



**YACIMIENTO ARQUEOLÓGICO DE ACINIPO**

**RONDA, MÁLAGA.**

**EVALUACIÓN DE TRATAMIENTOS**

**Marzo, 2008**

**EVALUACIÓN DE TRATAMIENTOS DE CONSERVACIÓN  
LADRILLOS DEL YACIMIENTO ARQUEOLÓGICO DE ACINIPO**

<b>ÍNDICE</b>	<b>Página</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN</b>	03
<b>II. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE TRATAMIENTOS</b>	03
<b>III. MATERIALES ENSAYADOS</b>	05
<b>IV. RESULTADOS</b>	09
<b>IV.1. Compatibilidad con el material</b>	10
IV.1.1.- Porosidad	
IV.1.2.- Color	
IV.1.3.- Velocidad Evaporación (Desorción)	
<b>IV.2. Eficacia del tratamiento</b>	18
IV.2.1.- Absorción de agua por capilaridad	
IV.2.1.- Dureza Superficial	
<b>IV.3. Ensayos de alteración acelerada</b>	23
IV.3.1.- Ensayo de cristalización de sales	
<b>VI. CONCLUSIONES</b>	27
<b>ANEXO. Imágenes de las Probetas Ensayo de Cristalización de Sales</b>	29

## **I. INTRODUCCIÓN**

El presente informe se emite como respuesta a la petición realizada por el Museo de Ronda, solicitando apoyo técnico y aportación en cuanto a la caracterización de Materiales presentes en el Yacimiento Romano de Acinipo, y más concretamente en este caso, en cuanto a la valoración de Productos de Conservación.

Durante las excavaciones realizadas en el yacimiento arqueológico de Acinipo aparecieron numerosas estructuras de ladrillo. El estado de conservación de los mismos por lo general era bastante bueno, sin apenas síntomas de alteración. Sin embargo, tras dejarlos a la intemperie durante un tiempo, bajo la acción de los agentes climáticos (fluctuaciones bruscas de temperatura, acción de las heladas, acción de sales solubles, ciclos de humectación-sequedad, etc), se observó que aparecieron algunas manifestaciones de alteración relacionados con la acción de estos agentes.

Se ha considerado la posibilidad de aplicar un producto protector que evitara al menos la penetración de agua desde el exterior, y a su vez todos los procesos de alteración relacionados con el agua. Antes de su aplicación en el yacimiento se ha realizado una valoración en laboratorio sobre la idoneidad de ciertos productos que se podrían aplicar.

## **II. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE TRATAMIENTOS.**

Los estudios que aquí se recogen están referidos a la evaluación de productos protectores (hidrófugos) sobre ladrillos que aparecen en el yacimiento, ya que la aplicación de un producto consolidante es necesaria únicamente cuando los materiales han perdido cohesión y debe introducirse un material que consiga la unión entre los granos que lo forman y que han quedado sueltos, o cuando se quiera aportar a los materiales una resistencia añadida frente a los agentes de alteración, cosa que en este caso, en principio, no parece necesaria.

La hidrofugación se basa en la aplicación de un tratamiento que impida la entrada de agua líquida en los materiales pero que permita la salida del agua en forma de vapor, es decir, que mantenga la "respiración" del material. Este tipo de tratamiento debe utilizarse siempre que el agua sea un factor de alteración importante y complementándolo con medidas que impidan la entrada de agua por otros frentes.

La metodología general a seguir para determinar la idoneidad de cualquier tipo de tratamiento debe centrarse en evaluar los siguientes aspectos:

1.- *Compatibilidad de los productos* y técnicas empleados con los materiales originales de la obra. Para ello se determinan una serie de propiedades del material que pueden verse modificadas con la aplicación del tratamiento (porosidad, color, velocidad de evaporación de agua, etc.) y se decide si esas modificaciones son aceptables o no.

2.- *Eficacia del tratamiento*, es decir, que con él se consiga el fin que se persigue. Para los productos hidrófugos se estudia cómo disminuye la entrada de agua en el material, determinando las propiedades hídricas.

3.- *Resistencia a los agentes de alteración* que actuarán sobre la obra una vez restaurada. Se someten las probetas preparadas a los ensayos de alteración acelerada que mejor reproduzcan los agentes y mecanismos de alteración que actúen sobre la obra.

### **III. MATERIALES ENSAYADOS.**

#### ***Ladrillos***

Para la realización de los distintos ensayos de evaluación se han utilizado probetas elaboradas a partir de dos ladrillos descontextualizados extraídos del propio yacimiento. Se han preparado probetas de forma paralelepípeda de formas y tamaños muy similares entre sí, aunque no regulares, al estar condicionada por la morfología original de los ladrillos.

Las características composicionales y texturales de estos ladrillos aparecen descritas en el trabajo de *"Caracterización de Materiales del Yacimiento de Acinipo"*. Como se pudo extraer de este estudio los ladrillos se elaboraron con arcillas muy ricas en calcita, que por sus características y abundancia en globigerinas se podrían atribuir a la *Formación de la Mina*, formada por margas y limos arenosos, y datada en el Tortoniense-Messiniense. Contienen en distintas proporciones, dependiendo de las piezas, fragmentos de rocas calcáreas y a veces fragmentos de cerámica anteriores "chamota".

También se estableció que existían diferencias sustanciales en el grado de cocción entre unas piezas y otras, que además de incidir en la composición mineralógica, puede influenciar en los rasgos texturales, y concretamente en la porosidad y la configuración del sistema poroso (tamaño de los poros, distribución, morfología y grado de conexión entre ellos). Este hecho, que también puede ocurrir en materiales pétreos heterogéneos, puede condicionar, en parte, que el efecto de los tratamientos y la alterabilidad de los ladrillos varíen de unas piezas a otras; sin embargo, los resultados de este trabajo pueden ser bastante orientativos y válidos, especialmente para ladrillos con similares características a los ensayados.

### **Productos Ensayados**

Los tres productos empleados para el estudio se describen brevemente a continuación (tabla 1).

**Tabla 1.** Descripción de Tratamientos Hidrófugos

<b>SILO 111</b>
<b>Hidrofugante</b> listo para el uso, a base de organosiloxanos oligoméricos de bajo peso molecular en solución al 10% en aguarrás. <i>Fabricante:</i> CTS. Contenido materia activa: 10%.
<b>PROTECER SX-12</b>
<b>Hidrofugante</b> indicado para la protección de materiales constructivos como: barro cocido, piedra natural, piedra artificial, revocos minerales, hormigón de todo tipo, hormigón aireado. <i>Fabricante:</i> ARDEX Cemento S.A.
<b>ACRISIL 201</b>
<b>Consolidante-Hidrofugante.</b> Producto de características mixtas listo para el uso, a base de una resina acrílica y una resina silicónica en disolventes orgánicos. <i>Fabricante:</i> CTS. Contenido materia activa: 8%.

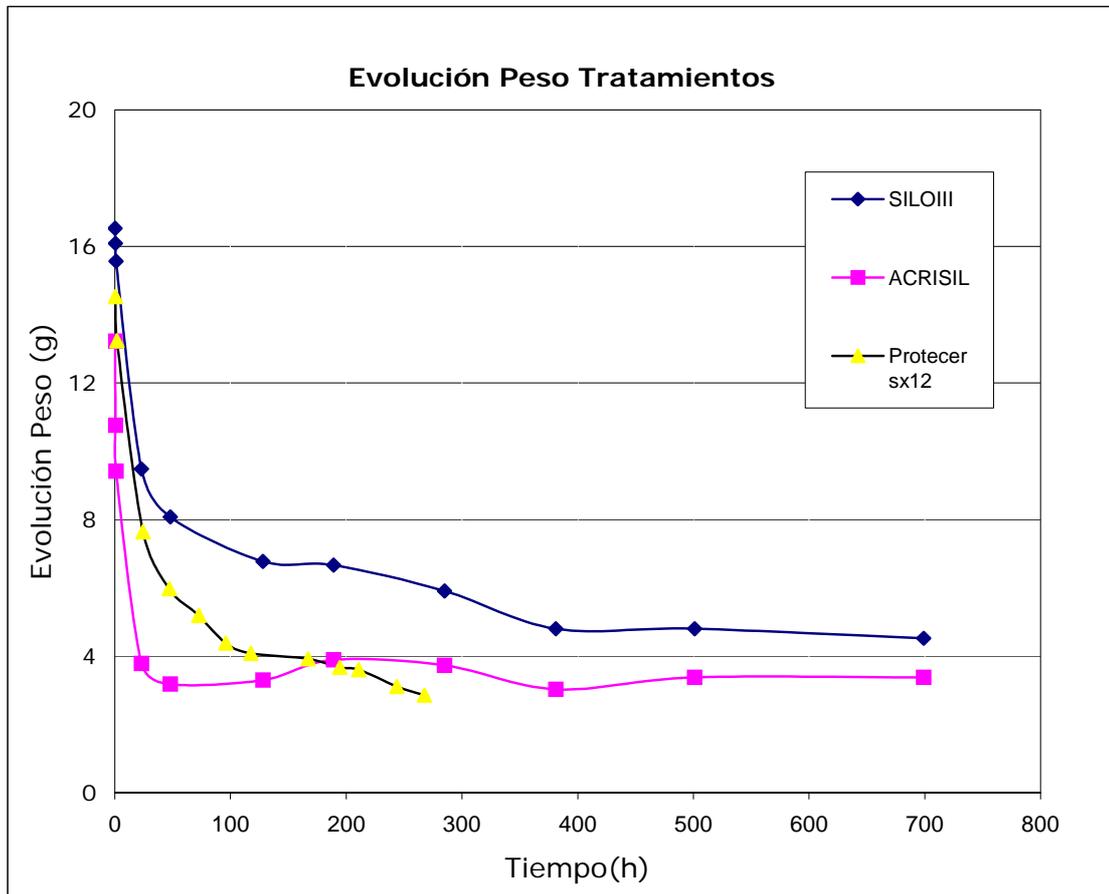
Se han seleccionado dos productos de características hidrófugas y otro de características mixtas (hidrófugo y consolidante). De los tres productos, relativamente recientes, uno de ellos, el **SILO 111** de CTS, presenta similar formulación que otros productos hidrófugos más antiguos, tipo Tegosivin HL o Wacker 290L y que suelen dar buenos resultados; el segundo, el hidrófugo **PROTECER SX-12** de ARDEX, es de fabricación española. Por último, el producto de características mixtas, el **ACRISIL 201** de CTS, también presenta composiciones similares a productos más antiguos que mezclan resinas acrílicas y silicónicas.

### ***Aplicación de los Tratamientos***

Las probetas se han impregnado por inmersión en las soluciones, preparadas con las concentraciones más adecuadas a cada tratamiento. Antes de la impregnación con los productos, las probetas se han limpiado y dejado secar al aire, para conseguir un contenido de humedad higroscópica en equilibrio con el ambiente. Las probetas se han tratado por inmersión durante diez minutos, tiempo suficiente para conseguir una buena penetración, además de ser el método de mayor objetividad ya que la cantidad de producto y profundidad de impregnación estará condiciona únicamente por las propiedades del propio producto (viscosidad, tamaño de las moléculas, etc).

Tras la impregnación se ha controlado la evolución de peso periódicamente hasta alcanzar un valor constante que indica el completo secado de los tratamientos. De esta forma se ha determinado el tiempo de secado y el incremento de peso tras el secado. La evolución del peso de las probetas durante el tiempo de secado se representan en la figura 1.

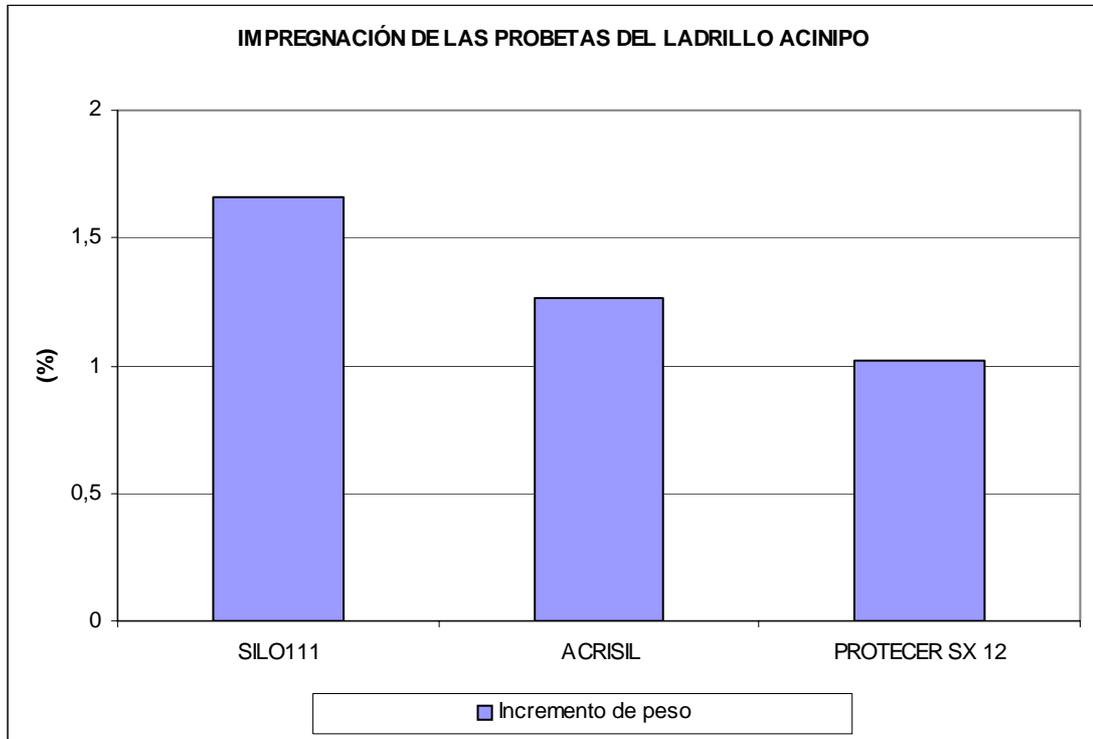
Los incrementos de peso experimentados por las probetas son proporcionales a los contenidos de materia activa de los tratamientos. Con los datos reflejados en la gráfica se aprecia como los tratamientos hidrófugos difieren en su comportamiento en comparación con el producto consolidante-hidrofugante Acrisil en cuanto al tiempo que tarda en alcanzarse peso constante. Esta diferencia en los tiempos de secado se debe a la presencia de disolventes de distinta volatilidad y a que los productos a base de siliconas deben experimentar también la reacción de polimerización, eliminación de subproductos y establecimiento de enlaces con la superficie de los granos del soporte. Por el contrario, en los productos que no tienen naturaleza silícica, como es Acrisil, sólo tiene lugar la evaporación del solvente y la consiguiente precipitación del producto sobre la superficie de los granos, a los que se adhiere por fuerzas intermoleculares.



**Figura 1.** Evolución del secado de los tratamientos.

En la figura 2 se muestra el incremento de peso (%) para cada tratamiento. El incremento de peso es proporcional a la cantidad de producto absorbido por el ladrillo, que a su vez está relacionada directamente con el contenido de materia activa tras secar el tratamiento, y lógicamente de la porosidad (volumen y tamaño de poros) del material que condicionará la capacidad de absorber producto.

Como se observa en la figura 2, el tratamiento que presenta mayor cantidad de producto activo tras el secado es el SILO 111, seguido de ACRISIL, y por último el PROTECER SX12.



**Figura 2.** Incremento de peso (%) proporcional a cantidad de producto activo

#### IV. RESULTADOS

Para evaluar los tratamientos y seleccionar el más adecuado se ha seguido la metodología ya mencionada, puesta a punto en el I.A.P.H. consistente en estudiar tres aspectos:

- Compatibilidad del tratamiento con el material
- Eficacia del tratamiento
- Resistencia de la piedra tratada a la alteración

## **IV.1. - Compatibilidad con el Material**

Por compatibilidad se entiende la ausencia de efectos secundarios negativos debidos a la aplicación de los tratamientos. Dado que los productos que se han incluido en el estudio no reaccionan con el ladrillo o dan origen a subproductos perjudiciales, la valoración se centra en determinar si los cambios que tienen lugar en las propiedades del material pueden ser la causa de futuras alteraciones, o cambios estéticos no aceptables. Las propiedades que se han estudiado con este objetivo son el Color, modificación de la Porosidad total, y Velocidad de Evaporación.

Para determinar si un tratamiento es aceptable, es fundamental conocer cómo se modifican estas propiedades, respecto al material sin tratar, por eso siempre se realiza un estudio comparativo. Si la variación producida es excesivamente alta, puede ser necesario descartar dicho tratamiento.

### **IV.1.1.- Porosidad**

La porosidad accesible o abierta se determina por el método de la absorción de agua a vacío. Las probetas se introducen en un recipiente, en el que se hace vacío durante 5 horas, conectado a otro recipiente con agua, en el que también se hace vacío. Tras este tiempo se hace pasar lentamente el agua al recipiente con las probetas, manteniendo el vacío, hasta que están completamente sumergidas. Entonces se corta el vacío y se dejan las probetas sumergidas durante 4-5 días, hasta alcanzar peso constante. Con ayuda de la pesada de la probeta seca, pesada hidrostática y pesada de la probeta saturada se calcula la porosidad y la densidad.

La porosidad se calcula por la siguiente expresión:

$$Porosidad(\%) = \frac{Vol.poros}{Vol.aparente} = \frac{P_{sat} - P_{seco}}{P_{sat} - P_{sum}} \cdot 100$$

- $P_{sat}$ =Peso de la probeta saturada de agua.

- $P_{sum}$ =Peso sumergido de la probeta.

- $P_{seco}$ = Peso de la probeta seco.

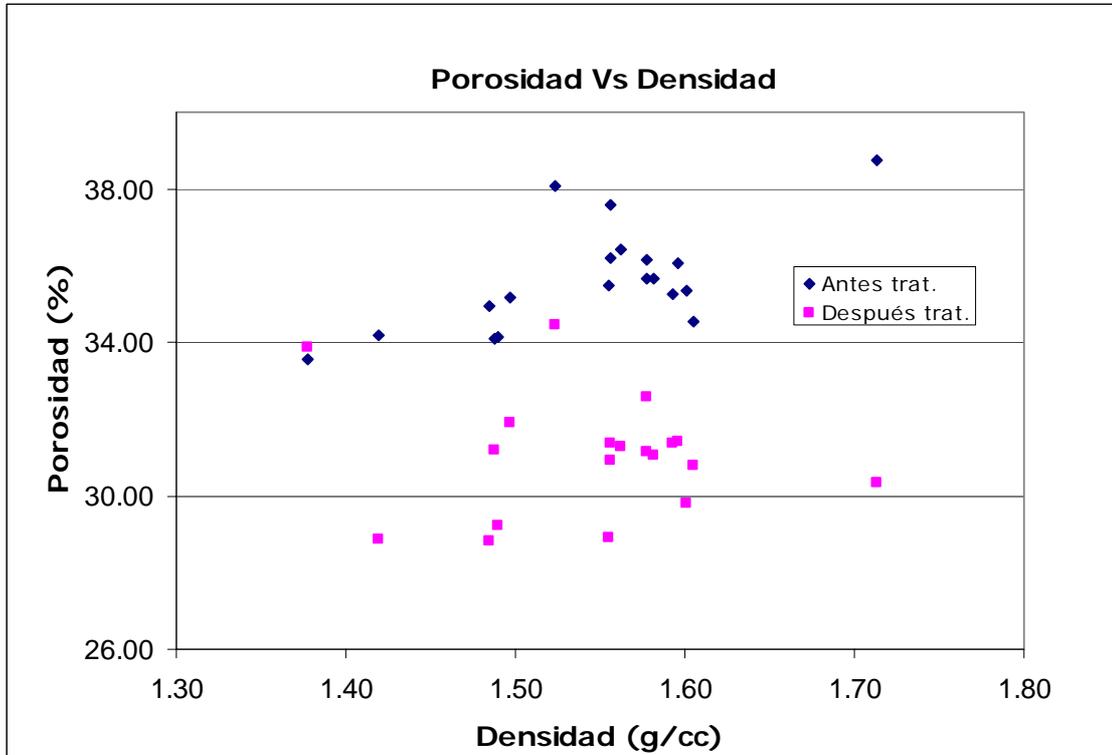
Para el calculo de la densidad se ha utilizado la siguiente expresión:

$$Densidad = \frac{P_{seco}}{Vol.aparente} (g / cm^3)$$

La **Porosidad Media** de las probetas de ladrillo antes de ser tratadas es del 36%

En la figura 3 se representa la porosidad frente a la densidad de las probetas tratadas y las probetas antes del tratamiento. Se observa que las probetas tratadas tienen valores de porosidad bastante por debajo que las probetas sin tratar, lo cual es indicativo de la cantidad de producto que queda en la piedra incrementando su densidad en la zona más superficial.

Se puede observar la existencia de una relación lineal inversa entre la porosidad y la densidad, así como una disminución considerable de la porosidad tras la aplicación de los tratamientos, que se ha comprobado que es de forma similar en todos ellos, en torno a un 10% respecto a la original de cada grupo de probetas. Esta disminución de la porosidad se produce sólo en la capa tratada por lo que puede que en este caso el taponamiento de los poros sea excesivo.



**Figura 3.** Valores de porosidad frente a densidad de probetas tratadas y sin tratar

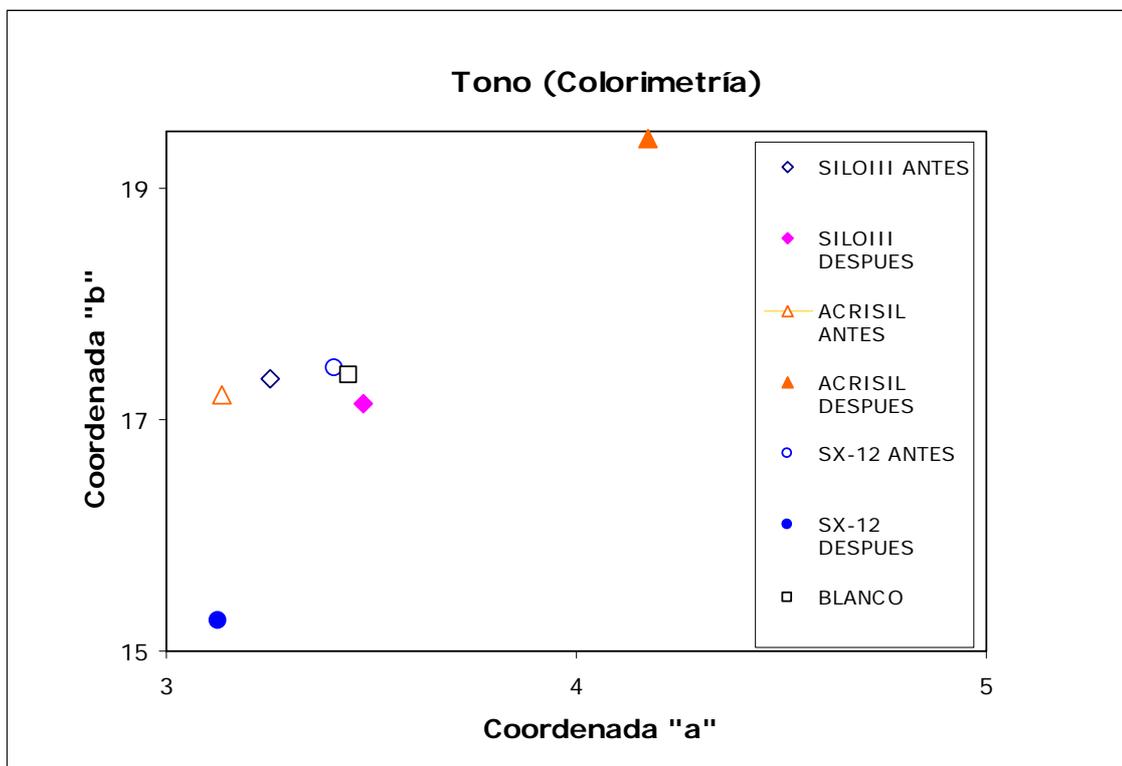
#### IV.1.2. Color

Habitualmente casi todos los tratamientos suelen modificar el color de los materiales sobre los que se aplican, en algunos casos oscureciendo el color original, en otros casos variando el tono. Se ha medido el color en las probetas con un colorímetro Minolta 210-CR, usando la escala CIE Lab. El valor de "L" representa la claridad o luminosidad y varía de 0 (más oscuro) a 100 (más claro); los valores de "a" y "b" identifican el tono: "a" va de -120 (verde) a 120 (rojo), "b" va de -120 (azul) a 120 (amarillo).

El color se ha medido en todas las probetas antes y después de aplicar los tratamientos. Los valores que se representan en las figuras siguientes son las

medias de todas las probetas tratadas con cada producto.

En la figura 4 se representa el valor medio del Tono ("a" y "b") para las probetas antes de ser tratadas (blanco), y las variaciones sufridas por el color para cada tratamiento, comparándolas para el mismo grupo de probetas antes de tratarlas.



**Figura 4.** Modificación media de los parámetros "a" y "b"

Como se observa el tratamiento que menos modifica el tono es el SILO 111, que modifica un poco el valor de "a", de forma inapreciable. Los otros dos a pesar de que no sufran variaciones importantes, presentan cambios mas notorios en "a" y "b".

En la figura 5 se presentan los valores medios del parámetro "L", y como se ha

visto modificado con cada tratamiento, respecto a las misma muestras antes del tratamiento. Como se observa en el gráfico todos los tratamientos tienden a oscurecer el color, siendo especialmente significativo el Acrisil. El que mejor comportamiento presenta es nuevamente el SILO 111, que es el que menos oscurece.

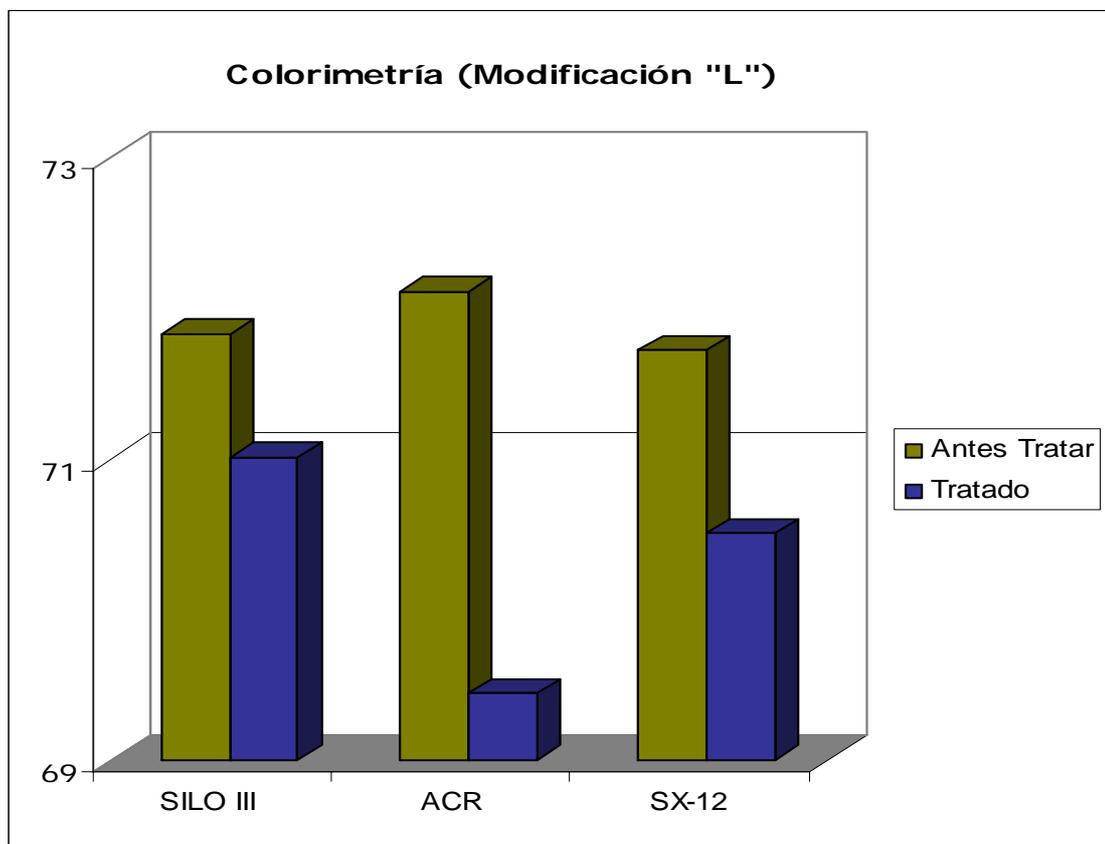


Figura 5. Modificación del parámetro "L". Valores medios

Por último, para cuantificar el efecto sobre el color de forma global, se ha calculado el siguiente valor

$$\Delta \text{Color} = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2}$$

Los valores medios de todas las probetas de cada tratamiento se recogen en la Tabla 1

**Tabla 2.** Variación global de color

Tratamiento	$\Delta$ Color
<b>SILO 111</b>	0,878
<b>Acrisil</b>	3,614
<b>Protecer SX-12</b>	2,521

Sin lugar a dudas el que mejor comportamiento presenta en cuanto al color es el SILO 111, con una diferencia considerable respecto de los otros dos.

#### **IV.1.3. Desorción de agua (Velocidad de Secado)**

Para este estudio las probetas se saturan de agua como se describió en el cálculo de la porosidad; después se colocan a la intemperie a temperatura constante en el laboratorio de 25°C. Las probetas se pesan a intervalos dados de tiempo, y se calcula la variación de peso en cada instante con las siguientes expresiones:

$$\Delta P(t) = \frac{P(t) - P_{\text{sec } o}}{S} \left( \frac{mg}{h \cdot cm^2} \right) \quad (1)$$

$$\Delta P = \frac{P(t) - P_{\text{sec } o}}{P_{\text{sec } o}} (\%)$$

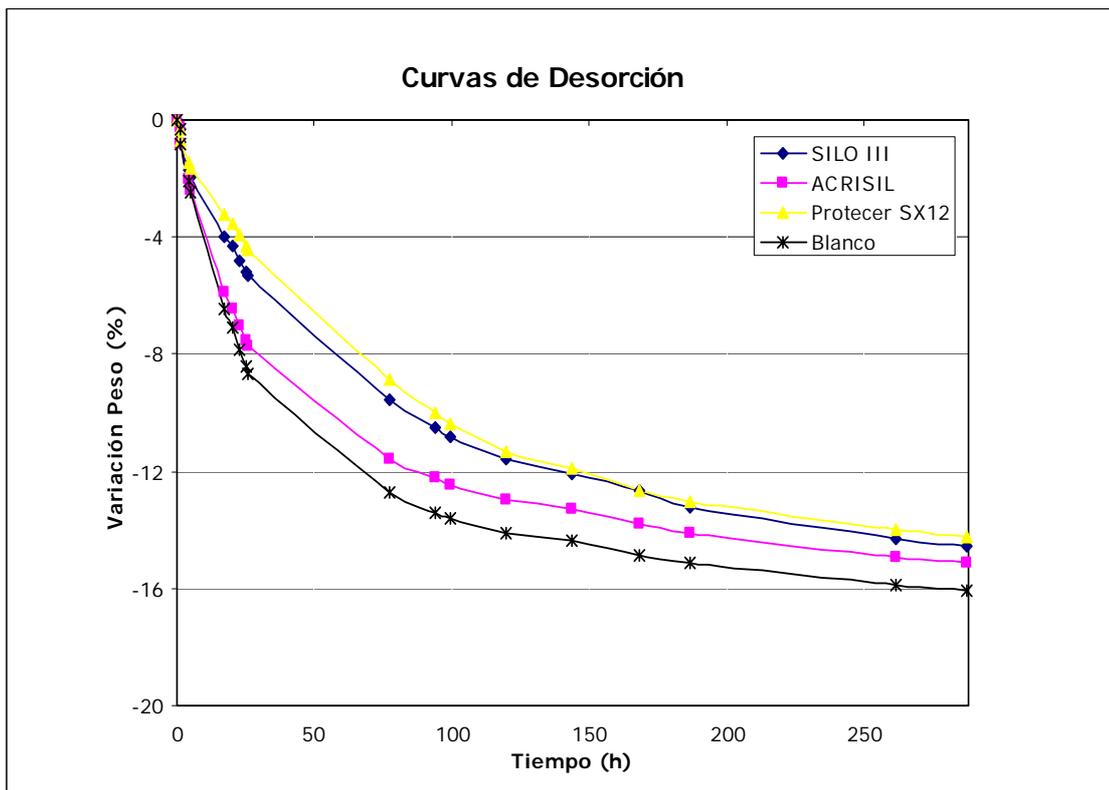
$P(t)$  = Peso de la probeta en cada instante.

$P_{seco}$  = Peso de la probeta seco.

$S$  = Superficie de evaporación.

La velocidad de secado de las probetas es una indicación de la capacidad de respiración del material, y de cómo se modifica por los tratamientos aplicados.

El contenido de agua en el punto en que la velocidad de evaporación deja de ser constante es el **“contenido de agua crítico”**. Este contenido, en general aumenta con todos los tratamientos hidófugos.



**Figura 6.** Curvas de Desorción de los distintos tratamientos y ladrillo sin tratar

La reducción más acusada de la velocidad se produce con los dos tratamientos hidrófugos (Silo 111, Protecer SX-12), mientras el de características mixtas (Acrisil) es el que más se aproxima a la velocidad del ladrillo sin tratar. Este hecho es el esperado, ya que, aunque los hidrófugos permitan la evaporación del agua desde el interior, ralentizan mucho el proceso. De los dos hidrófugos presenta mejor comportamiento el Silo 111.

En la figura 7 aparece la velocidad de evaporación calculada con la expresión (1). Como se observa la velocidad es mucho mayor en las probetas sin tratar que en las tratadas.

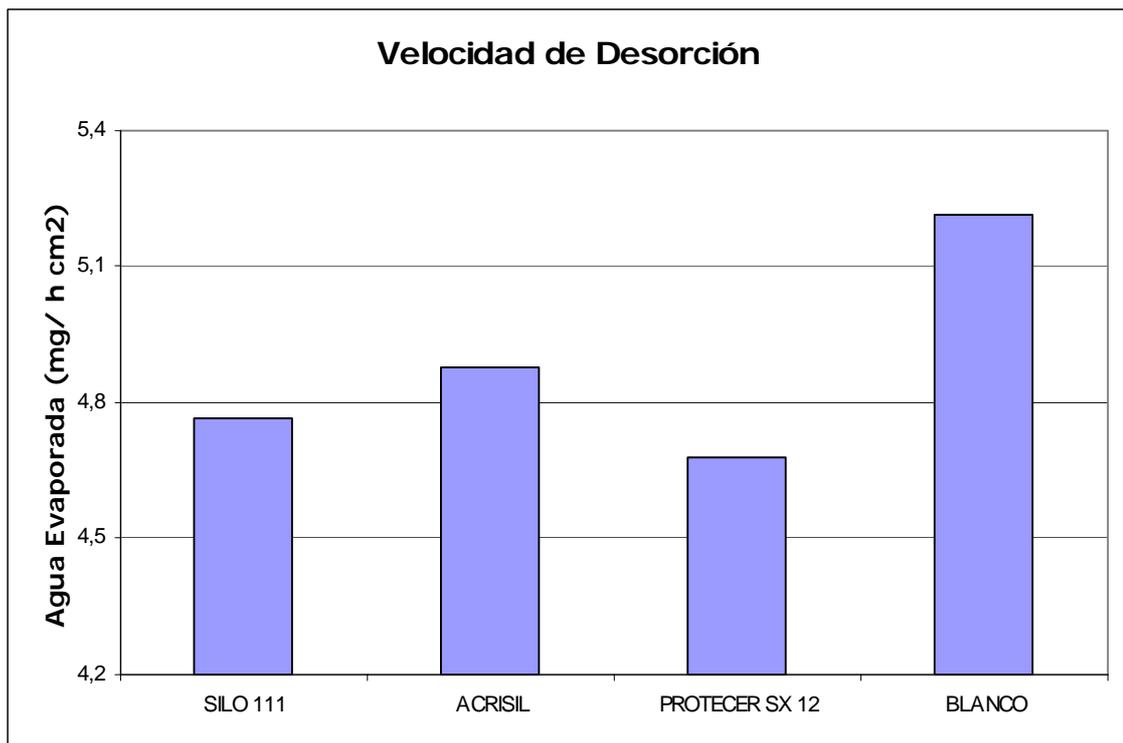


Figura 7. Velocidad de secado probetas tratadas y sin tratar.

Se observa que la velocidad de evaporación de las probetas tratadas es mayor en Acrisil (mixto), aunque no difiere demasiado de Silo 111 (hidrófugo).

Se concluye que el mejor comportamiento en Desorción lo presenta el Acrisil (que presenta menores propiedades hidrófugas) seguido de Silo 111.

## **IV.2.- Eficacia del Tratamiento**

El objetivo que se persigue cuando se trata un material es mejorar sus características y su resistencia frente a los factores de alteración que actúan sobre el. Cada tipo de tratamientos tiene una finalidad diferente, por lo que habrá que valorar su eficacia a través de distintas medidas.

Un tratamiento hidrófugo se aplica para proteger los materiales del principal factor de alteración, el agua, para lo cual se intenta disminuir la entrada de agua en la medida de lo posible; para medir su eficacia, por tanto, se han realizado ensayos de absorción de agua por capilaridad, comparando el ladrillo tratado y sin tratar.

Aunque los productos hidrófugos no deben tener efectos importantes sobre las propiedades mecánicas, adicionalmente se ha medido la dureza superficial por valorar cual es el que presenta mejor comportamiento.

### **IV.2.1.- Absorción de agua por Capilaridad**

La determinación de la absorción de agua por capilaridad se ha realizado siguiendo los ensayos Normalizados de propiedades hídricas. En el fondo de un recipiente se coloca una capa de papel secante de, al menos, 1 cm de espesor y se añade agua en la cantidad necesaria para asegurar que se encuentre mojado continuamente. Sobre esta capa de papel se colocan las probetas secas, de forma que estén en

contacto con el agua sólo por la base. Las probetas se pesan a intervalos dados de tiempo y se calcula el incremento de peso con la siguiente expresión:

$$\Delta P(t) = \frac{P(t) - P_{sec}}{P_{sec}} \cdot 100(\%)$$

P(t): Peso de la probeta en un instante dado.

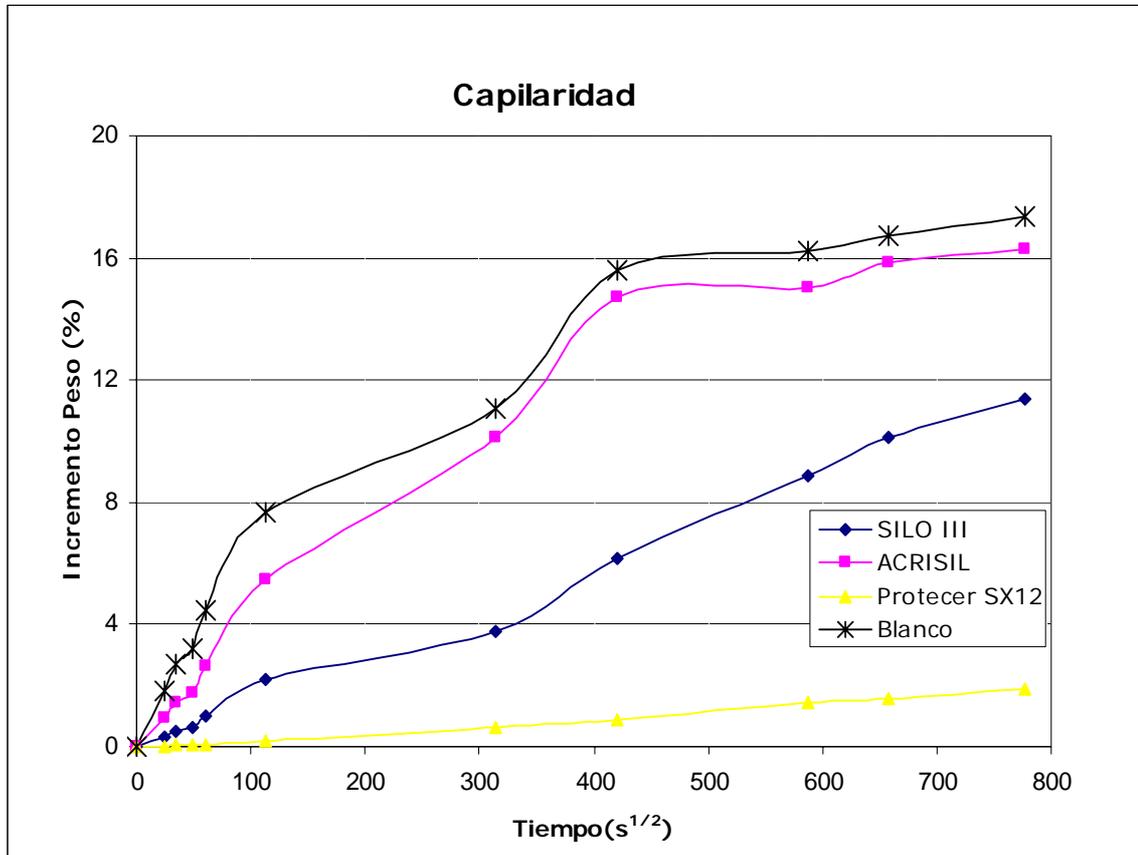
P Sec: Peso de la probeta seca.

En condiciones normales, en un edificio o yacimiento arqueológico el agua puede ser absorbida por los materiales en distintas circunstancias como: agua procedente de lluvia o condensaciones, donde los hidrófugos aplicados superficialmente sí podrían ser efectivos. Esta situación es la que se pretende simular en el ensayo en estudio. Si el agua es procedente del terreno, la aplicación de un tratamiento superficial puede ser perjudicial y habría que poner otro tipo de barreras.

Se puede observar en la figura 8 el efecto producido por los productos estudiados respecto a las probetas sin tratar.

Todos los productos estudiados dan una absorción progresiva durante periodos prolongados. El tratamiento con Acrisil ofrece unos resultados similares a las probetas sin tratar, y por tanto, no se alcanza una reducción de la velocidad de absorción de agua por capilaridad. A pesar del carácter consolidante-hidrofugante del Acrisil se observan las pérdidas de las propiedades hidrofugantes al entrar en contacto la probeta con el agua un periodo prolongado de tiempo.

En cuanto a los productos Silo 111 y Protecex SX-12 se observa como existe una disminución de la velocidad muy acusada, esta reducción de la velocidad es mayor con el Protecex SX-12, al menos en el tiempo estudiado.



**Figura 8.** Curvas de Capilaridad de probetas tratadas y sin tratar

#### IV.2.2.- Dureza Superficial.

El ensayo de dureza se basa en la resistencia que opone un material a ser penetrado por un cuerpo más duro. En el ensayo de dureza Brinell, que ha sido el aplicado en el estudio, una bola penetradora de cierto diámetro "D" (5mm en el ensayo), es presionada a la superficie de la probeta, usando una carga que se ha marcado con anterioridad (30 Kg en el ensayo). El diámetro de la penetración en el material (d) es medido después que la fuerza ha sido aplicada. El tiempo de aplicación inicial de la fuerza varía de 2 a 8 segundos.

El valor de la dureza Brinell se obtiene de dividir la fuerza aplicada en el ensayo por el área del casquete esférico grabado por el penetrador y el diámetro de la huella impresa en la probeta.

La dureza superficial de las probetas dependerá de la dureza intrínseca de los componentes del material, de la distribución y características del cementante y de la porosidad de esa zona superficial en cada probeta.

Con el objetivo de estudiar la relación entre la dureza y la porosidad global de las probetas, se ha representado en la figura 9 los puntos definidos por la porosidad y la dureza de cada probeta, tratadas y sin tratar (Blanco), y se han calculado la recta de regresión los puntos correspondientes al blanco.

En la figura 10 aparecen los valores medios por tipo de tratamiento y las probetas sin tratar (blanco).

Como se observa en ambas gráficas el tratamiento que mayor dureza confiere a los ladrillos es el Acrisil, que además casi todos los valores de las probetas se encuentran por encima de la línea de regresión dureza-porosidad de las probetas sin tratar. Esto es lógico, puesto que es el único que posee propiedades consolidantes, que intervienen en la dureza del material. En cambio, los dos productos hidrófugos, aunque en términos cuantitativos incrementan algo la dureza, no es significativo si se tiene en cuenta la disminución de la porosidad superficial por la impregnación del producto. En cualquier caso de los dos hidrófugos el mejor sería el Silo 111.

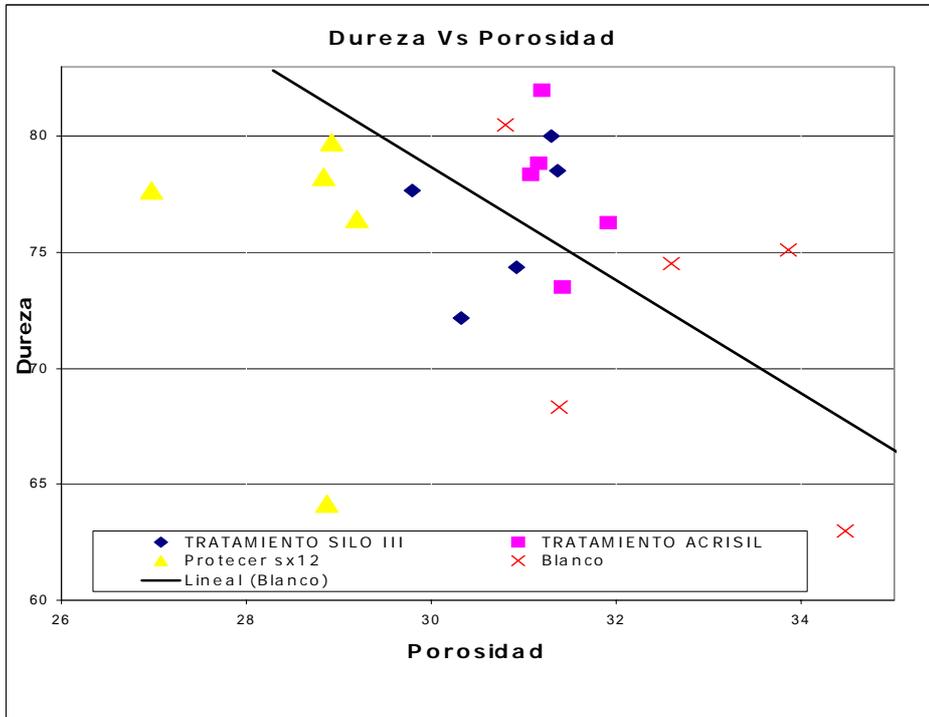


Figura 9. Gráfico Dureza/Porosidad. Línea Regresión sin tratar

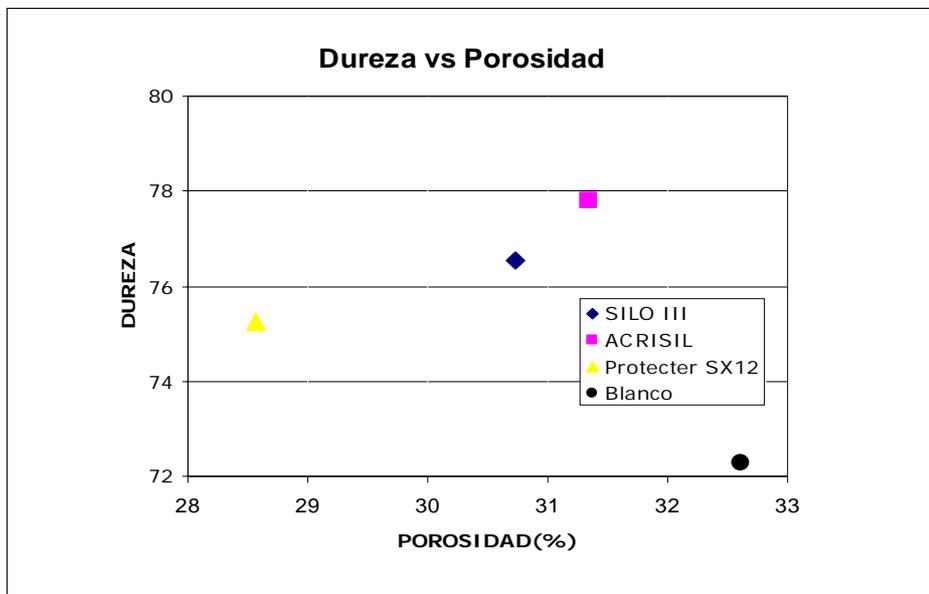


Figura 10. Valores medios (tratadas/sin tratar) de Dureza/Porosidad.

### **IV.3.- Resistencia a los Agentes de Alteración.**

#### **IV.3.1.- *Ensayo de Cristalización de Sales***

Este ensayo consiste en someter a las probetas a cristalizaciones y solubilizaciones sucesivas de una sal soluble. Se ha utilizado una solución de sulfato sódico al 10% y se han realizado ciclos formados por las siguientes fases:

- Fase de inmersión: 24 horas de inmersión en la solución
- Fase de secado: 22 horas de secado a 65°C en estufa  
2 horas de enfriamiento y pesada

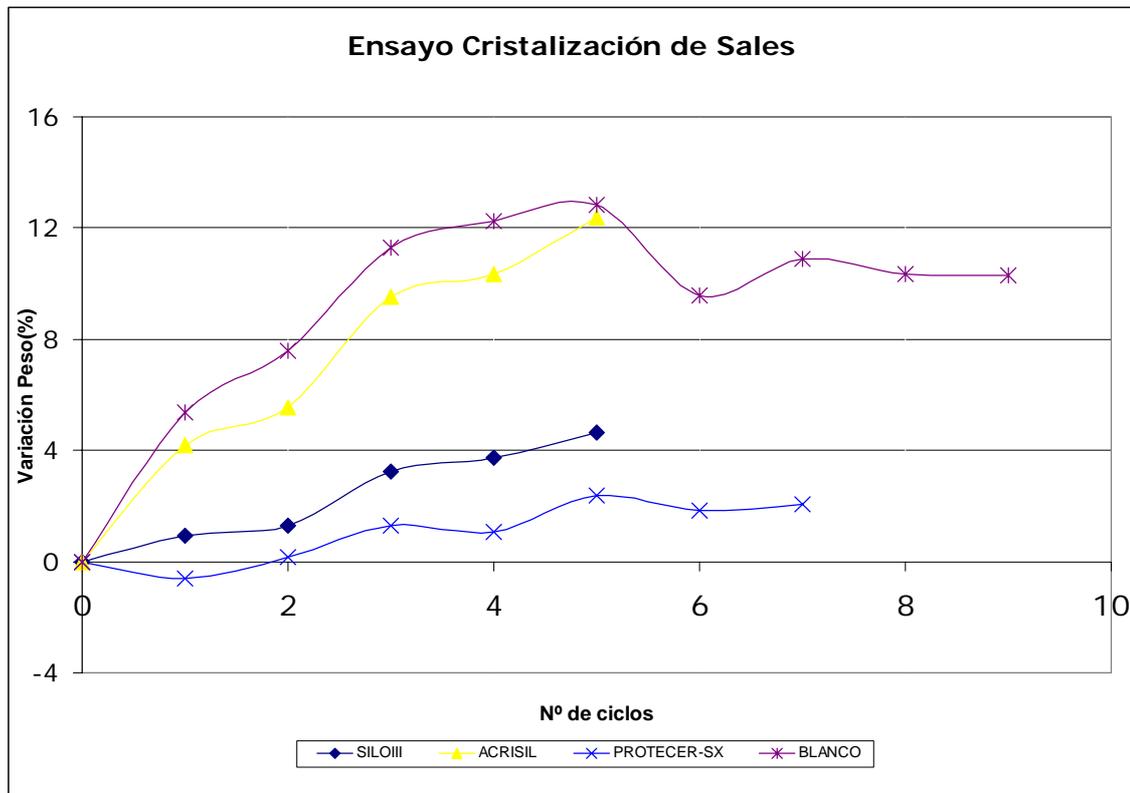
Se emplea esta sal porque puede cristalizar con 10 moléculas de agua dentro de su estructura cristalina, con lo que se produce un aumento de volumen de alrededor del 300%; de esta forma se provocan tensiones de tracción en el interior de los poros que causan la disgregación.

El ensayo se ha llevado a cabo con tres probetas de cada tipo, sin tratar y tratadas con cada producto. A lo largo del ensayo se efectúa el control del peso de las probetas en cada ciclo y de las alteraciones macroscópicas que van apareciendo. Cuando el grado de deterioro alcanzado por una probeta es grande se elimina del ensayo. Se han realizado un total de 10 ciclos.

Durante la fase de secado en estufa se produce la cristalización del sulfato en forma de sal anhidra; la velocidad de cristalización, debido a una temperatura relativamente elevada y a una gran concentración de sales, es alta, y la formación de los cristales tiene lugar tanto en la superficie externa (eflorescencias) como en los poros de los ladrillos. La forma, tamaño, accesibilidad, interconexión y distribución de estos poros determinan la intensidad y el tipo de alteración que va a sufrir el material.

En la figura 11 se representa la variación media de peso (en % respecto al peso inicial) para cada grupo de probetas a lo largo del ensayo.

Las probetas se fueron retirando del ensayo en el momento que las alteraciones superficiales eran importantes y se producían importantes pérdidas de material.



**Figura 11.** Evolución del peso (valores medios) en el ensayo.

A la vista de los resultados se puede decir que cada uno de los productos utilizados proporcionan un efecto diferente entre sí y respecto al material sin tratar.

Las probetas tratadas con Acrisil absorben una gran cantidad de solución salina (muy parecida a la del blanco) alcanzándose un incremento de peso medio máximo de un 12 %. Se observa como el producto proporciona una resistencia menor a las

probetas, ya que la pérdida de peso a partir del quinto ciclo es más rápida, y por tanto, el número de ciclos antes de la ruptura de la probeta disminuye respecto al blanco. Por tanto, el resultado de este producto en este ensayo es muy negativo puesto que no se consigue evitar la penetración de la solución gracias a las propiedades hidrófugas, pero además el efecto consolidante es completamente nulo, resistiendo menos que las probetas sin tratar. A priori, se espera que un producto con efecto consolidante como este, al mejorar la cohesión, retarde la alteración.

El producto Silo III y el Protecer SX-12 dan resultados muy parecidos. Estas probetas absorben menos cantidad de solución, siempre inferior al blanco, pero a partir del tercer ciclo en ambos tratamientos comienza una absorción, alcanzándose un incremento de peso medio máximo entre 2% y 5 % aprox. La continuación del ensayo refleja como estas probetas, una vez que ha penetrado la solución salina en su interior, presentan una menor resistencia a la alteración, siendo la pérdida de peso posterior más rápida y por tanto el número de ciclos antes de la alteración superficial de las probetas disminuye respecto a las sin tratar. Por tanto, de estos dos tratamientos, con ninguno se ha conseguido evitar de forma eficaz la penetración de la solución salina, disminuyendo además el número de ciclos antes de alterarse superficialmente.

De estos dos productos parece mostrar mejor comportamiento el Protecer SX, ya que absorbe menor cantidad de solución, causa por la cual, probablemente, retarde la alteración superficial respecto al Silo 111.

A priori se espera que los productos hidrófugos impidan el acceso de la solución al interior del ladrillo y con ello el de las sales. Un producto con buenas características hidrófugas y elevada penetración en el material será el que ofrezca mejores resultados frente a la cristalización.

Productos con propiedades hidrófugas mediocres o que disminuyen su propiedad con el contacto prolongado con la solución terminan por fallar. De igual modo productos con una baja penetración provocan alteraciones características, incluso en el caso de que tengan buenas propiedades hidrófugas, ya que siempre se produce el acceso de pequeñas cantidades de soluciones salinas, y al verse impedido o ralentizado el retorno de las sales a la superficie por el carácter hidrófugo de la capa tratada, la cristalización tiene lugar en el interior de la piedra, más concretamente en la interfase entre la zona tratada y aquella sin tratar. Es esta zona la que se debilita hasta que se produce la pérdida de la capa tratada, que es lo que ha sucedido con los tratamientos hidrófugos estudiados, ocurriendo a un número reducido de ciclos.

Este proceso se habrá visto favorecido, sin duda, por el hecho de que los ladrillos presentan una elevada porosidad (en torno al 36%), lo cual ha favorecido que tuvieran una gran capacidad de absorción.

Como conclusión de este ensayo, se extrae que ninguno de los productos estudiados en las probetas incrementan el número de ciclos antes de la ruptura de las probetas, es más, el efecto es inverso.

## V. CONCLUSIONES

En la Tabla 2 se resumen los resultados del comportamiento de los productos en cada uno de los ensayos.

**Tabla 3. Resumen de resultados**

Producto	Porosidad	Color	Desorción	Capilaridad	Dureza	Crist.Sales
SILO 111	-	++	+	+	+	-
ACRISIL	-	-	++	-	++	--
PROTECER SX 12	-	+	-	++	-	-

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

### **Compatibilidad**

Como conclusión en cuanto a la compatibilidad, se extrae que los tres tratamientos modifican considerablemente la porosidad, puede que disminuyendo la macroporosidad e incrementando la microporosidad. Respecto a la desorción el Protecet SX-12 presenta el peor comportamiento, puesto que una vez que penetra el agua en el interior, su poder hidrofugante impide que se evapore con facilidad, aumentando el contenido crítico de agua considerablemente. Este producto se podría recomendar siempre que se tenga absoluta garantía de que no penetrará agua por ninguna vía. El mejor comportamiento sería del Acrisil, sin embargo su poder hidrófugo es bastante bajo, como se verá posteriormente. El Silo 111 presenta un comportamiento intermedio. Respecto al color el mejor comportamiento lo presenta el Silo 111, pero esta propiedad, aún siendo importante es meramente estética.

Por tanto, en cuanto la compatibilidad, y considerando las propiedades estudiadas, puede que el Silo 111 sea el más aconsejable.

### ***Eficacia de los tratamientos***

Los ensayos realizados para la eficacia han sido capilaridad y dureza. En capilaridad el peor resultado lo ofrece Acrisil, y el mejor el Protecet SX-12, a pesar de que con el contacto continuado con el agua, finalmente absorbe. Esto ocurre más acentuadamente en el Silo 111, sin embargo parece que su evaporación posterior es más rápida.

En cuanto a dureza superficial el mejor es el Acrisil que es el único con poder consolidante. Le sigue el Silo 111.

Por tanto, a pesar de no tener el mejor comportamiento también podría ser el más aconsejable el Silo 111.

### ***Resistencia a los Agentes de Alteración***

Los resultados de de este ensayo son determinantes a la hora de tomar una decisión de que producto aplicar. El ensayo de cristalización de sales, que además es un híbrido con el de absorción de agua por inmersión, puesto que las sales penetran por medio de una solución acuosa, refleja en primer lugar que el comportamiento de Acrisil es pésimo tanto como hidrófugo como por su poder consolidante. De los otros dos, teniendo en cuenta que lo que se valora es el comportamiento hidrófugo, el Protecet SX-12 presenta mejor comportamiento al principio del ensayo puesto que evita que penetre la solución. Una vez que penetra la solución, en ambos productos, Protecet y Silo 111, la capa tratada impide la transpiración del ladrillo y cristalizan las sales en la interfase, desprendiéndola finalmente.

En este proceso ha influenciado directamente la elevada porosidad del ladrillo, que favorece por un lado la absorción de solución salina, y por otro lado una abundante

cristalización de sales, fenómeno especialmente peligroso, cuando se produce en los posibles microporos existentes en la interfase con la capa tratada, o en la propia capa que puede haber visto incrementada su microporosidad por la impregnación del tratamiento. De hecho todos los tratamientos han mostrado las mismas morfologías de alteración, desprendimientos a modo de desconchaduras de la capa tratada.

En cambio los ladrillos sin tratar han mostrado en todo el ensayo la formación de eflorescencias salinas a modo de veladuras superficiales que no perjudican la integridad del ladrillo, mostrando una buena permeabilidad y velocidad de evaporación.

Como conclusión final se extrae que el comportamiento de los hidrófugos estudiados, al no impedir por completo la penetración de soluciones acuosas, al menos cuando se encuentran en contacto prolongado, junto a que posteriormente ralentizan el proceso de evaporación favoreciendo la cristalización de sales en el interior del ladrillo, hace que en principio sea desaconsejable su aplicación ya que los ladrillos sin tratar han mostrado mejor comportamiento frente a la alteración. En todo caso podría aconsejarse la aplicación de un producto consolidante, previamente estudiado, que no modifique las propiedades hídricas de los ladrillos pero si que los haga más resistentes a la alteración.

**ANEXO: Imágenes de las Probetas en el Ensayo de Cristalización de Sales**



**Fig.12.** Probetas sin Tratar al final del ensayo. Solo eflorescencias



**Fig. 13.** Probetas tratadas con ACRISIL. 5 ciclos. Desconchaduras



**Fig. 14.** Probetas tratadas con Silo 111. Final ensayo. Desconchaduras



**Fig. 15.** Silo 111. Detalle pérdida capa tratada. Desplacados.



**Fig. 16.** Probetas Protector SX-12. 5 ciclos. Pequeñas desconchaduras



**Fig. 17.** Probetas Protector SX-12. Final del ensayo. 7 ciclos.

---

**Estudio de Evaluación de Tratamientos**

Jesús Espinosa Gaitán

Geólogo.

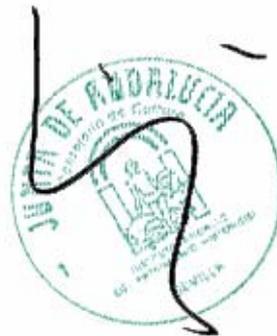
Empresa Pública de Gestión de Programas Culturales

**Colaboración:** Departamento de Química Ambiental  
Escuela de Ingenieros (USE)

---

Sevilla, 7 de Marzo de 2008

VºBº el Jefe del Centro de Intervención en el  
Patrimonio Histórico



Fdo.: Lorenzo Pérez del Campo

