

EFECTIVIDAD DE TRATAMIENTOS CONSOLIDANTES Y PROTECTORES PARA LA CALIZA ARRECIFAL DEL CERRO DE LAS MESAS: "TEATRO ROMANO DE ACINIPO"

J.Espinosa⁽¹⁾, R.Villegas⁽²⁾

⁽¹⁾Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico. Junta de Andalucía.
Avda. de los descubrimientos S/N 41092 Sevilla

⁽²⁾Dpto. de Ingeniería Química y Ambiental. Escuela Técnica Superior de Ingenieros.
Universidad de Sevilla, Camino de los Descubrimientos s/n. 41092 Sevilla, España

jesus.espinosa@juntadeandalucia.es⁽¹⁾ rvillegas@esi.us.es⁽²⁾

ÁREA TEMÁTICA: GEOMATERIALIDAD Y PATRIMONIO INMUEBLE.

Resumen: En este trabajo se recogen los estudios realizados para valorar la efectividad de varios tratamientos sobre la caliza del Cerro de las Mesas. Se han seleccionado seis productos (2 consolidantes, 2 protectores y 2 mixtos), y se han aplicado sobre probetas de ensayo. Para su valoración se han tenido en cuenta tres aspectos fundamentales: la compatibilidad con el sustrato (estudiando el color y modificación de la porosidad), la eficacia de los tratamientos (estudiando propiedades hídricas de absorción de agua y la compacidad, a través de la modificación de velocidad de ultrasonidos), y por último, la resistencia a los agentes de alteración, mediante el ensayo de cristalización de sales.

Palabras Clave: caliza arrecifal, tratamientos consolidantes, hidrófugos, compatibilidad, eficacia tratamientos, resistencia a la alteración

INTRODUCCIÓN

El yacimiento arqueológico de Acinipo, a unos 12 km al noroeste de Ronda, se ubica en una gran mesa geográfica de origen terciario, con una altitud media de 999 m sobre el nivel del mar. Su prominencia en la Depresión de Ronda (Málaga) le confiere un claro valor estratégico, que junto a otros factores económicos, propiciaron el enclave y prosperidad de la ciudad romana de Acinipo, hasta el siglo III d.C cuando comienza su decadencia [1].

El edificio mejor conservado y símbolo de la ciudad es su Teatro, que se asienta en el extremo oeste de Acinipo, la zona más alta del cerro de las Mesas, el cual presenta una apreciable inclinación estructural y fuerte basculamiento en sentido W-E. La cávea del teatro fue excavada en la propia ladera del macizo rocoso, y su vaciado suministró toda la piedra necesaria para la elevación del frente de escena que contiene dos pisos.

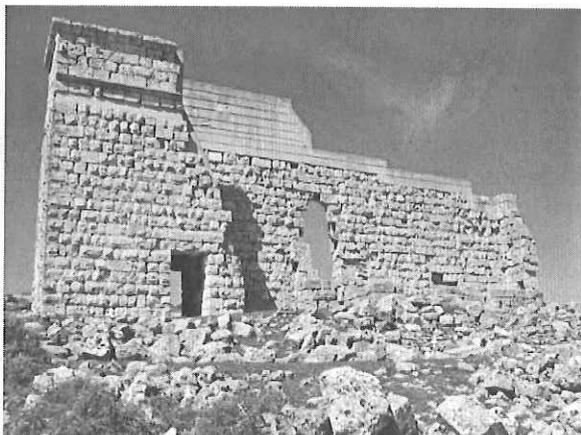


Foto 1. Teatro Acinipo, parte trasera.



Foto 2. Imagen de la cávea del teatro

Geológicamente el cerro corresponde a un tramo de materiales calizos alternados con bancos más arenosos, datados como del Mioceno Superior, concretamente del Messiniense Superior [2]. La formación de las Mesas, de unos 30 m de potencia, corresponde a facies de depósito marino poco profundo (<100 m), constituida por calizas de estructura arrecifal, *Biolitito* [3], compuestas fundamentalmente por algas rojas coralinas, que reposan sobre las margas y limos arenosos de la formación de la Mina. Además de algas, se han encontrado, restos de lamelibranquios litófagos, braquiópodos y escasos foraminíferos. Este depósito se vería posteriormente sometido a procesos de compactación y de relleno con material micrítico por la destrucción parcial de los organismos. El cemento secundario es escaso.

La porosidad de la roca es aproximadamente del 20%, distribución heterogénea, abundantes macroporos, y en gran parte, cerrada o poco comunicada; todo ello condicionado por la estructura originaria del sedimento y los organismos constituyentes. Esta distribución de la porosidad favorece la existencia de alteraciones diferenciales, observándose en el teatro sectores de la roca con aspecto masivo y en buen estado de conservación, frente a otras zonas en las que se han formado grandes oquedades. Por otro lado, también aparecen otras heterogeneidades como la presencia de cementaciones irregulares o zonas concretas enriquecidas en material fino arcilloso y yeso, ambos intrínsecos a la roca.

MATERIAL Y MÉTODO

Para llevar a cabo la selección de los tratamientos más adecuados se ha aplicado la metodología desarrollada en el IAPH [4], que se centra en valorar los siguientes aspectos:

- Compatibilidad de los Tratamientos con la piedra.
- Eficacia de los Tratamientos.
- Resistencia a los Agentes de Alteración

Estos parámetros se han cuantificado mediante la realización de una serie de ensayos sobre probetas cúbicas de 5 cm, obtenidas a partir de sillares descontextualizados en el yacimiento, a las que se le han aplicado los siguientes tratamientos: 2 consolidantes a base de silicato de etilo (C1, C2), 2 hidrofugantes organosilícicos (H1, H2), y 2 productos acril-silicónicos de comportamiento mixto (M1, M2). Estos han sido aplicados por inmersión en las soluciones durante 10 minutos en las concentraciones recomendadas, y fue controlado su tiempo de secado mediante pesadas a intervalos regulares de tiempo.

Por **compatibilidad** se entiende la ausencia de efectos secundarios negativos debidos a la aplicación de los tratamientos. La valoración se centra en determinar si los cambios que tienen lugar en las propiedades de la piedra podrían causar futuras alteraciones o cambios estéticos importantes. Las propiedades que se han estudiado son el *color* y la *porosidad total*.

El *color* se ha determinado con un colorímetro Minolta 210-CR, usando la escala CIE Lab [5]. La *porosidad* y la *densidad* se han determinado mediante el ensayo de saturación al vacío y pesada hidrostática [6]. Estas propiedades se han determinado en todas las probetas antes y después de aplicarles los tratamientos para valorar su modificación.

Por **eficacia** se entiende el grado de mejora que se obtiene con cada tratamiento considerando el fin que se persigue. De los consolidantes se espera básicamente un aumento de la cohesión y de las propiedades mecánicas, mientras que de los hidrófugos que protejan del principal factor de alteración, el agua, y de los productos mixtos ambas cosas.

Para medir la eficacia de los tratamientos hidrófugos y mixtos se han realizado *ensayos de absorción de agua, por inmersión y por capilaridad* [6], que también se han determinado en productos consolidantes. La eficacia de los consolidantes y productos mixtos se realiza midiendo la mejora de sus propiedades mecánicas o relacionadas con el grado de compacidad que le confieren. En este caso se ha realizado una estimación indirecta a través de la medida de la *velocidad de propagación de ultrasonidos* [7] de las probetas antes y después de aplicarles los tratamientos. Para ello se ha empleado un equipo Ultrasonic Tester BP5 de Neurtek. Adicionalmente estas medidas también se han realizado sobre productos hidrófugos.

La **resistencia a los agentes de alteración** tiene por objeto valorar la durabilidad que ofrece el sistema piedra-tratamiento frente a los agentes de alteración, llevándolo a cabo a través de ensayos de envejecimiento acelerado. Se ha realizado el *ensayo de cristalización de sales* [8], muy representativo en la evaluación de la resistencia a la alteración, y además extrapolable, en cierto modo, al ensayo de gelifracción, ya que reproducen mecanismos de alteración muy similares (esfuerzos de tracción en los poros). Se han completado un total de 30 ciclos, utilizando una solución de sulfato sódico al 10%, que cristaliza con 10 moléculas de agua. Cada ciclo consta de 24h de inmersión en la solución salina, 22 h en estufa a 65°C, 2 horas de enfriamiento, y pesada.

RESULTADOS

Compatibilidad con el sustrato.

1. Porosidad

El valor medio de la porosidad de la piedra antes de ser tratada, calculado sobre 65 probetas, es de 19,60%, con una desviación típica de 2,20, y una densidad aparente de 2,15 gr/cm³.

En la figura 1 se representa la porosidad frente a la densidad de probetas con consolidantes, productos mixtos, y las probetas sin tratar. Se observa como los tratamientos aumentan la densidad y disminuyen la porosidad, indicativo de la cantidad de producto que queda en la capa más superficial tratada. Se ha determinado el grado de reducción de la porosidad (%) tras la aplicación de los productos, realizándose una estimación media por tratamiento (figura 2). Las disminuciones no son muy elevadas lo cual sería negativo ya que podrían taponar en exceso los poros, disminuyendo la capacidad de transferencia de la humedad de la piedra.

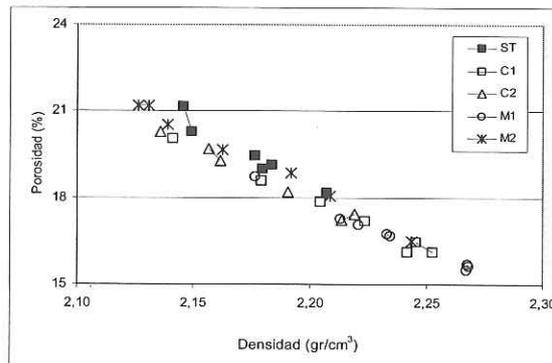


Figura 1. Porosidad vs Densidad (Consolidantes)

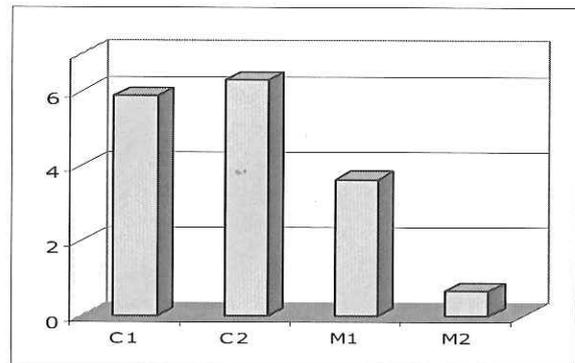


Figura 2. Disminución Porosidad consolidantes (%)

2. Color

Los resultados obtenidos en la determinación del color (parámetros L, a y b) aparecen en las figuras 3 y 4. La figura 3 recoge los valores de "L" que representa el índice de luminosidad que varía desde 0 (más oscuro) a 100 (más claro). En el gráfico aparecen los valores medios y la desviación típica de los valores "L", determinados en las probetas antes y después de tratar.

Se observa que los consolidantes (C1, C2) modifican ligeramente este parámetro, sin embargo la diferencia entre ellos no es sustancial. De los hidrófugos, H2 destaca por su mejor comportamiento, siendo el producto que menor modificación presenta.

En la figura 4 aparecen los valores medios de "a" y "b" para cada grupo de probetas antes y después de ser tratadas. Estos valores identifican el tono; "a" varía de -120 (verde) a 120 (rojo), y "b" varía de -120 (azul) a 120 (amarillo). En los productos consolidantes existe una pequeña modificación hacia tonos rojos-amarillos, si bien se comporta mejor C2. De los productos hidrófugos destaca H2, ya que H1 sufre una variación considerable. De los mixtos, M1 sufre una importante modificación respecto a M2.

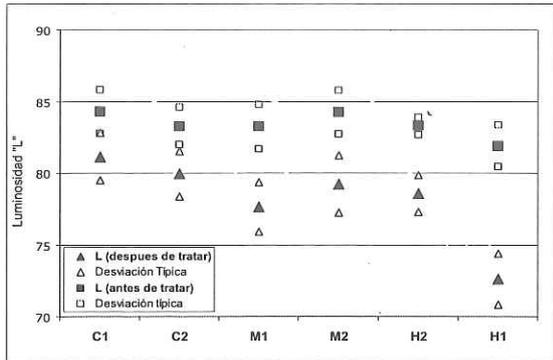


Figura 3. Luminosidad antes y tras el tratamiento

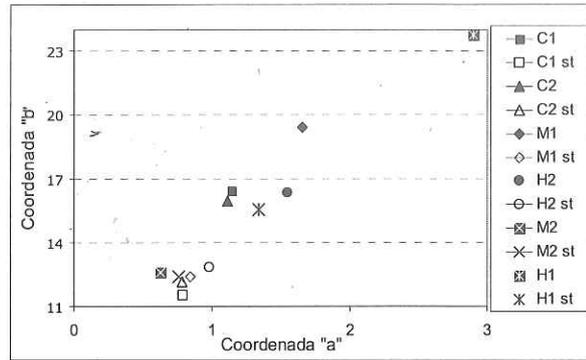


Figura 4. Modificación del Tono. "a" y "b"

Eficacia de los tratamientos.

1. Absorción de agua.

En la figura 5 se representan las curvas de absorción de agua por inmersión, representando el incremento de peso (%) frente a la raíz cuadrada del tiempo. Los productos hidrófugos presentan buen comportamiento, reduciendo significativamente la absorción en todo el ensayo. La capacidad de absorción es menor con H1, aunque menos del 1% de diferencia con H2.

Los productos mixtos, a pesar de ser hidrófugos, no reducen la absorción de agua en absoluto, especialmente M2, con comportamiento similar al de la piedra sin tratar. El M1 tiene buen comportamiento sólo al comienzo del ensayo. C1 y C2 se comportan de forma similar a la piedra sin tratar ya que no impiden la entrada de agua, aunque producen una ligera disminución en la capacidad de absorción.

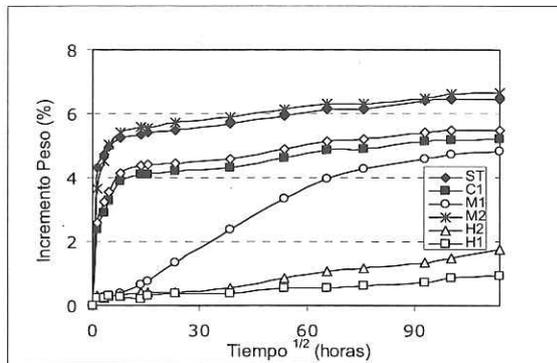


Figura 5. Curvas de absorción por inmersión

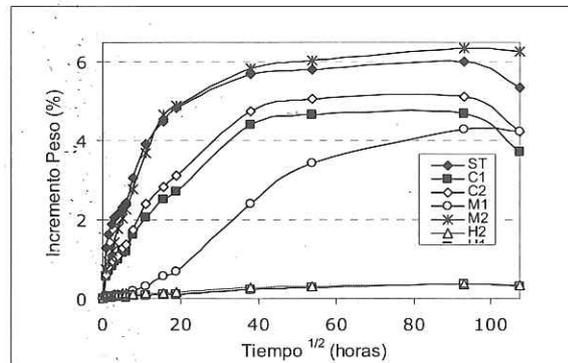


Figura 6. Curvas de absorción capilaridad

En la figura 6 aparecen las curvas de absorción capilar en la que todos los tratamientos producen una disminución, salvo M2 que se comporta igual que la piedra sin tratar. El M1 es similar al ensayo anterior, transcurrido un tiempo pierde el efecto hidrorrepelente. Los hidrófugos (H1, H2) muestran muy buenos resultados, con un incremento de peso menor al 0,5%. Los consolidantes (C1,C2) muestran el mismo comportamiento que la piedra sin tratar, aunque disminuye en algo su capacidad de absorción, con una leve diferencia entre ambos.

2. Velocidad de Ultrasonidos

Se han realizado medidas de ultrasonidos de todas las probetas antes y después del aplicar el tratamiento mediante "método directo", situando los palpadores en caras paralelas. Se han realizado medidas en las tres direcciones perpendiculares para valorar la influencia de posibles anisotropías. En la figura 7 aparece la media de los valores de Vp antes y después de tratar, y en la figura 8 aparece la media del incremento de velocidad (%) para cada tratamiento

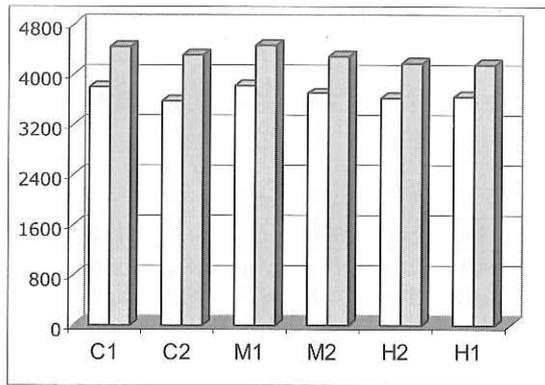


Figura 7. Incremento Medio Vp (m/s)

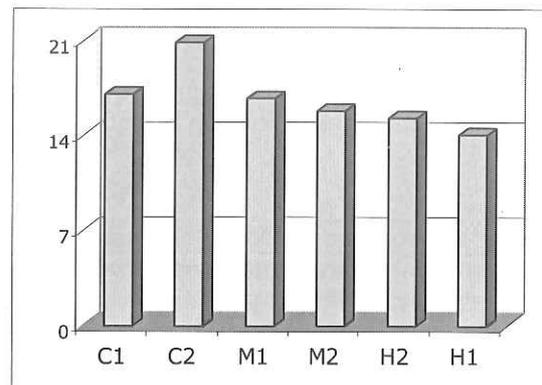


Figura 8. Incremento (%) de Vp por tratamiento

Todos los tratamientos, incluso los hidrófugos, aumentan la velocidad de ultrasonidos, indicativo de la cantidad de producto que rellena parcialmente los poros aumentando su compacidad. De los productos consolidantes, que son los que confieren mayor compacidad, destaca C2 sobre C1. De los productos mixtos destaca M1, y de los hidrófugos H2.

Resistencia a los Agentes de Alteración (Cristalización de Sales)

En la figura 10 se representa la variación media de peso (%) por grupos de probetas a lo largo del ensayo. En todos los casos se produce un incremento del peso correspondiente a las sales que cristalizan en el interior, manteniéndose a lo largo de todo el ensayo. Tan sólo la piedra sin tratar comienza a perder algo de material tras un número elevado de ciclos.

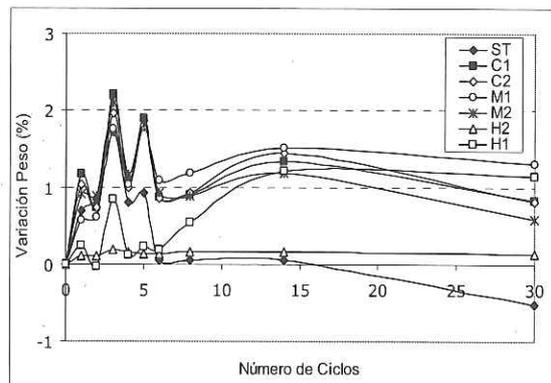


Figura 9. Evolución peso. Cristalización de sales



Foto 3. Probetas sin tratar. 14 ciclos

Todos los productos estudiados manifiestan buen comportamiento, puesto que la piedra no se altera en ningún caso, salvo M2 que presenta pérdidas leves de material, menores que la piedra sin tratar. Los consolidantes (C1, C2) tienen exactamente el mismo comportamiento a lo largo del ensayo, manteniéndose las probetas casi intactas al final del mismo. De los hidrófugos, aunque han funcionado muy bien, destaca el comportamiento de H2, ya que evita de forma eficaz la penetración de la solución salina al interior de la piedra a lo largo de todo el ensayo, mientras H1 a partir del octavo ciclo comienza a perder su efecto hidrófugo.

El buen comportamiento de la piedra frente al ensayo de cristalización de sales puede deberse al gran tamaño de los poros, que hace posible que las sales cristalicen sin producir tensiones que lleguen a fragmentar el material. Además, como la porosidad es poco comunicada la solución salina solo llegará a las zonas de más fácil acceso, hecho que también favorece la existencia de alteraciones diferenciales. En las probetas sin tratar (figura 10), las únicas con síntomas de alteración, aparecen pequeños desprendimientos de piedra aislados, junto a otras zonas que quedan intactas, reflejo de la heterogénea distribución de la porosidad, y por tanto, de la acción de la cristalización de sales.

CONCLUSIONES

En la tabla 1 aparece un resumen de la efectividad global de cada uno de los tratamientos estudiados, comparándolos con la piedra sin tratar

Tabla 1. Resumen de la Efectividad de Productos Consolidantes y Protectores

	Porosidad	Color	Inmersión	Capilaridad	Ultrasonidos	Crist. Sales
C1	+	+	++	++	+	++
C2	+	++	++	++	++	++
M1	++	+	-	-	++	++
M2	++	+	--	--	+	+
H2		+	++	++	++	++
H1		-	++	++	+	+

++ Muy bueno + Bueno - Negativo -- Muy Negativo

Se observa que los productos mixtos (M1, M2) presentan mal comportamiento en los ensayos de propiedades hídricas; y en el resto de ensayos tampoco ofrecen el mejor resultado. De los hidrófugos destaca el comportamiento del H2 en casi todos los ensayos respecto al H1, especialmente el ensayo de alteración y en el de color. Por último, los dos consolidantes tienen buen comportamiento en todos los ensayos, por lo que cualquiera de ellos sería aceptable, sin embargo C2 destaca en velocidad de ultrasonidos respecto a C1. Además en el caso de que se pretenda aplicar un consolidante y un protector en una misma zona sería más compatible la utilización de C2 y H2 puesto que ambos son del mismo fabricante.

REFERENCIAS

- [1] M. del Amo de las Heras, "El teatro romano de Acinipo", *Teatros en la Hispania romana*, Badajoz, 1982, págs. 215-232. 1982
- [2] Serrano Lozano, Fco, "Los Foraminíferos de la Cuenca de Ronda y otras áreas de las C. Béticas" Tesis Doctoral, 1979
- [3] Folk, R. L. "Practical petrographic classification of limestone". *Am Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, 43, 1-38 (1959)
- [4] Villegas, R. "Metodología para la evaluación y estudio previo de tratamientos". Metodología de diagnóstico y evaluación de tratamientos para la conservación de los Edificios Históricos. Consejería de Cultura. Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico. 2003. pp. 194-207.
- [5] Arroyo, F.; Alcalde, M.; Villegas, R; Robador, M. D. "Utilización de plantillas para adaptar la superficie de proyección de un colorímetro al tamaño de muestra". *Materiales de Construcción*. Aceptado
- [6] Ontiveros, E.; Villegas, R: "Programa de normalización de estudios previos y control de calidad en las intervenciones: Propiedades Hídricas. 1ª Parte". *PH Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, 22, 45-49, 1998
- [7] Sebastian, M, de la Torre, M.J, Cazalla, O., Cultrone, Rodriguez-Navarro, C. "Evaluation of treatments on biocalcarenes with ultrasound" *The e-Journal of Nondestructive Testing & Ultrasonics*. Vol 4, num 11- 1999
- [8] Villegas, R. "Programa de normalización de estudios previos y control de calidad en las intervenciones: Ensayos de alteración de materiales pétreos". *PH Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*; 31, 78-88, 2000