad in-situ mediante esponja de contacto (según norma UNI 11432)

Este ensayo se ha utilizado para cuantificar la absorción de agua del paramento antes y después de los tratamientos de consolidación. Para ello se ha utilizado un kit de esponjas de contacto suministrado por C.T.S España. Esta metodología, desarrollada por el CNR-ICVBC de Florencia, se basa en mantener oprimida sobre el material a estudiar una placa de policarbonato que contiene una esponja humedecida con agua destilada durante un tiempo determinado (entre 1 y 5 min. en función de las condiciones del material). El agua absorbida (W_a) en $g/cm^2 \cdot min$ se calcula a partir del peso inicial, peso final, área de la esponja y el tiempo de aplicación, según la siguiente fórmula:

$$W_a (g/cm^2 \cdot min) = (P_i - P_f) / 23.76 \times t$$

siendo t = tiempo de contacto en minutos, P_i = peso inicial en gramos, P_f = peso final en gramos, 23,76 = superficie de la esponja en cm^2 .

En todas las medidas la cantidad de agua añadida sobre las esponjas fue de 5 ml, mientras que el tiempo de contacto fue de 1,5 min.

III. 5. Evaluación de la cohesión superficial mediante "Peeling test" (según norma ASTM D3359-02)

Este ensayo se ha utilizado para evaluar la cohesión superficial de los materiales pétreos antes y después de los tratamientos de consolidación, dando una noción de los cambios en cohesión intergranular de la superficie.

El ensayo se basa en una tira de cinta adhesiva de doble cara, previamente pesada, que se aplica en la superficie a evaluar, asegurándose que esté totalmente adherida, y luego quitándola. El polvo y granos de la superficie quedan adheridos a la cinta, que se vuelve a pesar, expresándose el resultado en mg/cm^2 .

El cálculo del material retirado en mg/cm^2 se ha obtenido mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Material retirado (mg/cm}^2\text{)} = (P_i - P_f) / St$$

siendo P_i = peso inicial en miligramos, P_f = peso final en miligramos, S_t = superficie total de las tiras en cm^2 .

Mientras que el porcentaje de variación de peso ($\Delta W\%$) se ha calculado de la siguiente manera:

$$\Delta W (\%) = ((\text{Valor pretratamiento} - \text{Valor postratamiento}) \times 100) / \text{Valor pretratamiento}$$

III.6. Ensayos hídricos

Los materiales pétreos se han sometido a los siguientes **ensayos hídricos** para estudiar su comportamiento frente al agua (en condiciones de laboratorio constantes de $T = 22\text{ }^\circ\text{C}$ y $HR = 55\%$).

- Determinación de la absorción de agua a presión atmosférica:

Este ensayo se ha llevado a cabo según la norma UNE-EN 13755 sobre 3 probetas cúbicas de $5 \times 5 \times 5\text{ cm}$ de cada material, secadas en estufa a $70\text{ }^\circ\text{C}$ hasta peso constante antes del comienzo del ensayo. Tras el enfriamiento y pesado en seco de las probetas, estas se sumergen en una bandeja con agua destilada, apoyadas sobre una rejilla. Las probetas se pesan en los siguientes intervalos de tiempo: 1, 4, 9, 16, 25 y 60 minutos. Después de estos intervalos las probetas fueron pesadas cada 2 horas el primer día y cada 24 horas a partir del segundo día hasta alcanzar la saturación.

El contenido (en peso) del agua de una probeta en el intervalo de tiempo “t” se ha calculado a partir de la masa inicial (peso en seco) y de la masa en el intervalo de tiempo “t”. Este parámetro se representa gráficamente en función del tiempo para evaluar la capacidad de absorción de agua del material.

- Determinación de la desorción (secado) libre de agua:

Este ensayo se ha llevado a cabo según la norma NORMAL 29/88 sobre 3 probetas cúbicas de $5 \times 5 \times 5\text{ cm}$ de cada material saturadas de agua tras el ensayo de absorción libre. Las probetas saturadas se retiran del agua, se secan ligeramente con una bayeta húmeda y se colocan sobre una rejilla. Posteriormente se pesan en los siguientes intervalos de tiempo: 1, 4, 9, 16, 25 y 60 minutos. Después de estos intervalos las probetas fueron pesadas cada 2 horas el primer día y cada 24 horas a partir del segundo día hasta que el peso se estabilice.

El contenido (en peso) del agua de una probeta en el intervalo de tiempo “t” se ha calculado a partir de la masa inicial (peso de la probeta saturada) y de la masa en el intervalo de tiempo “t”. Este parámetro se representa gráficamente en función del tiempo para evaluar la capacidad de desorción de agua del material.

- Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad:

Este ensayo se ha llevado a cabo según la norma UNE-EN 1925, sobre 3 probetas cúbicas de $5 \times 5 \times 5\text{ cm}$ de cada material, secadas en estufa a $70\text{ }^\circ\text{C}$ hasta peso constante antes del comienzo del ensayo. Después de enfriarse y medir el peso seco de las probetas, éstas se colocaron sobre una rejilla (cubierta con un papel absorbente para asegurar un aporte constante de agua)

apoyada en el fondo de una bandeja. Seguidamente se llenó la bandeja de agua destilada hasta cubrir la cara inferior de las probetas. Las probetas se pesaron a los siguientes intervalos de tiempo: 1, 4, 9, 16, 25 y 60 minutos. Después de estos intervalos las probetas fueron pesadas cada 24 horas hasta alcanzar la saturación. La medida de la altura del frente capilar se realizó a los mismos intervalos de tiempo que las pesadas.

El comportamiento hídrico de absorción de agua por capilaridad de las probetas se ha representado 1) como incremento de peso por unidad de superficie ($\Delta M/S$, en g m^2) y 2) como altura (h , en mm) del frente capilar, en función de la raíz cuadrada del tiempo, obteniendo las curvas de capilaridad de incremento de peso y de altura del frente capilar.

El coeficiente de capilaridad (C_c , en $\text{g m}^2 \text{s}^{-1/2}$), se ha calculado a partir de la regresión lineal obtenida en la primera parte de la curva de capilaridad (primeras 4 mediciones, con un $R > 0,95$ según UNE-EN 1925).

IV. RESULTADOS y DISCUSIÓN

IV. 1 Estudio del sistema poroso (PIM)

En la tabla 2 se representan los valores de porosidad total de las 7 muestra estudiadas. Como se puede observar hay una disminución de dicho valor en todas las muestras tras la consolidación, salvo en la muestra P4d Post, donde se aprecia un ligero aumento de la porosidad, probablemente debido a la gran heterogeneidad de la roca.

La muestra P2 Pre presenta dos familias de poros principales en torno a los 6 y 9 μm de diámetro, apreciándose también una familia de poros secundaria de 3 μm , y cierto volumen de microporos de 0,07 y 0,9 μm (Fig. 1).

En la muestra consolidada con nanocal (P2 Post) se aprecia una disminución notable de las tres familias principales (3, 6 y 9 μm).

En el caso de la muestra P3 Pre se observan varias familias de poros principales que abarcan el rango de 0,4 a 14 μm y familias minoritarias de 0,05 y 75 μm .

En la muestra consolidada con Mixostone (P3 Post) se aprecia una disminución de las familias de poros de mayor tamaño (rango de 1 a 75 μm) y un ligero aumento de los microporos (0,05 μm).

En la muestra P4 Pre se observan varias familias de poros principales que abarcan el rango de 3,8 a 11,5 μm y una notable familia microporosa de 0,09 μm .

En la muestra consolidada con nanocal (P4i Post) se aprecia una disminución de todas las familias principales y sólo un ligero aumento en el rango de 0,11 a 1,5 μm .

Sin embargo, en la muestra consolidada con Mixostone (P4d Post) aunque se aprecia también una disminución en las familias de poros principales (0,09 y rango de 3,8 a 11,5 μm), se detecta un notable aumento en el rango de 0,13 a 4,2 μm , lo que causa una ligera subida en el valor de la porosidad total. Esto más que deberse al tratamiento de consolidación en sí, estaría relacionado con la presencia de estos poros en la zona de la piedra original estudiada tras el tratamiento.

Tabla 2. Valores de porosidad total obtenidos mediante porosimetría por intrusión de mercurio (PIM).

Muestra	P2 Pre	P2 Post	P3 Pre	P3 Post	P4 Pre	P4i Post	P4d Post
Valor de porosidad total	30,35%	22,78%	29,40%	23,51%	24,32%	17,89%	26,03%

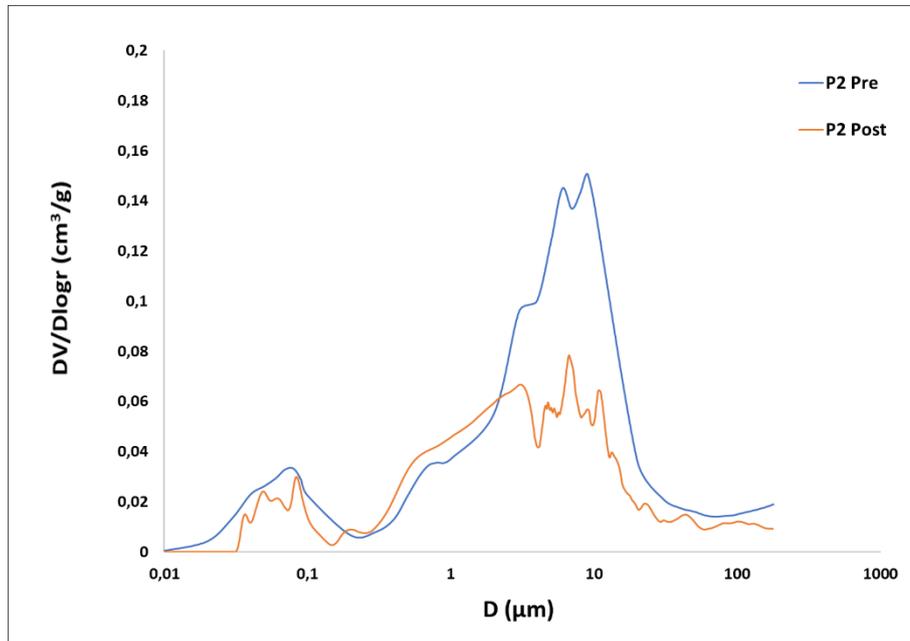


Figura 1. Curva de distribución de tamaño de poro donde se representa el diámetro de poro (en μm) versus el volumen incremental de poros (en cm^3/g) de las muestras P2 Pre y P2 Post.

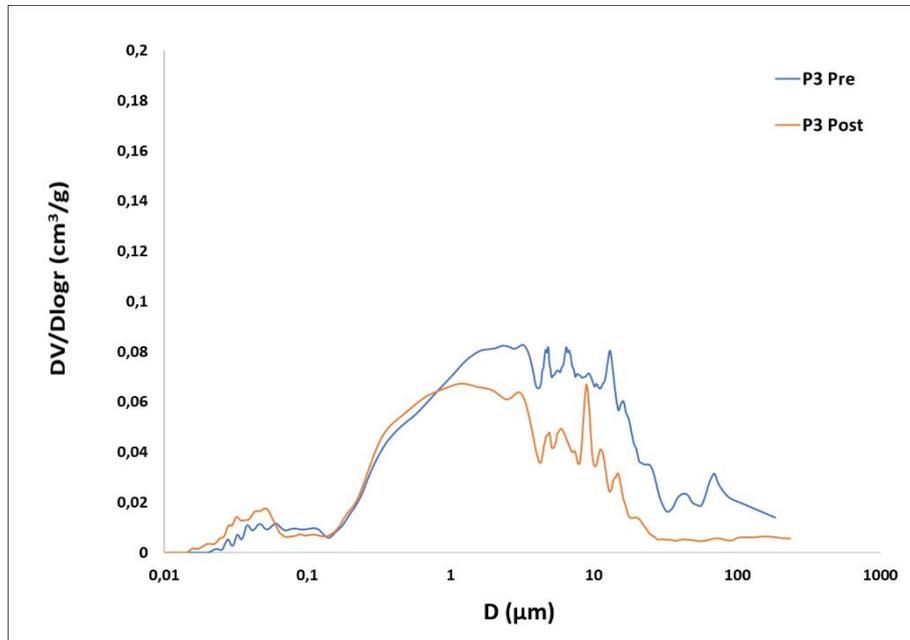


Figura 2. Curva de distribución de tamaño de poro donde se representa el diámetro de poro (en μm) versus el volumen incremental de poros (en cm^3/g) de las muestras P3 Pre y P3 Post.

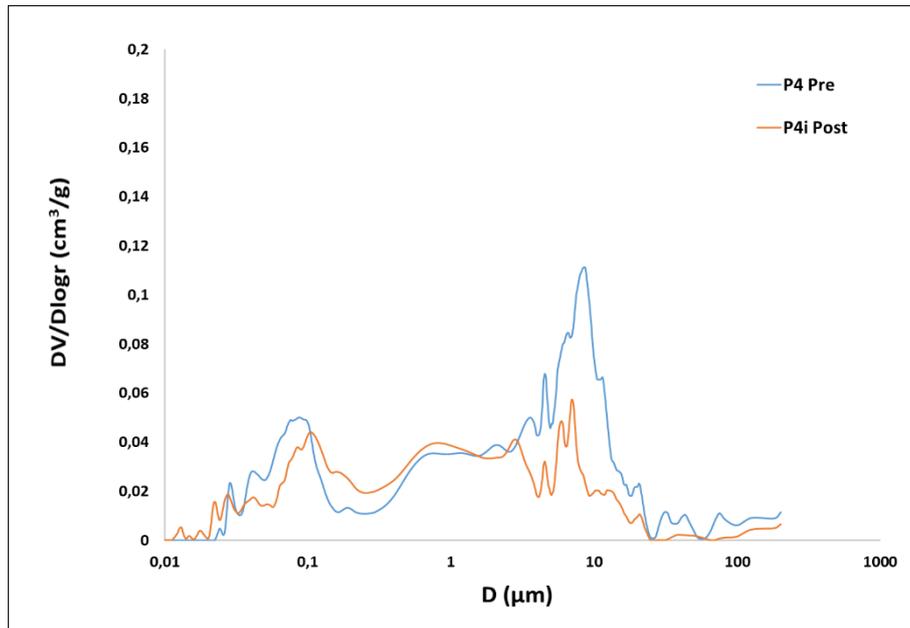


Figura 3. Curva de distribución de tamaño de poro donde se representa el diámetro de poro (en μm) versus el volumen incremental de poros (en cm^3/g) de las muestras P4 Pre y P4i Post.

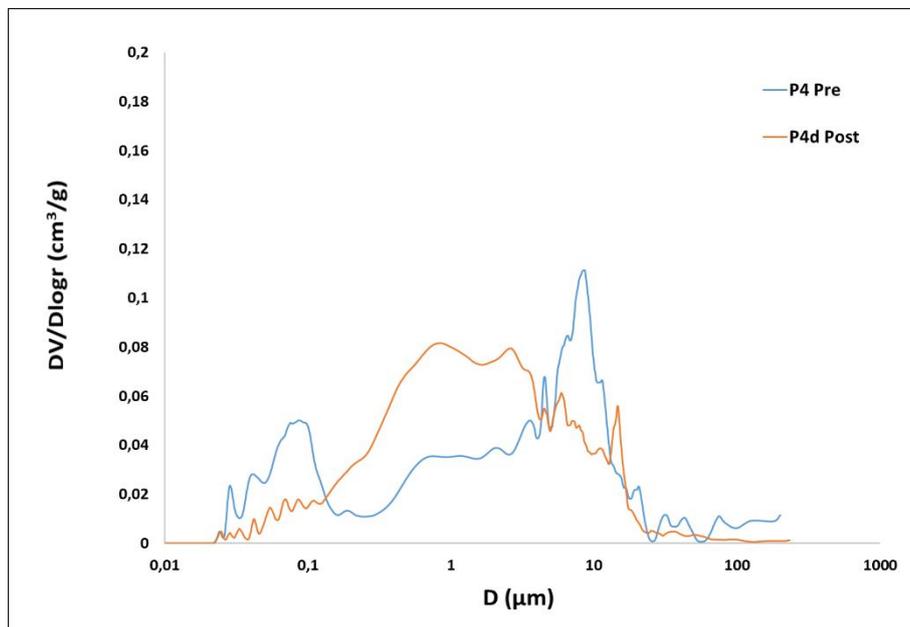


Figura 4. Curva de distribución de tamaño de poro donde se representa el diámetro de poro (en μm) versus el volumen incremental de poros (en cm^3/g) de las muestras P4 Pre y P4d Post.

IV. 2. Estudio colorimétrico mediante espectrofotómetro

El color de los materiales pétreos depende de las fases minerales presentes y de su textura. También el tamaño de los cristales y su orientación puede influir en el color y brillo del material, siendo las rocas de grano fino las que tienen colores más homogéneos.

A continuación, en la tabla 3 se indica la variación de color expresada como ΔE después de los tratamientos de consolidación, en la imagen 5 se representan los resultados promedio del valor de luminosidad L^* y en la imagen 6 están representados los valores a^* y b^* de las diferentes medidas del color de cada zona estudiada.

Tabla 3. Valores de diferencia total de color (ΔE) entre los valores previos y posteriores a los tratamientos de consolidación.

Muestra/Zona de estudio	P2	P3	P4i	P4d
ΔE	3,89	2,65	5,92	5,07

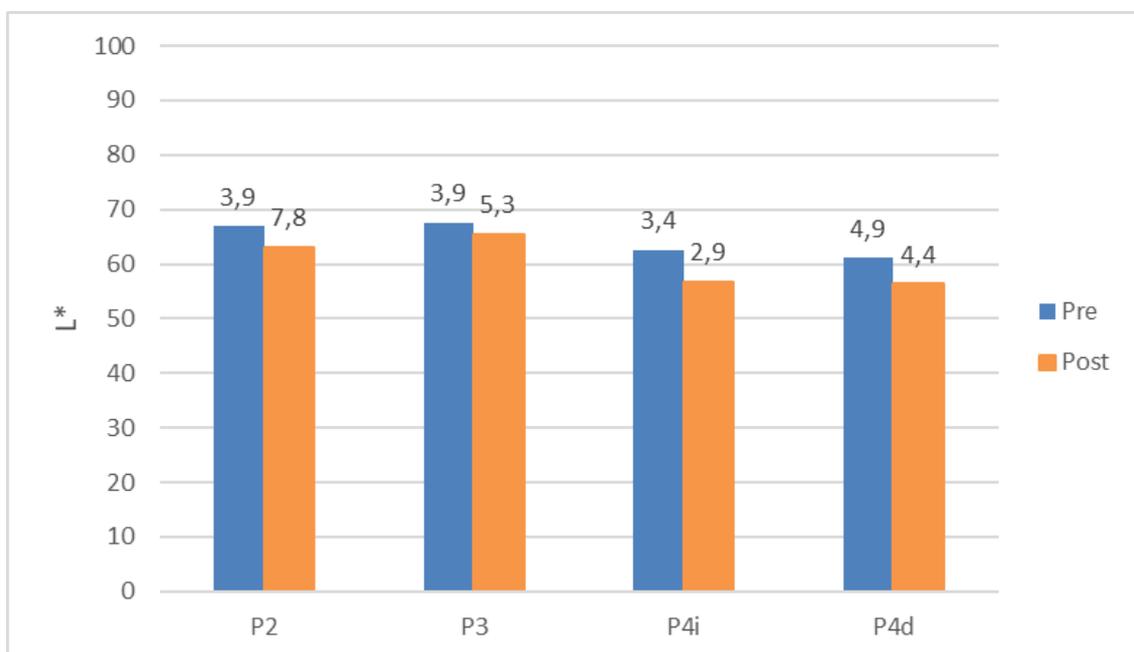


Figura 5. Valores promedio de luminosidad L^* de cada zona estudiada antes y después de la aplicación de los tratamientos de consolidación. La desviación estándar de las lecturas se indica en la parte superior de cada columna.

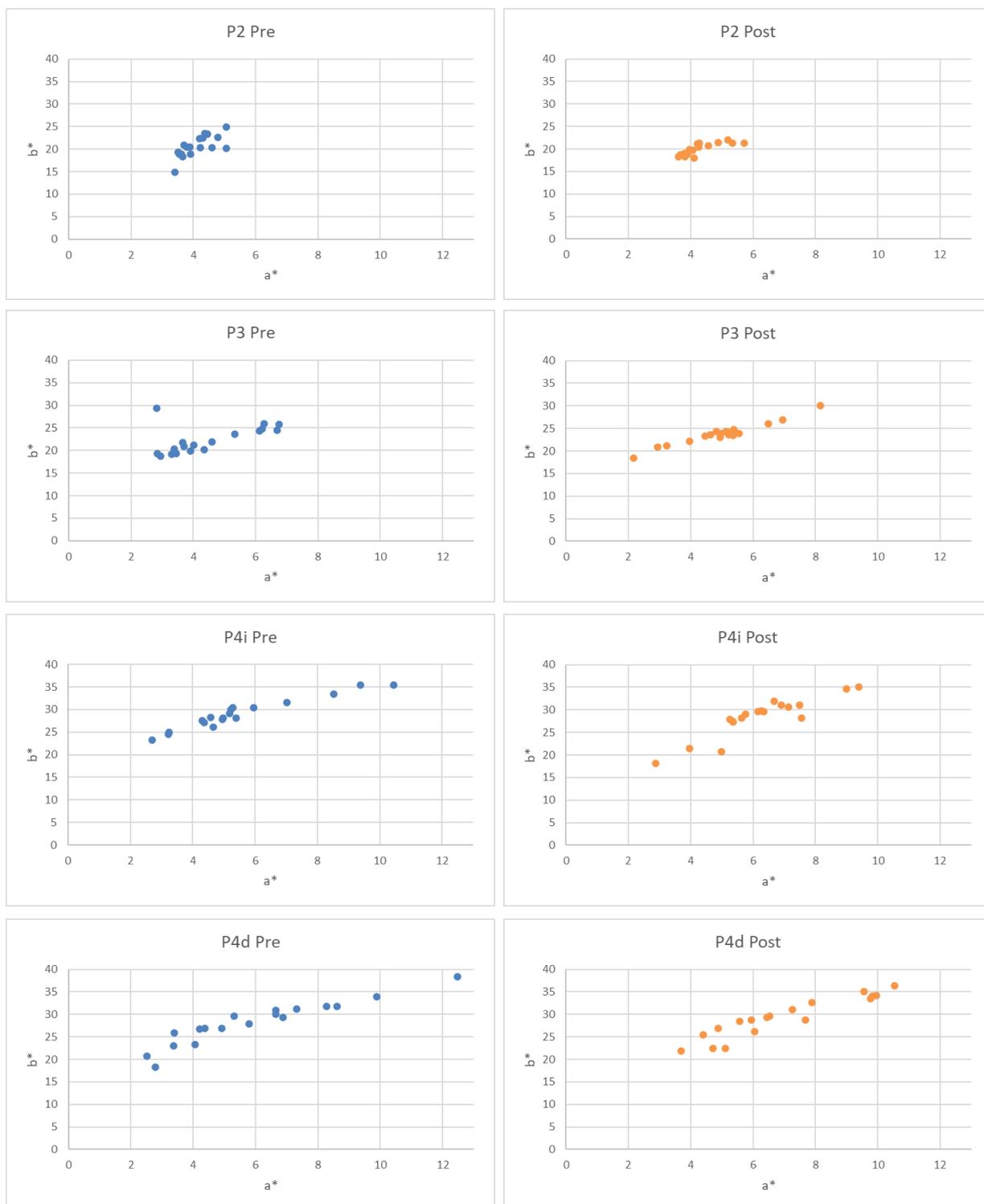


Figura 6. Representación gráfica de los valores colorimétricos a^* y b^* tomados en cada zona estudiada antes y después de la aplicación de los tratamientos de consolidación.

Como se puede observar en la representación gráfica de los valores colorimétricos a^* y b^* , no ha habido cambios de color tras la aplicación de los tratamientos de consolidación.

En cuanto a los valores promedio de luminosidad L^* , se observa una disminución en todas las zonas estudiadas tras la aplicación de los tratamientos. Sin embargo, este cambio no es debido a una variación cromática producida por los tratamientos (en este caso se apreciaría también en los valores a^* y b^*), sino a las diferentes condiciones ambientales durante la toma de datos, más concretamente, la variación en el valor de la humedad relativa (45% HR en la toma datos preconsolidación y 62% HR en la toma de datos postconsolidación).

Esta variación de los valores de luminosidad L^* provoca también el aumento de la diferencia total de color (ΔE), sin que ello suponga una variación cromática real.

IV. 3. Determinación de la dureza superficial mediante equipo portátil

Los resultados de estas medidas se representan gráficamente en la fig. 7. Con el objetivo de corregir las desviaciones causadas por la anisotropía natural de las calcarenitas estudiadas y por la rugosidad existente en su superficie, para el cálculo de promedio de las lecturas (indicado en la tabla 4) se ha realizado una media acotada al 10% sobre las 20 mediciones iniciales.

Como se puede observar, se aprecia un aumento de la dureza superficial en las muestras P2 Post y P3 Post. Si embargo, en las muestras P4i Post y P4d Post se ha detectado una disminución de este valor.

Tabla 4. Resultados del ensayo de dureza superficial in-situ. Media acotada al 10%.

Muestra	P2 Pre	P2 Post	P3 Pre	P3 Post	P4i Pre	P4i Post	P4d Pre	P4d Post
Dureza Leeb (HL)	248,67	260,44	262	319,94	274,17	261,83	291,5	264,44

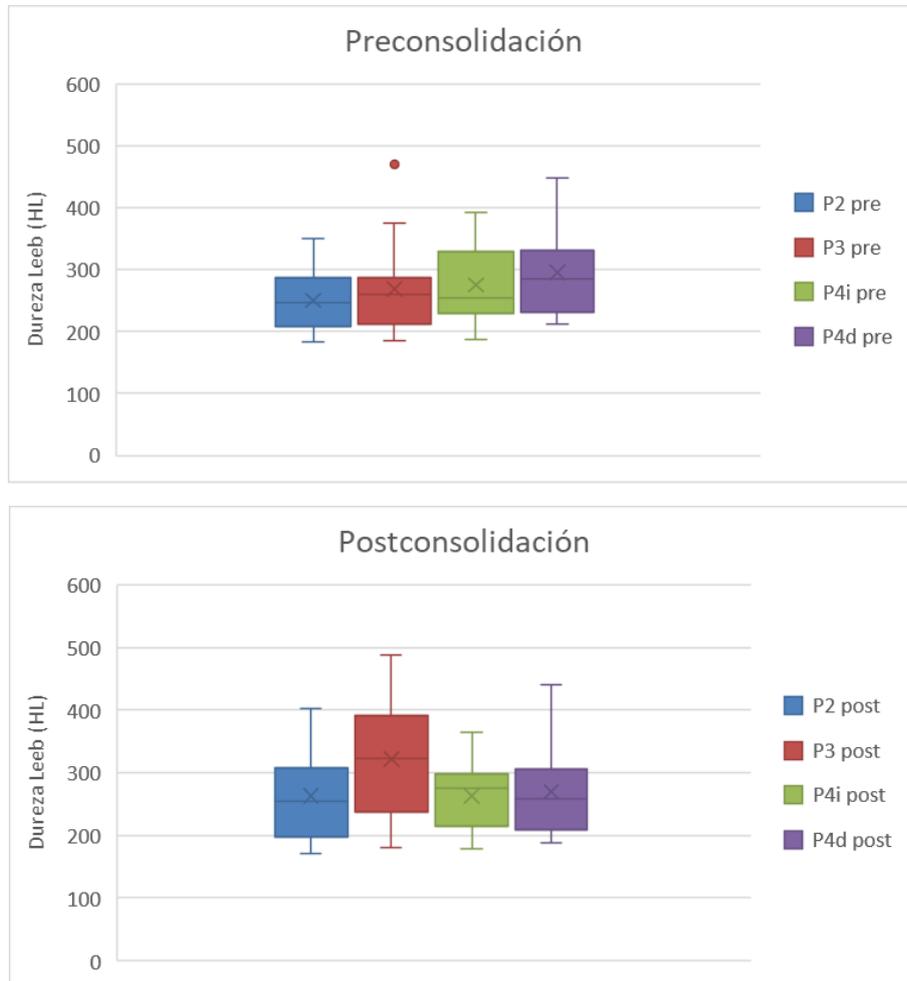


Figura 7. Representación gráfica de los valores de dureza Leeb (HL) tomados en cada zona estudiada antes y después de la aplicación de los tratamientos de consolidación.

IV. 4. Determinación de absorción por capilaridad in-situ mediante esponja de contacto

Los resultados del ensayo de absorción por capilaridad in-situ mediante esponja de contacto se han obtenido del promedio de tres medidas realizadas en cada zona a estudiar antes y después de la aplicación de los productos consolidantes.

El valor medio de agua absorbida en cada zona, así como la variación entre los resultados tras la aplicación de los tratamientos consolidantes se presentan en la tabla 5.

De acuerdo al procedimiento establecido para este ensayo, las condiciones ambientales durante la toma de datos pueden afectar notablemente a los resultados, por lo que dichas condiciones antes y después de la aplicación de los productos consolidantes se detallan en la tabla 6:

Tabla 5. Resultados del ensayo de absorción por capilaridad in-situ mediante esponja de contacto.

Muestra	P2 Pre	P2 Post	P3 Pre	P3 Post	P4i Pre	P4i Post	P4d Pre	P4d Post
Wa (g/cm ² ·min)	0,0266	0,0220	0,0183	0,0214	0,0175	0,0202	0,0196	0,0242
Variación (g/cm ² ·min)	-0,0047		0,0031		0,0027		0,0046	

Tabla 6. Condiciones ambientales del ensayo de absorción por capilaridad in-situ mediante esponja de contacto.

Toma de datos	Fecha	Temperatura	Humedad relativa	Meteorología
Pre consolidación	30/09/2021	25°C	45%	Soleado
Post consolidación	25/11/2021	13°C	62%	Nublado

Como se puede observar, la cantidad de agua absorbida aumenta ligeramente en las muestras P3, P4i y P4d tras la aplicación de los tratamientos de consolidación, detectándose sólo en la muestra P2 una ligera disminución de dicho valor.

IV. 5. Evaluación de la cohesión superficial mediante "Peeling test"

Los resultados del ensayo de evaluación de la cohesión superficial mediante "Peeling test" se han obtenido del promedio de 5 tiras de 8 cm² aplicadas en cada zona a estudiar previa y posteriormente a la aplicación de los tratamientos de consolidación. Dichos resultados se presentan en la tabla 7.

Tabla 7. Resultados del ensayo de evaluación de la cohesión superficial mediante "Peeling test".

Muestra	P2 Pre	P2 Post	P3 Pre	P3 Post	P4i Pre	P4i Post	P4d Pre	P4d Post
Material retirado (mg/cm ²)	1,20	0,55	0,67	0,62	1,60	1,18	2,28	0,96
ΔW (%)	54,17		7,41		26,56		58,02	

Como se puede observar, los resultados indican que en todas las muestras estudiadas el material retirado tras la aplicación de los tratamientos de consolidación ha disminuido, siendo esta variación más acusada en las muestras P2 (consolidada con nanocal) y en la muestra P4d (consolidada con Mixostone).

IV.6. Ensayos hídricos

Las curvas obtenidas durante los ensayos hídricos de absorción de agua por capilaridad, de absorción de agua a presión atmosférica y de desorción libre de agua se representan en las Figs. 8-11.

Los coeficientes calculados a partir de las curvas de absorción de agua por capilaridad se indican en la Tabla 8.

Todos los resultados se han obtenido del promedio de tres probetas de 5x5x5cm de cada material.

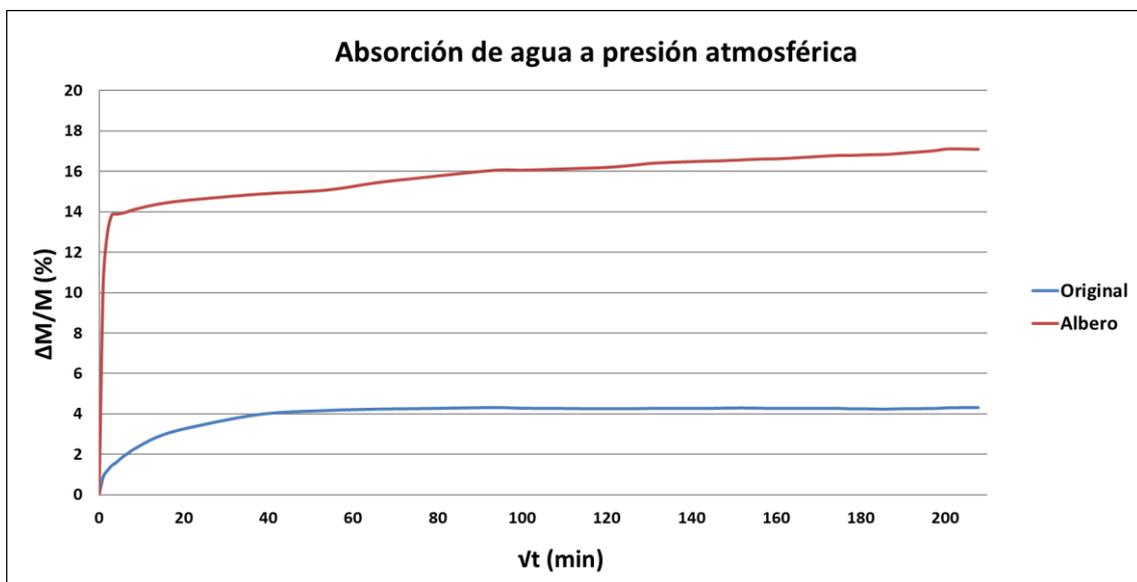


Figura 8. Curva de absorción de agua a presión atmosférica de las muestras Original y Albero donde se representa el incremento de peso ($\Delta M/M$) en función de la raíz cuadrada del tiempo (\sqrt{t}).

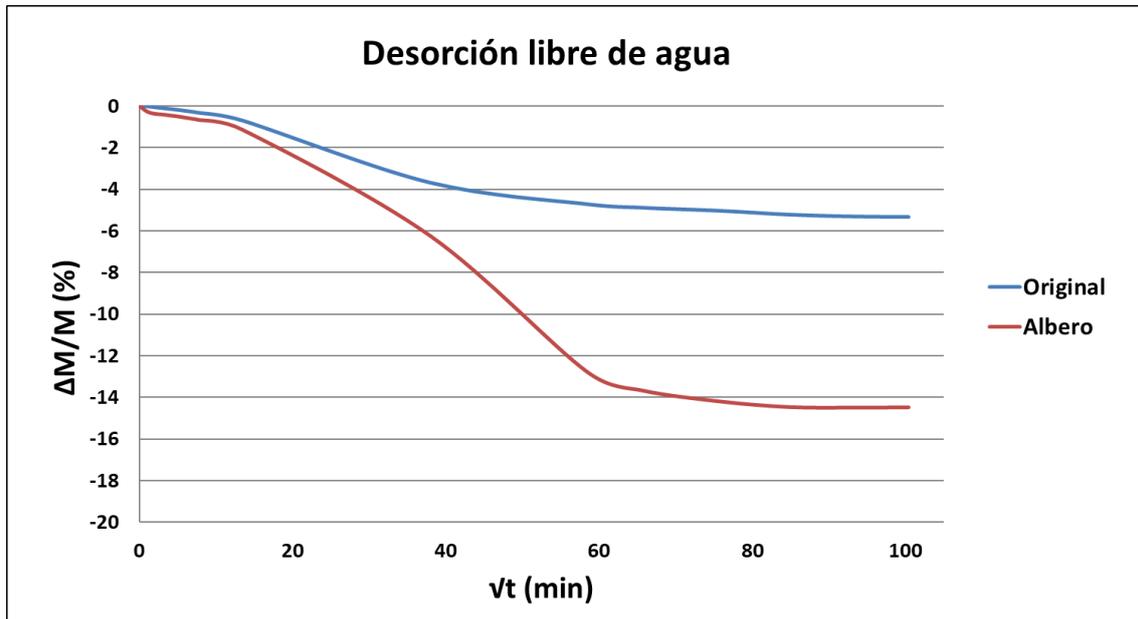


Figura 9. Curva de desorción libre de agua de las muestras Original y Albero donde se representa la disminución de peso ($\Delta M/M$) en función de la raíz cuadrada del tiempo (\sqrt{t}).

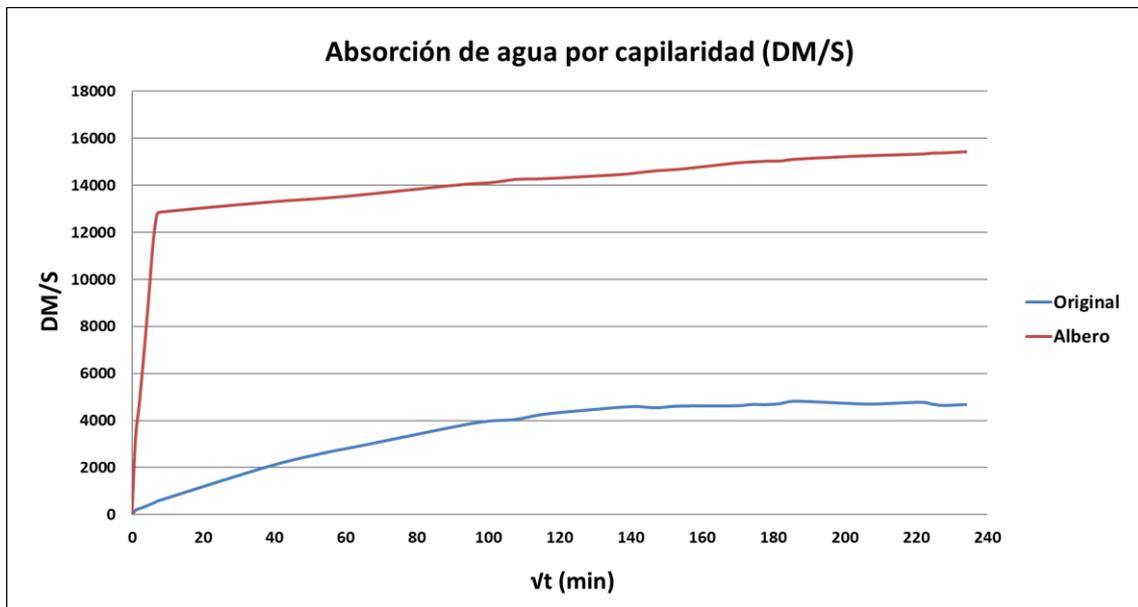


Figura 10. Curva de capilaridad de las muestras Original y Albero donde se representa el incremento de peso (DM/S, en g/m^2) en función de la raíz cuadrada del tiempo (\sqrt{t}).

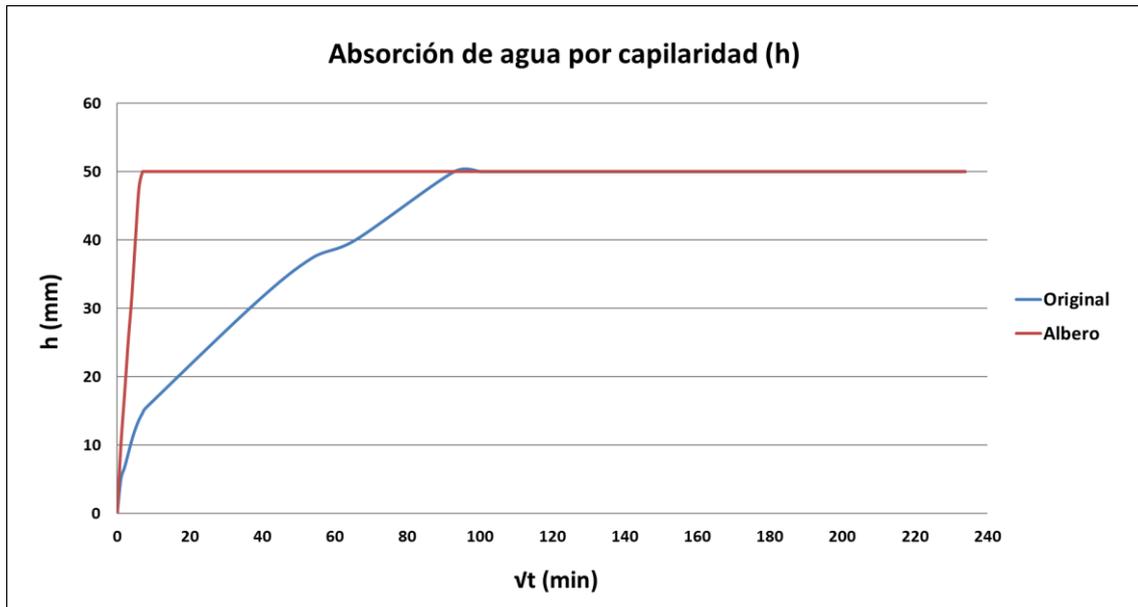


Figura 11. Curva de capilaridad de las muestras Original y Albero donde se representa la altura del frente capilar (h) en función de la raíz cuadrada del tiempo (\sqrt{t}).

Tabla 8. Coeficientes de capilaridad, C_c (en $\text{g m}^{-2} \text{s}^{1/2}$) de las muestras Original y Albero.

Muestra	C_c
Original	12,28
Albero	261,97

V. CONCLUSIONES

Respecto a los resultados obtenidos a partir de los diferentes análisis y ensayos llevados a cabo sobre los paramentos de la Puerta del Puente Romano de Córdoba antes y después de la aplicación de los tratamientos de consolidación, se puede concluir que:

- **La porosidad total ha disminuido tras la consolidación** en 3 de las 4 muestras estudiadas. Cabe destacar que dicha disminución se ha dado mayoritariamente en la macroporosidad de las rocas. Asimismo, se aprecia un ligero aumento en todas las muestras del volumen microporoso comprendido en el rango de 0,2 a 2 μm , siendo este más acusado en la muestra P4d Post (lo que ocasiona un ligero aumento de la porosidad total).
- **No ha habido cambios de color tras la aplicación de los tratamientos de consolidación.** La disminución observada en los valores de luminosidad L^* tras la consolidación (y la mayor variación del valor de ΔE que conlleva) sería causada por el aumento de la humedad relativa ambiental en la toma de datos post-consolidación, por lo tanto, no estaría relacionada con los mismos tratamientos.
- **La dureza superficial de las muestras ha aumentado tras los tratamientos de consolidación** en las muestras P2 y P3, aunque se ha obtenido una disminución de este parámetro en las muestras P4i y P4d. Esto podría deberse a una mayor heterogeneidad en esta zona de estudio lo que provocaría una mayor desviación en los datos.
- **La absorción por capilaridad in-situ mediante esponja de contacto ha aumentado** tras la consolidación en 3 de las 4 muestras estudiadas (P3, P4i y P4d). Este aumento podría tener su explicación en el aumento de la microporosidad observado en las muestras mediante PIM.
- En todas las muestras estudiadas ha habido una **mejora de la cohesión intergranular de la piedra después de los tratamientos de consolidación**, tal y como reflejan los datos del peeling-test.

Sobre la base del estudio realizado, **ambos tratamientos evaluados han sido eficaces en la consolidación de los sillares de piedra de la Puerta del Puente Romano de Córdoba.**

En cuanto a los resultados obtenidos a partir de los ensayos hídricos realizados sobre los materiales pétreos Original y Albero se puede concluir que tanto en la absorción de agua por capilaridad como en la absorción de agua a presión atmosférica **la piedra Albero presenta una capacidad de absorción mucho mayor y más rápida que la piedra original** (especialmente a corto plazo como se observa tras el cálculo del coeficiente de capilaridad C_c). Asimismo, en el ensayo de desorción (secado) libre de agua la piedra Albero experimenta una mayor pérdida de peso, **aunque la rapidez de secado sería similar en ambas muestras.**

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Mokrzycki WS, Tatol M (2011) Colour difference σE —a survey. Mach Graph Vis 20(4):383–411

UNI 11432: 2011 Beni culturali - Materiali lapidei naturali ed artificiali - Misura della capacità di assorbimento di acqua mediante spugna di contatto

ASTM D3359-02 Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test

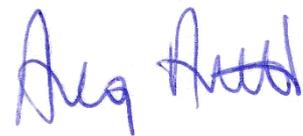
UNE-EN 13755:2008 Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la absorción de agua a presión atmosférica.

Normal 29/88: Misura dell'indice di asciugamento

UNE-EN 1925:1999 Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad.



Anna Arizzi
Directora científica



Granada, a 18 de febrero de 2022