



Tópico 4 – Nº 43

INTEGRACIÓN DE DATOS DE TERMOGRAFÍA DE INFRARROJOS Y OTRAS TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS EN DETECCIÓN DE HUMEDADES Y SALES

MIGUEL GOMEZ-HERAS (1,2,3), SOLEDAD GARCIA MORALES (1,2), RAFAEL FORT (1,3)

(1) *CEI Campus de Excelencia Internacional de Moncloa (UPM, UCM, CSIC)*

(2) *ETS Arquitectura de Madrid (UPM)*

(3) *Instituto de Geociencias (CSIC-UCM)*

m.gomez@upm.es

RESUMEN

La humedad es una de las principales preocupaciones en relación con la conservación del patrimonio arquitectónico. La humedad cataliza reacciones químicas y favorece el crecimiento biológico. Además, el agua puede estar cargada en sales, que se transportan en solución y pueden generar daños por cristalización e hidratación - deshidratación. La humedad en muros y otras estructuras solo se puede medir directamente con métodos "gravimétricos". Estos métodos, necesitan la extracción de una pequeña muestra, por lo que, a veces, en el contexto de propiedades patrimoniales, es conveniente considerar el uso de Técnicas no Destructivas, como los sensores eléctricos o la termografía de infrarrojos para la determinación de los focos de humedad. Estos métodos necesitan una interpretación pues hay otros factores como el contenido de sales o la porosidad que afectan a sus lecturas. En este trabajo se presenta un experimento de laboratorio en el que se estudian materiales pétreos con distintas porosidades saturados en agua y, en un caso, con sales mediante Medidores de Humedad Portátiles y Termografía de Infrarrojos durante el proceso de evaporación. Esto se realiza como paso previo para establecer un protocolo de utilización conjunta de sensores eléctricos y termografía de infrarrojos para la evaluación de humedades en elementos patrimoniales reales.

Palabras-Clave: *Humedades, sales, deterioro de la piedra*

1. INTRODUCCION

La humedad en un paramento o cualquier otro elemento arquitectónico se puede medir directamente a través de los denominados "métodos gravimétricos" [1], esto es, extrayendo pequeñas muestras de perforaciones de los muros y midiendo el contenido en humedad pesando la muestra antes y después de su secado. Por otro lado, la humedad se puede medir indirectamente midiendo alguna propiedad física (como la temperatura o la resistencia eléctrica) que pueda relacionarse con el contenido en humedad del material estudiado.

La principal ventaja de los métodos gravimétricos es que las medidas son precisas y no necesitan interpretación, dado que se mide la humedad real de las muestras. Sin embargo, aunque esta sea pequeña, estos métodos requieren una toma de muestras, lo que no siempre puede ser posible en edificios patrimoniales. Tampoco pueden realizarse de manera continuada o repetitiva, por lo que no permiten monitorizar procesos que varíen con el tiempo como el secado. Además, debido a la necesidad de extraer una muestra, se suelen realizar de manera puntual, no permitiendo realizar cartografías detalladas de la distribución de las humedades.



La interpretación de los métodos indirectos puede conducir a imprecisiones con respecto a lo que se obtiene a partir de un método directo, pero los métodos indirectos tienen la ventaja de estar basados en técnicas no destructivas y, al no ser invasivas permiten monitorizar procesos en el tiempo.

Dos de los principales métodos no invasivos para detectar y/o cuantificar las humedades son la Termografía de Infrarrojos y los métodos eléctricos como los Medidores de Humedad Portátiles (tipo Protimeter) o la Tomografía de Resistividad Eléctrica. Estos métodos se basan en que un material húmedo tiene distintas propiedades térmicas (en el primer caso) o eléctricas (en el segundo) que un material seco.

Cuando se realiza Termografía de Infrarrojos de un material, obtenemos la temperatura superficial de este material a partir de su emisión espectral en la zona del infrarrojo, asumiendo que este material se comporta como un “cuerpo negro”. Es decir, como si el material se comportase como un objeto ideal que absorbe toda la energía que incide sobre él sin reflejarla ni transmitirla y, por otro lado, emite radiación electromagnética con un máximo en una longitud de onda que es inversamente proporcional a su temperatura. Este es el principio en el que se basa el cálculo de la temperatura realizado por una cámara de infrarrojos.

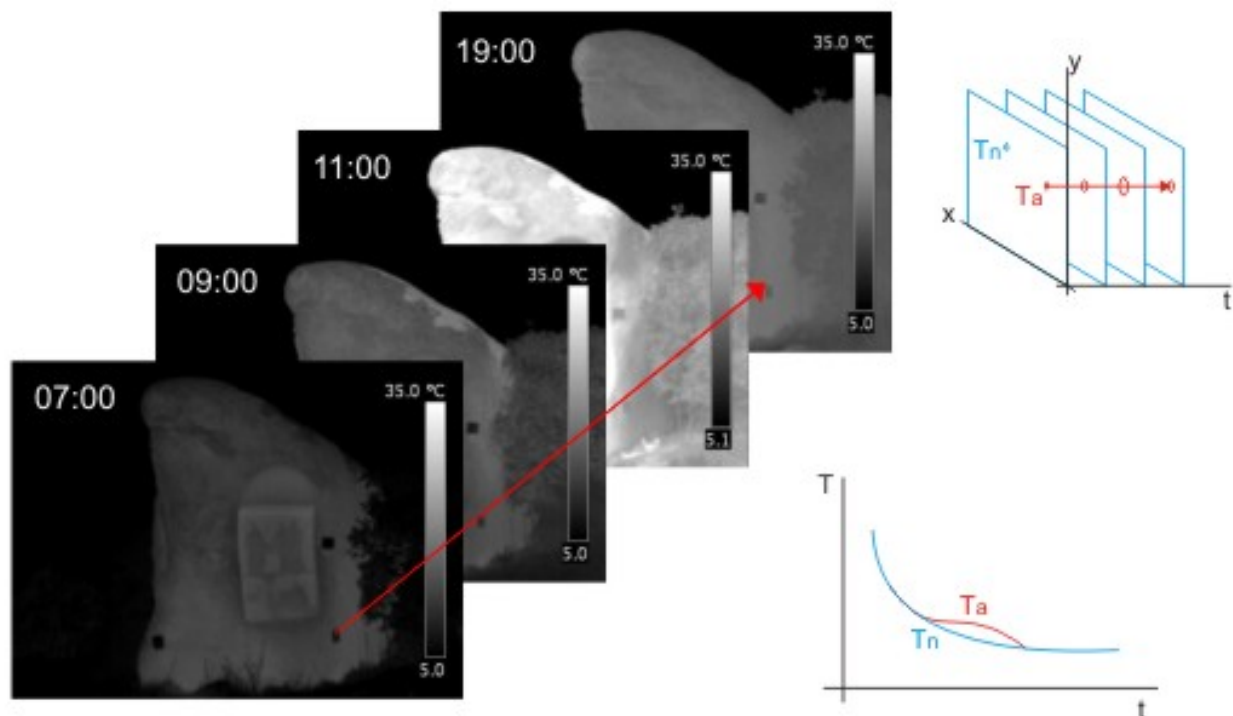


Figura 1 – Ejemplo de secuencia de imágenes termográficas de una estela romana en diferentes estadios de calentamiento durante un día. La evolución de temperatura (T) con el tiempo (t) variará de una zona “normal” (Tn) con respecto a una “anómala” (Ta), por ejemplo por la presencia de humedades.

El grado de desviación de un material con respecto al ideal del cuerpo negro es la emisividad, así que en una imagen obtenida directamente de una cámara de infrarrojos, dos áreas con aparente diferente temperatura pueden corresponder tanto a diferentes temperaturas reales como a diferentes emisividades. En el caso del agua y la piedra, el agua tiene una emisividad de 0,98 mientras que los materiales pétreos varían entre 0,89 y 0,96 [2]. Además de las diferencias aparentes de temperatura que pudiesen resultar de esta diferencia de emisividad, en un material húmedo, cuando se produce evaporación del agua la temperatura de la zona húmeda disminuye



por el calor que se emplea en el proceso de evaporación del agua y, por tanto, las zonas húmedas se observan más frías. Además, el mayor calor específico del agua favorece que las zonas húmedas se calienten más lentamente que las zonas secas. El contenido en sales en las zonas húmedas puede también variar la respuesta térmica de la zona inspeccionada.

Los métodos eléctricos se basan en la mayor conductividad eléctrica que una zona húmeda tiene con respecto a una seca. Los principales métodos eléctricos usados en la evaluación de humedades en el patrimonio arquitectónico son los Medidores de Humedad Portátiles y la Tomografía de Resistividad Eléctrica. Entre los primeros aparecen aquellos que dan un valor de la humedad a partir de la lectura de la resistividad entre dos puntas de metal a una distancia fija que se aprietan contra el material y los que miden valores relativos de humedad a partir de sensores de capacitancia. Aunque este tipo de equipos se usa habitualmente en fábricas de piedra o ladrillo, se desarrollaron inicialmente para la medición de las humedades en madera. Así estos equipos miden en una escala arbitraria o en porcentaje de humedad equivalente en madera (%WME).

La Tomografía de Resistividad Eléctrica integra los datos de resistividad obtenidos a partir de una línea de sensores, ofreciendo un “perfil” de lecturas de resistividad en profundidad. Sin embargo, a día de hoy, estos métodos muestran un grado de incertidumbre, dado que hay otros factores como el contenido en sales o la porosidad que modifican las propiedades eléctricas.

Así, aunque los métodos indirectos muestran grandes ventajas, es importante trabajar en el diseño de protocolos para la interpretación de sus resultados. En esta línea de trabajo aparecen los métodos que podríamos llamar “activos”, frente al uso tradicional “pasivo, que no interfiere en el edificio mientras se mide. Los métodos activos “excitan” de alguna manera la zona de medida para generar una respuesta diferencial y amplificar el resultado de la medida. En el caso de la Termografía de Infrarrojos es común calentar la zona de medida o realizar un procesado de las imágenes a partir de secuencias de imágenes tomadas mientras el edificio se calienta debido a la insolación para analizar la respuesta diferencial de zonas “normales” y “anómalas” [p.ej. 3]. En la Fig. 1 se muestra un ejemplo de una serie de imágenes de infrarrojos a partir de las cuales se puede hacer una matriz (x, y, T, t) en la que se observe como varía la temperatura (T) en cada punto (x, y) con el tiempo (t).

En el caso de los métodos eléctricos se han realizado algunos experimentos para mejorar la interpretación de los Medidores de Humedad Portátiles mediante el uso combinado de sensores de resistividad y capacitancia [4] y para mejorar las lecturas de la Tomografía de Resistividad Eléctrica mojando artificialmente para incrementar la respuesta de diferentes áreas de un muro [p.ej. 5].

Este artículo presenta un experimento de laboratorio en el que se estudian materiales pétreos con distintas porosidades saturados en agua y, en un caso, con sales mediante Medidores de Humedad Portátiles y Termografía de Infrarrojos durante el proceso de evaporación. Esto se realiza para analizar la información que cada una de estas técnicas nos aporta sobre el grado de humedad del material y sirve como paso previo para establecer un protocolo de utilización conjunta de sensores eléctricos y termografía de infrarrojos para la evaluación de humedades en elementos patrimoniales reales.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se seleccionaron tres tipos de roca para su ensayo, que se denominaron TU, LE y VI. TU es una bioesparita de grano muy grueso y una porosidad accesible al mercurio de aproximadamente 45%, LE es una biomicrocristalina con porosidad de aproximadamente 40% y VI una subarcosa con abundante contenido en arcillas y una porosidad de aproximadamente 30%. Se seleccionó este grupo de muestras por su diferente porosidad y variabilidad composicional.



Se tomó un cubo de 5 cm de arista de las muestras con mayor y menor porosidad TU y VI, mientras que de la muestra LE se tomaron dos cubos, uno de ellos para cargarlo con sales. Se sumergieron los cubos de Tu, LE y VI en agua durante 48 horas, mientras que otro cubo de la muestra LE se sumergió 48 horas en una solución saturada en sulfato sódico hidratado (esta probeta se denominó LE-S).

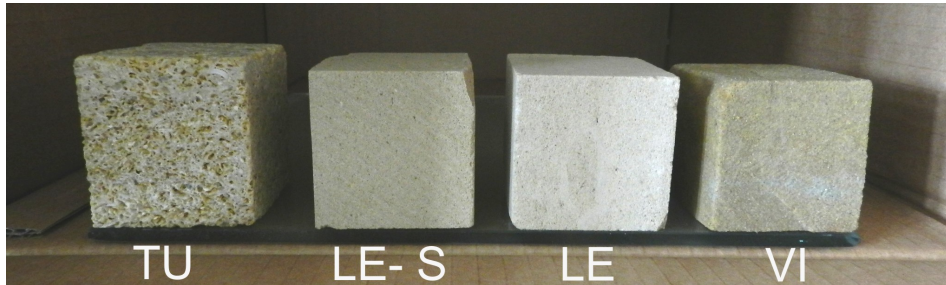


Figura 2 – Bloques de las muestras después de sumergidas en agua y al inicio del ensayo de secado.

Después de sumergidas en agua o solución salina, la probeta cargada en sulfato sódico se lavó superficialmente y las probetas se colocaron como muestra la Fig. 2 para que evaporaran libremente en condiciones de laboratorio (23 °C y 50% HR). Tras 10 horas en estas condiciones, las muestras se colocaron en una estufa a 40 °C para que terminasen de secar.

Se realizaron medidas de humedad con un medidor de humedad portátil *Protimeter Surveymaster* con sensores de resistividad y capacitancia. Las medidas del sensor de resistividad se expresan en porcentaje de humedad equivalente en madera (%WME) mientras que las medidas del sensor de capacitancia se dan en unidades arbitrarias (REL) dadas por el aparato en una escala de 0 a 999. En la Tabla 1 se muestran los valores obtenidos antes de comenzar el ensayo y sumergir las muestras. Este valor se tomó como referencia para considerar la muestra como “seca” una vez medida en estufa.

Tabla 1 – Valores de “humedad” obtenidos con *Protimeter* con sensor de resistividad (%WME) y de capacitancia (REL) antes de sumergir las muestras y del comienzo de los experimentos. En el caso de la muestra TU la humedad estaba por debajo del límite de detección (<l.d.) del sensor de resistividad.

	TU	LE	VI
(%WME)	< l.d.	7	15
(REL)	162	204	215

Una vez situadas las muestras para que evaporaran libremente se realizaron medidas de la humedad cada hora. Así mismo se midió la evaporación en cada una de las muestras aplicando un psicrómetro en su superficie. También de forma horaria se tomaron imágenes de infrarrojos con una cámara *ThermaCAM™ B4* (rango espectral de 7,5 a 13 μ m, rango de detección de temperaturas de -20°C a +130°C y sensibilidad térmica de 0,08°C).



3. RESULTADOS

Las Fig. 3 y 4 muestran los resultados de lecturas de *Protimeter* tanto en modo de resistividad como de capacitancia.

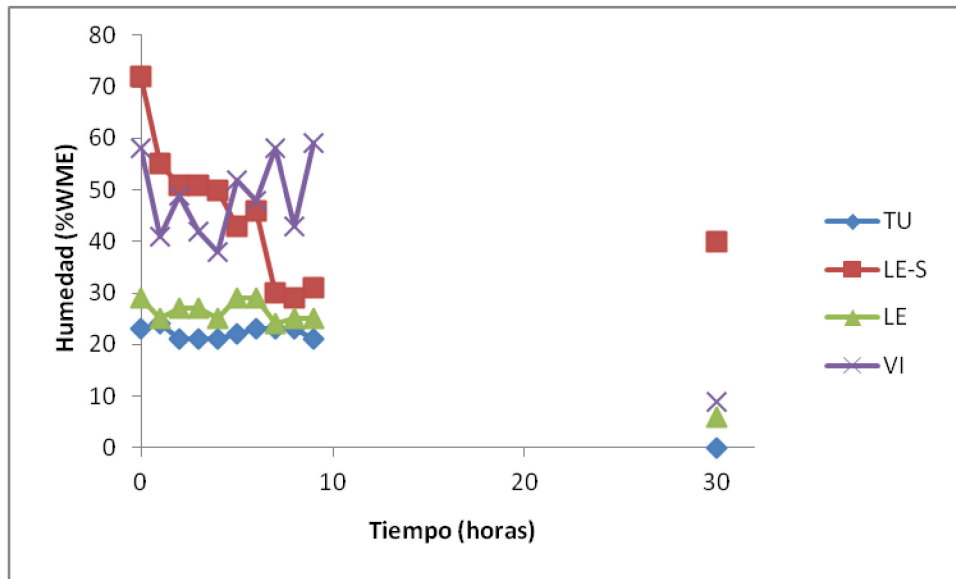


Figura 3 – Evolución de las lecturas de “humedad” (%WME) obtenidas a partir del sensor de resistividad

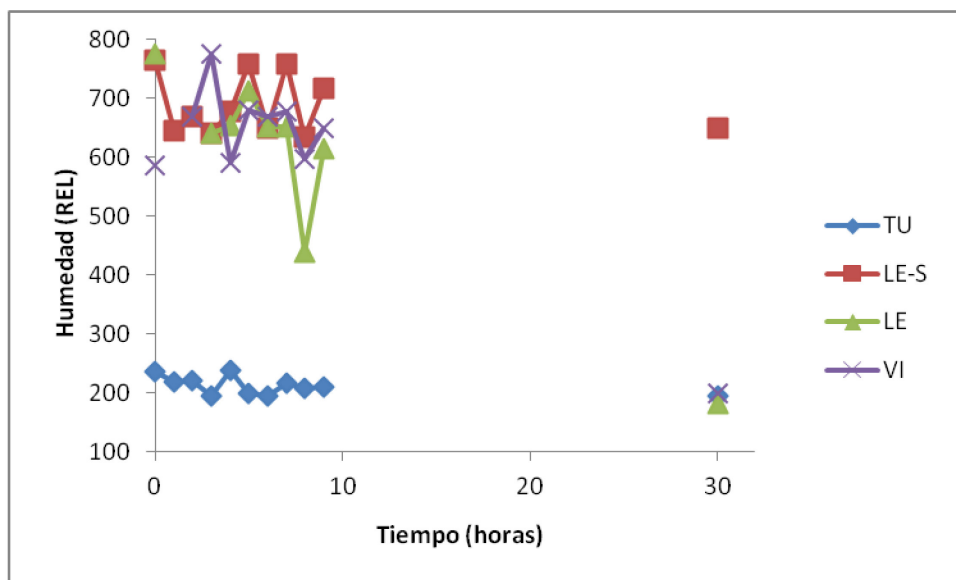


Figura 4 – Evolución de las lecturas de “humedad” (REL) obtenidas a partir del sensor de capacitancia

Los resultados del sensor de resistividad muestran variaciones con respecto al tipo de material. La arenisca VI, siliciclástica y con la menor porosidad de los materiales ensayados es la que presenta lecturas más altas de todas (sin contar con los valores iniciales de la muestra cargada en sales).

Las probetas TU y LE, ambas carbonáticas y con valores más altos de porosidad, presentan los valores más bajos de %WME, manteniéndose estos además muy constantes durante la parte de



evaporación libre del ensayo. Después, cuando se introducen en la estufa, estos valores decrecen hasta alcanzar los niveles medidos antes del ensayo.

La probeta LE-S tiene inicialmente los valores más altos de %WME, sin embargo, al contrario que en las otras muestras, estos valores caen rápidamente hasta alcanzar un valor de equilibrio a las 7 horas de haber comenzado la evaporación libre, justo después de la aparición de eflorcencias en la superficie de la probeta.

En el caso de los valores obtenidos mediante el sensor de capacitancia, se observa un comportamiento diferente a la de los sensores de resistividad. El valor de TU es mucho más bajo que el resto y permanece invariable durante todo el ensayo. Las muestras LE y VI tienen valores altos en unidades REL y comparables a las de la muestra LE-S cargada en sales. Sin embargo, los valores de LE y VI decrecen cuando la muestra se seca completamente, mientras que los de LE-S se mantienen invariablemente altos.

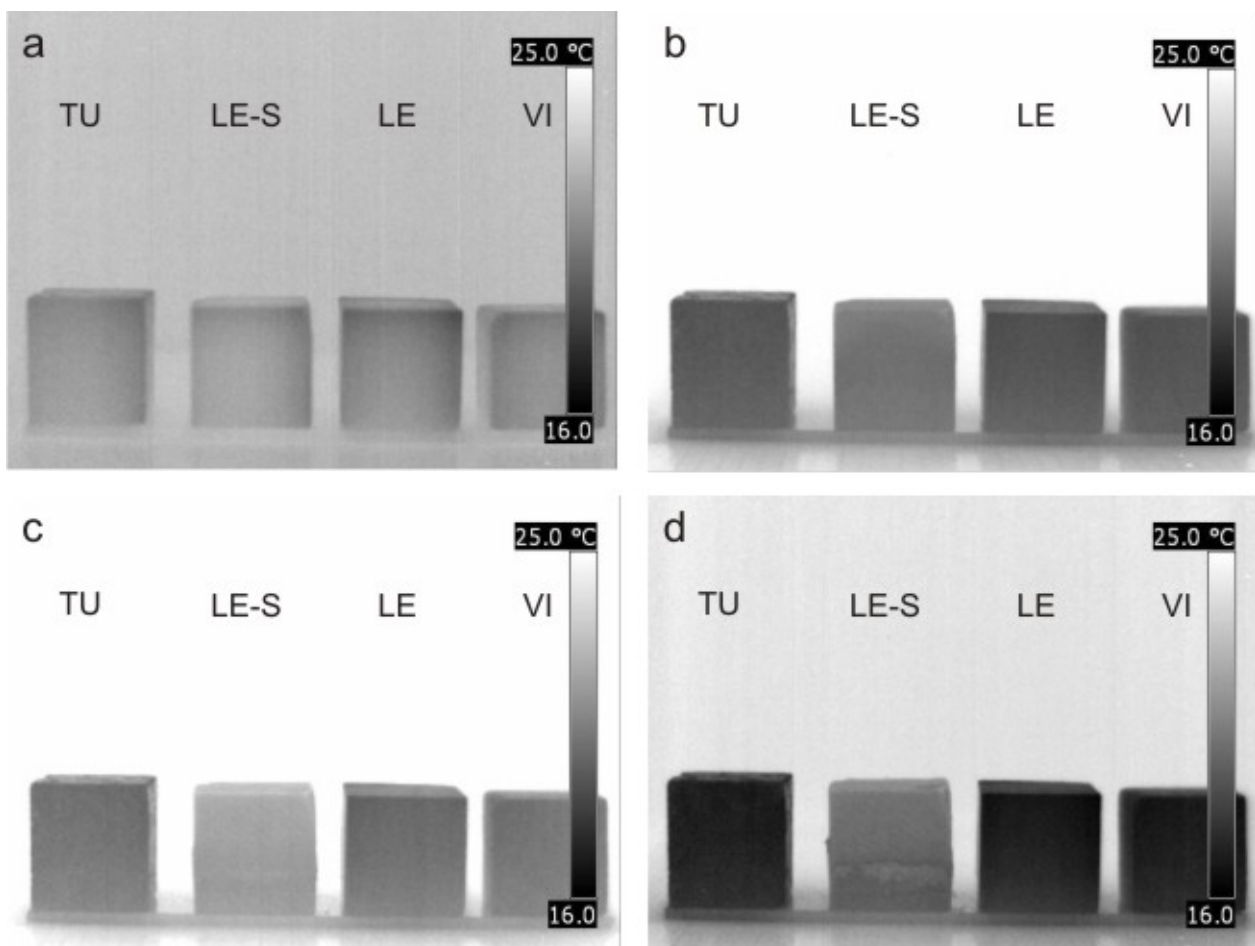


Figura 5 – Imágenes de infrarrojos de las muestras al inicio del experimento de secado (a) y tras 3 (b), 6 (c) y 9 (d) horas del mismo

La Fig. 5 muestra una selección de las imágenes de infrarrojos tomadas durante la primera parte del experimento en el que las probetas estaban evaporando libremente. Las imágenes de infrarrojos se han representado utilizando un valor de emisividad de 0,96 (según los valores de referencia para una caliza [2]). En estas imágenes se observa el descenso de temperatura de las



muestras al producirse la evaporación y el efecto que tienen las eflorescencias salinas en LE-S, bloqueando la evaporación, que han descrito anteriormente los autores [6].

Al monitorizar el ensayo de evaporación con la cámara de infrarrojos se observa que inicialmente las probetas empiezan a evaporar más por las aristas, como es de esperar, lo que se refleja en una diferencia de temperatura entre las aristas y la parte interior de las caras de los cubos.

Al evaporar, de manera previsible, los cubos se enfrían y la temperatura desciende con el tiempo, llegando a unos 17 °C a las 9 horas de haber comenzado la evaporación (Fig. 5d). Con plena evaporación (Fig. 5c), las temperaturas son ligeramente inferiores en la cara superior de los cubos, que es la que más evapora.

Si las condiciones de evaporación fueran las de una cámara ideal, y el sistema funcionara como una cámara de saturación adiabática, la temperatura “ideal” durante la evaporación de las probetas debería ser 16,5 °C (temperatura de bulbo húmedo). Con el experimento se ha alcanzado el valor de 17 °C, lo cual es natural, al no tratarse de un sistema aislado. El punto que representa las condiciones del aire en contacto con los cubos (medido con el psicrómetro) aparece en el gráfico de la Fig. 6

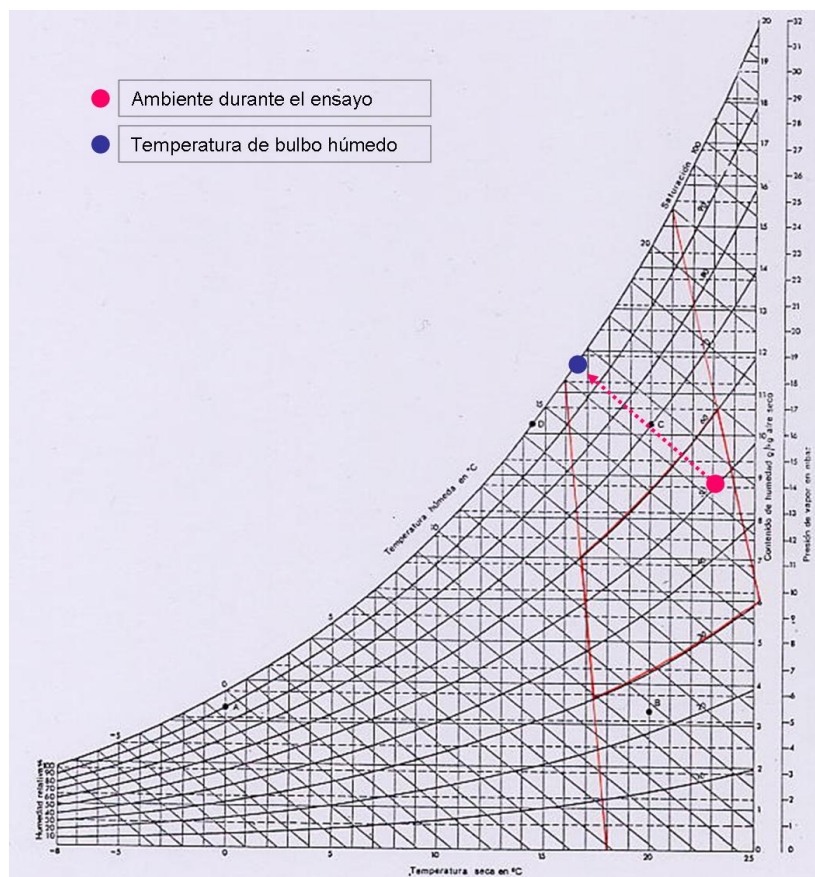


Figura 6 – Representación en un ábaco psicrométrico de las condiciones ambientales durante el ensayo y la temperatura de bulbo húmedo correspondiente.

La probeta contaminada por sales manifiesta un comportamiento anómalo en las imágenes de infrarrojos. Inicialmente, la evaporación es similar a la de las otras probetas, pero en el momento en que comienzan a cristalizar las sales en superficie (a las 6 horas, Fig. 5c), las diferencias aparentes de temperatura pueden reflejar tanto una diferencia de emisividad entre las sales y la probeta como una diferencia de temperatura real debido al cese del efecto refrigerante de la



evaporación al haber bloqueado las sales los poros. Sería necesario disponer de la curva de evaporación para saber que contenido relativo de agua hay en las probetas, pero esta comprobación no es posible hacerla en este ensayo, dado que se alteraría la adquisición de temperaturas al manipular las probetas.



Figura 7 – Aspecto de las muestras al terminar el experimento.

4. CONCLUSIONES

Aunque la limitación de estos experimentos no permite generalizar en exceso las conclusiones, sugieren una serie de ideas por las que continuar esta línea de trabajo y que nos permitan entender como las distintas propiedades físicas de los materiales, así como su humedad y contenido en sales afectan a las lecturas de los sensores eléctricos y las cámaras de infrarrojos..

La porosidad y el tipo de material afecta a las lecturas de los sensores eléctricos, fundamentalmente en el caso del sensor de resistividad.

El ensayo con sensores de resistividad se ve afectado tanto por la humedad como por las sales mientras que las lecturas con sensores de capacitancia no parece discriminar la humedad, pero si las sales. En cualquier caso ninguno de los dos tipos de sensores describe adecuadamente el proceso de evaporación y sus valores parecen funcionar en un modo “encendido-apagado”, es decir, dan un valor en presencia de humedad y otro en su ausencia, pero no discriminan bien el paso de un estado a otro. En contraste, la termografía de infrarrojos resulta muy útil describiendo el proceso de evaporación.

5. AGRADECIMIENTOS

Al programa Geomateriales (S2009/MAT-1629) y al Campus de Excelencia Internacional de Moncloa (UPM, UCM, CSIC) por un contrato Postdoctoral del Programa Internacional para la Captación de Talento (PICATA).

REFERENCIAS

- [1] Garcia Morales, S. (1998), “Moisture in heritage buildings. Part I: A new work methodology”. Architectural Science Review 41: 51 - 56.
- [2] Fluke Co – The Snell Group (2009), “Introducción a los Principios de la Termografía”. American Technical Publishers, Illinois. 72 pag.
- [3] Lerma, J.L., Cabrelles, M., and Portalés, C. (2011), Multitemporal thermal analysis to detect moisture on a building façade. Construction and Building Materials 25, 2190–2197.
- [4] Gomez-Heras, M., Wedekind W and Lopez-Arce, P. (2012), Discerning total salt contents and surface humidity on building stone with a portable moisture meter (Protimeter) in the region of Petra (Jordan). Geophysical Research Abstracts Vol. 14, EGU2012 - 5876 - 1.



-
- [5] Sass, O. and Viles, H.A. (2010), 2D resistivity surveys of the moisture contents of historic limestone walls in Oxford, UK: Implications for understanding catastrophic stone deterioration. In: Geological Society of London Special Publication 331, p. 237 - 249.
- [6] Gomez-Heras and Fort R. (2007) Patterns of halite (NaCl) crystallisation in building stone conditioned by laboratory heating regimes. *Environ. Geol.* 52 (2): 239-247
-