

## **COMPORTAMIENTO ANTE ENSAYOS DE ENVEJECIMIENTO DE “MORTERO ALHAMBRA” APLICADO EN LA RESTAURACIÓN DE YESERÍAS DE LA ALHAMBRA. GRANADA. ESPAÑA.**

**Ramón Francisco Rubio Domene**

Jefe del Taller de Restauración de Yeserías y Alicatados del Patronato de la Alhambra y Generelife. Granada.

### **Abstrac**

We are aiming to verify the behaviour of mortar Alhambra. This mortar is being used for volumetric reinstatements made during the restoration process of the plastering in the Nasrids Palace in the Alhambra, located in Granada (Spain). The use of this mortar is due to the fact that during the last 8 centuries several restorations have been made in the plastering of the Alhambra. This restorations have been made without any judgement and even creating fake plastering. In the last restorations, these plaster-based mortars with different added minerals and resins are being used. Once the volumetric reinstatement is done and the corresponding patinas are applied, these added substances can be identified by the exposure to ultraviolet radiation.

### **Resumen**

Se pretende comprobar el comportamiento de Mortero Alhambra, que en la actualidad se está utilizando en las reintegraciones volumétricas que se realizan en las restauraciones de las yeserías de los palacios nazaríes de la Alhambra de Granada, España. Su uso es debido a que a lo largo de los 8 siglos de historia del monumento de la Alhambra se han venido realizando restauraciones sobre las decoraciones de yeserías con el mismo material de yeso sin criterio diferenciador alguno, llegando a crear falsos históricos. En las últimas restauraciones, se están utilizando estos nuevos morteros con base de escayola con diferentes añadidos de sustancias minerales seleccionadas, los cuales una vez realizada la reintegración volumétrica y aplicadas sus pátinas correspondientes, permiten ser identificados mediante exposiciones a radiación ultravioleta.

#### **1. Características del mortero**

El trabajo de más de 20 años sobre las yeserías de la Alhambra, y tras largos procesos de investigación en laboratorio y ensayos en el taller sobre distintos materiales, se presenta un nuevo mortero de restauración. Este Mortero Alhambra en este caso “base yeso” tiene como base el sulfato cálcico hemihidratado  $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ , conocido comercialmente como escayola E-35 cuyo contenido mínimo es de 80% de hemihidrato en peso, obtenido por tamizado en hornos donde los gases no entran en contacto con la materia. A esta base de escayola se le han añadido diferentes sustancias minerales y copolímeros seleccionados en la proporción de 200/1 v/v, dando el resultado de un mortero levemente modificado, por lo que esperamos que el comportamiento sea similar a una escayola tradicional.

#### **2. Objetivos del estudio**

La solubilidad estimada del sulfato cálcico dihidratado en agua es de 2,23 g/l a 0 °C, y de 2,57 g/l a 50 °C. Por tanto el objetivo de este estudio es verificar como se comporta este nuevo mortero ante la acción del agua, y si las sustancias añadidas a la escayola comportan alguna

ventaja o inconveniente al mortero tradicional, alterando o cambiando la estructura porosa de la escayola y su comportamiento.

### 3. Elaboración de probetas

Los ensayos se han realizado sobre probetas de escayola de la clase E-35 amasado por saturación en agua.

Para reducir variables que podrían surgir según el agua o la cantidad de sulfato cálcico amasado por cada probeta de yeso, se ha amasado una única plancha con el “Mortero Alhambra”, la cual una vez seca se ha cortado en primas de 5 cm de lado, según normativa habitual (Esbert et al. 1985). Se cortaron tres probetas para los tratamientos de absorción y desorción, y otras tres para el tratamiento de ciclos de humedad-sequedad. Este procedimiento es el aconsejado por las normas internacionales (RILEM, 1980; ISRM, 1981; ASTM, 1988; NORMAL italianas y UNE, 1985 españolas) que sugieren al menos tres paralelepípedos o cubos por muestra y ensayo.

Se han tomado por tanto cuatro probetas por ensayo, siendo la primera solamente con escayola, y las otras tres restantes de mortero alhambra- base yeso.

#### Relación de probetas

En lo sucesivo, las probetas de escayola se reconocerán por la siguiente signatura que las identificará en los diversos ensayos;

PROBETAS	CORRESPONDENCIA CON EL MORTERO
E	Escayola
MA (I)	Mortero Alhambra (I)
MA (II)	Mortero Alhambra (II)
MA (III)	Mortero Alhambra (III)

### 4. Ensayos hídricos y de envejecimiento

Tomando como referencia las experiencias de de la Torre (1995), y Pavía Santa María, (1994), Rubio (2002), este apartado recoge una serie de ensayos con la finalidad de conocer el comportamiento ante la acción del agua, del Mortero Alhambra-Base Yeso.

Aunque existe una gran variedad de ensayos, dados los comportamientos y estabilidad del material de escayola, y su deterioro al contacto con el agua, se han estudiado las posibles pruebas de ensayos para lo cual nos hemos basado en normativas de Esbert et al. (1984 y 1985), Ordaz et al. (1984) y RILEM (1980). Se han elegido los siguientes ensayos:

- 1.- Absorción libre de agua
- 2.- Desorción libre de agua
- 3.- Ciclos de Humedad-sequedad

Los dos primeros valoran el comportamiento del material frente al agua, mientras que el tercero es un ensayo de envejecimiento acelerado. Estos ciclos intentan valorar el comportamiento del material ante el deterioro, reproduciendo la acción del agua en ciclos que intensifican las condiciones naturales de las obras de escayola. Hay que destacar que estos ciclos de envejecimiento se conocen por los realizados en el trabajo de Tesis Doctoral “Yaserías de la Alhambra: Historia, Técnica y Conservación” (Rubio 2002), y ante estos resultados, ha sido necesario tener en cuenta la debilidad de este material y su avidez por el agua (higroscopicidad).

## 5. Conceptos generales de la metodología

En cada ensayo se controla la variación del contenido en agua de las probetas respecto al tiempo. Este control se lleva a cabo mediante pesadas sucesivas a intervalos determinados. Se suele llamar  $W_i(t)$  al contenido de agua (en peso) de una probeta  $i$  en el instante de tiempo  $t$ . Se expresa en % respecto al peso inicial de la probeta (peso seco después de su consolidación).

$$W_i(t) = \left( \frac{M_t - M_o}{M_o} \right) \times 100$$

donde  $M_t$  = masa en el instante de tiempo  $t$ ; y  $M_o$  = masa inicial (peso seco después de su consolidación).

La cantidad de agua absorbida por un material se expresa también como :

$$m = A \cdot t^{1/2}$$

lo que implica que, en cierta manera, la cantidad de agua ( $m$ ) que penetra en un yeso por  $m^2$  de superficie, es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo transcurrido, siendo  $A$  una constante.

La absorción libre de agua pretende medir la “avidez” de los sólidos porosos por el agua, la velocidad de absorción del agua y el comportamiento de esta velocidad en el tiempo. La cantidad total de agua absorbida viene controlada por el volumen poroso total del sólido y su grado de conectividad, mientras que la cinética de absorción depende fundamentalmente de la distribución del tamaño de acceso de poro. Este ensayo por tanto, permite cuantificar la capacidad de absorción del material de escayola, a la vez que nos da información de las características de su sistema poroso tras haberse añadido las nuevas sustancias. Los valores obtenidos dependen en cierta medida de las variables de presión atmosférica, temperatura y HR. Los resultados de esta experiencia se expresan en los gráficos de la figura I, en las que en abscisas se representan la raíz cuadrada del tiempo en minutos ( $t^{1/2}$ ), y en ordenadas el porcentaje de aumento de peso de la probeta, es decir:

$$\frac{\text{Peso húmedo en el tiempo} - \text{Peso seco después de consolidado}}{\text{Peso seco después de consolidado}} \times 100$$

que se denomina  $W_i(t)$ .

Experimentalmente, se observa que la variación de  $W_i(t)$  respecto a  $t^{1/2}$  en los primeros momentos del ensayo es lineal. Calculando la pendiente de esta recta obtenemos el “coeficiente de absorción Hídrica” o “velocidad de absorción ( $V_{abs}$ )”, que es característico de

cada tipo de material de escayola y “Mortero Alhambra”. A partir de un determinado valor de t, en todos los casos se produce una variación de la pendiente, llegando a hacerse la curva asintótica a un valor de  $W_i(t)$ , que prácticamente coincide con  $W_{max}$  (o de saturación).

La desorción libre de agua mide la velocidad de evaporación en condiciones ambientales de las muestras saturadas. Resulta de extraordinario interés en la práctica, dado que nos permitirá predecir si el material de “Mortero Alhambra” secará con rapidez o permanecerá húmedo largo tiempo, lo que tiene una influencia decisiva en los procesos de alteración. Los resultados se expresan en los gráficos de la figura II, mediante gráficas similares a los de la experiencia anterior, en ordenadas se representa la pérdida de peso por evaporación  $W_i(t)$ , y en abscisas el  $t^{1/2}$ :

$$\frac{\text{Peso saturado} - \text{Peso en el tiempo}}{\text{Peso saturado}} \times 100$$

Los resultados de las pruebas de humedad-sequedad permiten observar el comportamiento de las muestras amasadas con “Mortero Alhambra” sometidas a ciclos de absorción de agua y secado en estufa, y comprobar si al final de cada ciclo existe pérdida de material de escayola. Interesa, como prueba de envejecimiento acelerado, ver el comportamiento de este “Mortero Alhambra-Base Yeso” a largo plazo en ciclos sucesivos de mojado y secado, y por tanto la eficacia y durabilidad de los morteros aplicados. Los resultados se representan en el gráfico de la figura III, expresados en tablas de peso.

Ensayos Absorción libre de Agua. Se pretende ver cuando la escayola alcanza su máxima saturación de agua, y comparar como las probetas amasadas con mortero alhambra experimentan el mismo comportamiento o modifican su respuesta ante el agua.

Para la realización de esta prueba se han escogido tres probetas de Mortero Alhambra marcadas con MA (I), (II) y (III), más una de escayola. El ensayo ha consistido en sumergir las muestras en agua destilada durante un periodo de 30 días, durante los cuales se han realizado medidas de peso comparativas del aumento de peso en ciclos de tiempo que se han ido espaciando progresivamente partiendo desde 1 minuto, 4, 9, 16, 25, 1 hora, 2, 8, 24, 2 días, 3, 4, 1 semana, 2, 14 días, 3 semanas, hasta 30 días, espacio de tiempo en el que se han tomado 17 registros.

Desorción libre de Agua. Para este ensayo se han utilizado las mismas muestras utilizadas en el ensayo de Absorción libre de agua. Una vez saturadas de agua durante los 30 días y tomado su peso, se han puesto a secar a una temperatura constante de 18-20 °C y se han ido tomando medidas de peso en 16 registros a intervalos de tiempo, comenzando desde 4 horas, 8, 12, 24, 2 días, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 y 15 días.

Ciclos de Humedad-sequedad. Con este ensayo se pretende obtener información del comportamiento de la escayola al deteriorarse ante la acción del agua fluctuante. Para la realización de esta prueba se han seleccionado otras tres muestras de Mortero Alhambra con las siglas MA (I), (II) y (III), más la comparativa con una probeta de escayola. Cada ciclo de fluctuación consta de dos fases:

1.- Fase de inmersión en agua a una temperatura aproximadamente de 18 °C y en un periodo de 16 horas.

2.- Fase de desecación forzada en estufa durante 6 horas, y a una temperatura de 60 °C.

Se han realizado 20 ciclos dejando enfriar durante dos horas las probetas después de la fase de desecación y pesándolas posteriormente para contabilizar la pérdida de material, para posteriormente sumergirlas nuevamente.

Las operaciones de pesado de muestras se han realizado en balanza de precisión Cobos Precisión CM-360-SX, con rango de precisión Max= 300g Min= 0,5 g d=e = 0,01g. En la fase de secado en estufa, se han realizado en estufa eléctrica RELPA Mod. Drying Oven, con rango de 0 a 300 °C.

Estos ensayos se han realizado utilizando los talleres y laboratorio del Taller de Restauración de Yeserías y Alicatados del Patronato de la Alhambra y Generalife de Granada.

## **6. Ensayos de Absorción de Humedad**

Sumergidas las probetas durante treinta días en agua hasta llegar a su saturación, se han obtenido 17 registros de los distintos intervalos de tiempo en que se han ido pesando dichas probetas. Los datos generados, se han representado en las gráficas que ha continuación serán comentadas, representando siempre en la misma gráfica la probeta en escayola y las tres probetas en mortero alhambra.

Como vemos en las curvas generadas en las gráficas de comportamiento, tanto la probeta de escayola como las de mortero alhambra tienen el mismo recorrido, siguiendo un mismo comportamiento. De los 17 registros tomados durante el mes que han permanecido inmersas en agua, se observa que en los primeros 7 registros anotados en un espacio de tiempo de 2 horas, absorben la mayor parte de su agua de saturación con un 85,18% de peso del total de la ganancia, siendo el resto del total de su ganancia de peso de 14,81% adquirido progresiva y muy lentamente en el tiempo restante de 718 horas, hasta alcanzar su saturación final.

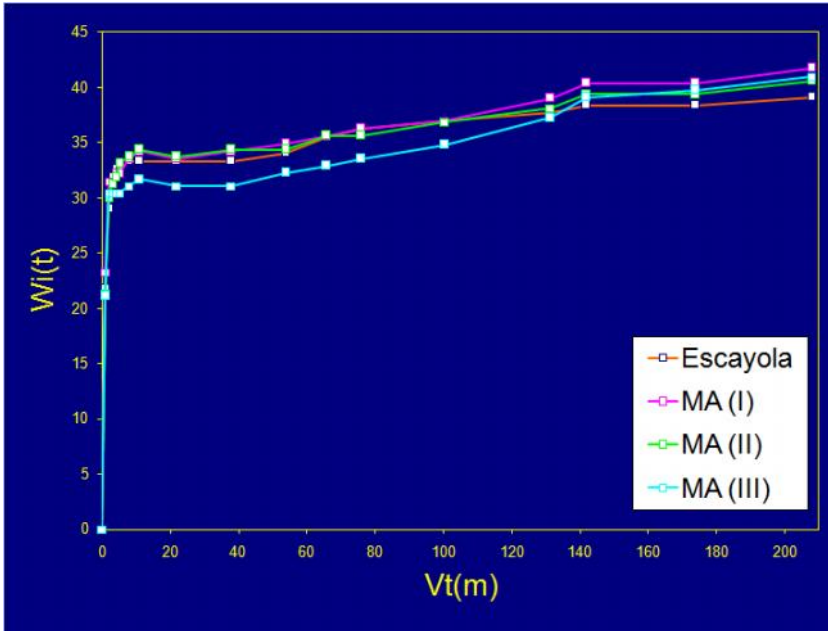
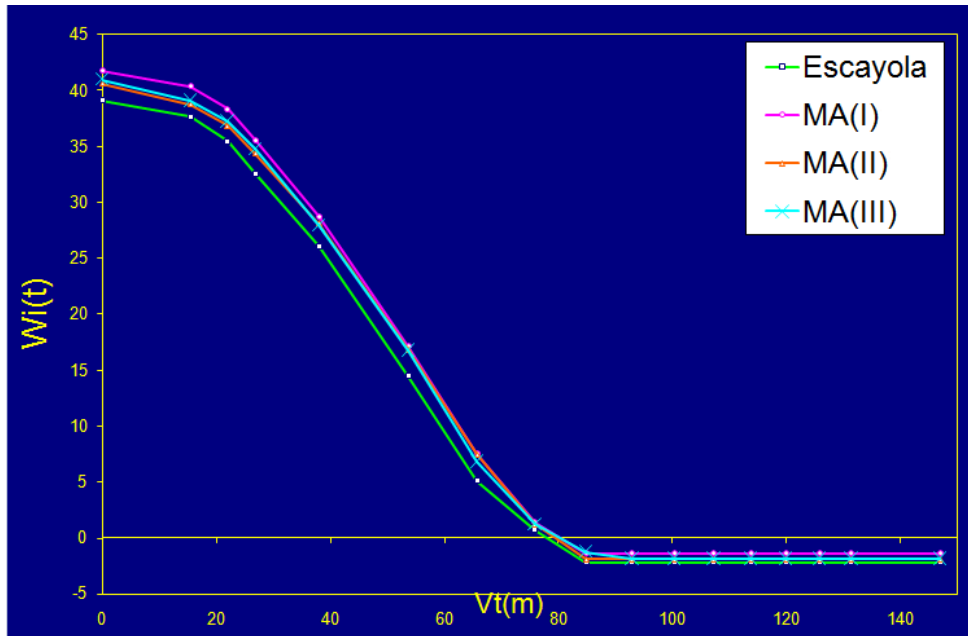


FIGURA I.- Curvas de Absorción de agua

## 7. Ensayos de Desorción de Agua

Como vemos en las curvas generadas en las gráficas de comportamiento, tanto la probeta de escayola como las de mortero alhambra también tienen los mismos recorridos. De los 16 registros tomados durante los 15 días en los que se han registrado sus pérdidas de humedad, se observa que en los primeros 2 registros anotados en un espacio de tiempo de 8 horas, comienza una pérdida rápida de humedad con un 8,77% de peso del total, siendo muy brusca la pérdida de humedad desde el segundo registro a partir de las 8 horas hasta las 120 horas de sus 5 días en su octavo registro, donde pierde el 100% de su humedad.

Si observamos las curvas de la gráfica, podemos ver que en su último registro después de los 15 días, su curva queda representada por debajo del valor cero del eje, el punto en el que debería finalizar al haber comenzado en el valor cero. Lo que indica que al registrar en valor negativo, estas probetas en su proceso de absorción y haber permanecido durante 30 días en agua, han experimentado una ligera pérdida de material de yeso. Esta pérdida además se puede observar en las diferentes caras de las probetas donde ha desaparecido la materia más fina y soluble de la escayola.



**FIGURA II.-** Curvas de Desorción de agua

### 8. Ciclos de humedad-sequedad.

Los datos generados en este ensayo permiten la observación del comportamiento de las probetas de escayola y de mortero alhambra, sometidas a ciclos de absorción de agua y secado en estufa para más tarde comprobar si existe pérdida de material. El análisis de estas gráficas y el estudio de las curvas, permite determinar que en todos los casos se observa que al final de los 20 ciclos, la última medición tomada indica un número más bajo que el tomado inicialmente sobre cada muestra

Al observar estos datos se puede afirmar que la medida en peso tomada al inicio del ensayo es mayor que la última pesada realizada después de los 20 ciclos realizados. Por tanto existe una pérdida de peso en cada una de las probetas sometidas a ensayo.

Esta pérdida es evidente que se produce en la mayoría de las probetas, aunque no contemple un valor importante en el porcentaje del peso final. En el campo de la restauración es interesante el determinar la estabilidad del Mortero Alhambra-Base Yeso, y si su comportamiento y envejecimiento es similar al de la escayola.

A continuación se relaciona en la siguiente tabla, la pérdida de peso en tanto por ciento que han experimentado cada una de las probetas de Mortero Alhambra, en los ensayos de humedad-sequedad, así como la gráfica de comportamiento.

CICLOS HUMEDAD-SEQUEDAD			
MUESTRA	PESO	PESO 20 CICLOS	% PERDIDA DE PESO
ESCAYOLA	136	134	1,48
MA (I)	144	143	0,70
MA (II)	149	147	1,35
MA (III)	151	148	1,99

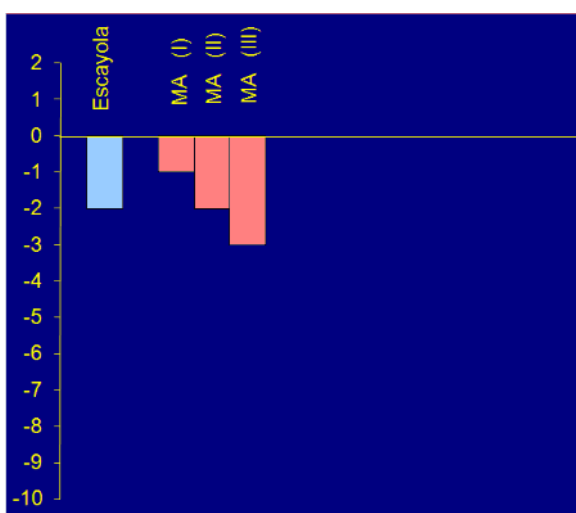


FIGURA III.- Tabla de ciclos de Humedad-Sequedad.

## CONCLUSIONES

### I. Pruebas de Absorción

La observación conjunta de todas las líneas permite ver los comportamientos de este mortero alhambra. Se observa una línea ascendente muy brusca donde casi llega a formarse un ángulo recto, comportamiento que corresponde a la naturaleza del sulfato cálcico en la variedad del hemihidrato  $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ , con una gran avidez por el agua ayudada por su estructura porosa. Como resultado y conclusión final sobre el comportamiento del mortero alhambra, se puede decir que no se modifican sus características de absorción de agua, rapidez o cantidad.

### II. Pruebas de Desorción

Al igual que ocurre con las pruebas de Absorción, donde el comportamiento del mortero alhambra queda unido al de la escayola, en estas pruebas de desorción, se comporta de igual manera que la escayola, y no modificando la estructura y comportamiento del sulfato cálcico en su sistema poroso en el momento de liberación de humedad. Y aunque la textura pueda dar indicios de un material más compacto, este también experimenta una pérdida de peso en su masa.



### III. Pruebas de Humedad-sequedad

Tras finalizar este ensayo, en la mayoría de las probetas, se evidencia una pérdida de material de escayola que se deja ver en los fondos de las bandejas de agua donde se han sumergido, quedando depósitos de partículas muy finas. Esta pérdida de material se produce con la erosión de las partes de la masa de la escayola más blandas, lo que provoca su desaparición, es decir se disuelve el  $\text{SO}_4 \text{ Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  permaneciendo las impurezas hasta que estas quedan sueltas.

En cuanto a la textura observamos que la probeta de escayola presenta una superficie más porosa y erosionada en contraposición del resto de probetas de mortero alhambra, que se presenta más compactas sin apenas poros de disolución.

En cuanto al color, a simple vista levemente hay diferencia siendo la escayola de un blanco algo más cálido, mientras que las otras tres probetas tienen un blanco algo más frío o grisáceo.

Como conclusión final, se puede decir que las variaciones de comportamiento de Mortero Alhambra-Base Yeso en mezclas de 200/1, son tan mínimas con respecto a la escayola tradicional, que su uso en obras de restauración no representa variación alguna.