

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

Departamento de Física de Materiales



TESIS DOCTORAL

**La humedad como causa de patologías en
monumentos:
desarrollo de nuevas técnicas de análisis no
destrutivo basadas en termografía infrarroja**

TESIS DOCTORAL

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

Elena Gayo Moncó

Directores:

José Frutos Vaquerizo
Ángel Palomo Sánchez

Madrid, 2002

ISBN: 978-84-669-0407-0

© Elena Gayo Moncó, 1991

INSTITUTO EDUARDO TORROJA DE CIENCIAS DE LA CONSTRUCCIÓN. CSIC



**LA HUMEDAD COMO CAUSA DE PATOLOGÍAS EN
MONUMENTOS: DESARROLLO DE NUEVAS TÉCNICAS DE
ANÁLISIS NO DESTRUCTIVO BASADAS EN
TERMOGRAFÍA INFRARROJA**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR EN CIENCIAS FÍSICAS
PRESENTADA POR:

ELENA GAYO MONCÓ

DIRECTORES:

- DR. ÁNGEL PALOMO SÁNCHEZ. COLABORADOR CIENTÍFICO (IETCC)
- DR. JOSÉ DE FRUTOS VAQUERIZO. PROFESOR TITULAR (ETSIT)

DEPARTAMENTO DE MATERIALES. FACULTAD DE CC. FÍSICAS
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

*A mis padres, por el entusiasmo con que me
alentaron siempre.*

*A los que cada día estáis junto a mí... y a los
que, aunque os habéis ido, permanecéis en mi
memoria.*

A través de estas líneas quisiera hacer constar mi agradecimiento a todas aquellas personas que de una u otra forma han colaborado conmigo en la realización de esta Tesis, y de manera muy especial:

Gracias a los Drs Don José de Frutos Vaquerizo y Don Ángel Palomo Sánchez, directores del trabajo, por su constante ayuda.

Al Dr Don José Llopis por su amabilidad al aceptar la Tutoría de esta Tesis.

Al personal del "C.S. Deperimento e Metodi di Conservazione delle Opere d'Arte" (Roma) y, muy especialmente, al Profesor Sandro Massa por los medios facilitados y el interés mostrado durante mi estancia en dicho centro.

Al departamento de Síntesis, Caracterización y Estabilidad de Materiales del Instituto Eduardo Torroja por la financiación del presente trabajo.

Al Instituto Eduardo Torroja por los medios facilitados en el desarrollo de la presente investigación, especialmente, a las personas más próximas a mí: Esperanza, Carmen, Marta, M^a Luz, Javier y Bernardo, porque durante estos últimos años han conseguido hacer más llevadero el trabajo.

Al Dr. Don Fernando López, Profesor Titular del Departamento de Ingeniería de la Universidad Carlos III, por los medios prestados y su ayuda constante.

Al Dr. Don José Luis Sagrera, responsable de Rayos X en el IET. A Don José Manuel Lluca por la realización de los ensayos de Porosimetría y su ayuda en la interpretación de los resultados. A Don José Luis García por la realización de las probetas ensayadas durante la investigación.

Al personal de las secciones de Fotografía, Delineación, y Reprografía y Fotocopias del centro, por su esmero en la realización del trabajo.

Asimismo, me gustaría expresar mi agradecimiento a mis amigos: A José y Macarena por haberme obligado a empezar a escribir al fin; A Santiago, por sus tareas de "secretario" en la Facultad; A Michel, por su continuo interés; A Gamoño, por su ayuda; A José Manuel, por sus clases de Informática; A Buba y a Mayte...

A Doña Carmen Matilla, por su ayuda durante tantos años...

Finalmente, me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a mi familia y a todas las personas más próximas a mí, especialmente a mis padres, por su inagotable paciencia, sus continuos estímulos y su desinteresada ayuda.

A todos, muchas gracias.

Índice de materias

| | |
|---|----|
| <i>I.- Introducción</i> | 1 |
| <i>I.1.- Tipos de humedades</i> | 2 |
| <i>I.2.- Procesos físicos ocasionados por la presencia de humedad</i> | 3 |
| <i>I.2.1.- Procesos de absorción</i> | 3 |
| <i>I.2.2.- Capilaridad</i> | 4 |
| <i>I.2.3.- Evaporación</i> | 5 |
| <i>I.2.4.- Difusión</i> | 5 |
| <i>I.2.5.- Condensación</i> | 5 |
| <i>I.3.- Movimiento del agua en los materiales</i> | 6 |
| <i>I.4.- Materiales de construcción</i> | 8 |
| <i>I.4.1.- Mecanismos de agresión a los materiales</i> | 8 |
| <i>I.4.2.- Aspectos Microestructurales de los Materiales</i> | 10 |
| <i>I.4.2.a.- Porosidad</i> | 10 |
| * <i>Porosidad accesible al agua</i> | 11 |
| * <i>Técnicas microscópicas</i> | 11 |
| * <i>Porosimetría de mercurio</i> | 12 |
| * <i>Método BET</i> | 13 |
| <i>I.4.2.- Permeabilidad</i> | 15 |
| <i>I.4.2.c.- Conductividad térmica</i> | 16 |
| <i>I.5.- Técnicas de medida de humedades en edificación</i> | 18 |
| <i>I.5.1.- Técnicas generales de medida</i> | 18 |
| <i>I.5.2.- La Termografía Infrarroja</i> | 21 |
| <i>I.5.2.a.- Radiación infrarroja</i> | 22 |
| <i>I.5.2.b.- Equipos infrarrojos</i> | 25 |
| * <i>Detectores infrarrojos</i> | 26 |
| * <i>Medio de transmisión</i> | 30 |

| | |
|---|----|
| * Filtros interferenciales | 30 |
| I.5.2.c.- Equipos de Termografía Infrarroja | 31 |
| I.5.2.d.- Aplicación de la Termografía Infrarroja a la edificación | 32 |
| II.- Objetivos propuestos | 35 |
| II.1.- Objetivos concretos relacionados con la técnica | 35 |
| II.2.-Objetivos concretos relacionados con el estudio de los movimientos de agua en los materiales | 36 |
| II.3.- Objetivos concretos relacionados con la aplicación "in-situ" de la Termografía Infrarroja a la medida de humedad en algunos ejemplos de monumentos del Patrimonio Histórico y Cultural | 36 |
| III.- Experimentación y resultados | 37 |
| III.1.- Técnica | 37 |
| III.1.1.- Calibrado del equipo | 37 |
| III.1.2.- Cálculo de temperaturas superficiales y emisividades | 40 |
| III.1.2.a.- Cálculo de errores en las medidas termográficas | 42 |
| III.1.3.- Factores influyentes en las medidas termográficas | 43 |
| III.1.3.a.- Ángulo de incidencia y factor de forma | 43 |
| III.1.3.b.- Atenuación atmosférica | 46 |
| III.1.3.c.- Radiación del entorno no controlada | 53 |
| III.1.3.d.- Un ejemplo de perturbación por factores externos | 55 |
| III.1.4.- Radiación externa controlada | 56 |
| III.1.4.a.-- Modelización matemática del proceso | 58 |
| III.1.4.b.-Experimentación | 61 |
| * Ensayos previos | 63 |
| * Ensayos sobre yeso y ladrillo | 64 |
| III.1.5.- Termografía Infrarroja Selectiva | 67 |
| III.1.5.a.- Filtros interferenciales | 68 |
| III.1.5.b.-Puesta a punto de la técnica | 69 |
| * Curvas de calibrado | 69 |
| * Efecto de atenuación atmosférica | 70 |
| III.1.5.c.-Ensayos en laboratorio | 71 |
| * Ensayos de capilaridad | 71 |
| * Ensayos de evaporación | 73 |
| III.2.- Materiales de construcción | 74 |
| III.2.1.- Caracterización de los materiales | 74 |
| III.2.1.a.- Caracterización mineralógica | 75 |

| | |
|---|-----|
| III.2.1.b.- Caracterización física | 79 |
| * Porosidad accesible al agua | 79 |
| * Porosimetría de mercurio | 81 |
| * Resistencia mecánica a compresión | 89 |
| III.2.2.- Modelización matemática de procesos hídricos | 90 |
| III.2.2.a.- Evaporación en materiales de construcción | 91 |
| * Soluciones al sistema de ecuaciones | 93 |
| III.2.2.b.- Succión capilar en materiales de construcción | 95 |
| * Soluciones al sistema de ecuaciones | 97 |
| III.2.3.- Verificación experimental de los modelos | 98 |
| III.2.3.a.- Variación de la emisividad del material | 100 |
| III.2.3.b.- Procesos de evaporación | 101 |
| * Evaporación con agua destilada a 20°C | 103 |
| * Evaporación con agua a 40 °C | 106 |
| * Procesos con disoluciones salinas | 108 |
| III.2.3.c.- Procesos de capilaridad | 122 |
| * Succión capilar con agua destilada a 20 °C | 122 |
| * Ensayos de capilaridad horizontal | 126 |
| * Procesos con disoluciones salinas | 128 |
| III.3.- Aplicación de la Termografía Infrarroja a la detección de humedades en Monumentos | 137 |
| III.3.1.- Termografía Infrarroja Clásica | 137 |
| III.3.1.a.- Medidas realizadas en la Catedral de Toledo | 137 |
| * El Claustro | 137 |
| * La Capilla Mozárabe | 139 |
| III.3.1.b.- Medidas realizadas en las dependencias del IETCC | 141 |
| * Un ejemplo de atenuación atmosférica | 143 |
| III.3.2.- Termografía Infrarroja Selectiva | 145 |
| III.3.2.a.- Medidas en la iglesia de Vilar de Donas en Lugo | 145 |
| III.3.3.- Radiación externa controlada | 148 |
| III.3.3.a.- Medidas en la Basilica Pitagorica di Porta Maggiore | 148 |
| III.3.3.b.- Medidas en Santa Maria Porta Paradisi | 151 |
| III.3.4.- Uso combinado de las técnicas | 153 |
| III.3.4.a.- Medidas en la Catedral de Burgos | 153 |
| IV.- Discusión de los resultados | 156 |
| IV.1.- Técnica | 156 |

| | |
|--|------------|
| <i>IV.1.1.- Radiación externa controlada</i> | <i>156</i> |
| <i>IV.1.2.- Termografía Infrarroja Selectiva</i> | <i>163</i> |
| <i>IV.2.- Materiales de construcción</i> | <i>166</i> |
| <i>IV.2.1.- Modelización matemática de los procesos hídricos.</i> <i>Justificación experimental</i> | <i>166</i> |
| <i>IV.2.2.- Estudio de otros procesos hídricos</i> | <i>173</i> |
| <i>IV.3.- Aplicación a la detección de humedades en Monumentos.</i> | <i>191</i> |
| <i>IV.3.1.- Termografía Infrarroja Clásica</i> | <i>191</i> |
| <i>IV.3.2.- Termografía Infrarroja Selectiva</i> | <i>195</i> |
| <i>IV.3.3.- Medidas con radiación externa controlada</i> | <i>196</i> |
| <i>IV.3.4.- Uso combinado de las técnicas</i> | <i>197</i> |
| <i>V.- Conclusiones</i> | <i>200</i> |
| <i>VI.- Referencias bibliográficas</i> | <i>205</i> |

RESUMEN

El objetivo principal del presente trabajo de tesis es el desarrollo de técnicas de análisis no destructivo basadas en Termografía Infrarroja para el estudio de humedades en Monumentos del Patrimonio.

Tanto la presencia de agua en los materiales de construcción como los problemas que genera su existencia son una de las causas más importantes de deterioro de objetos con valor artístico. Tales problemas se agravan además en muchos casos porque distintos factores externos pueden modificar de forma radical las manifestaciones de la presencia de agua en el material, dificultando en gran medida la localización de las causas reales del daño. Además, la propia naturaleza de los objetos a estudiar, requiere ciertas características especiales de la técnica que se use. Como rasgo más importantes de tales técnicas se debe considerar el carácter no destructivo de las mismas.

Aunque el objetivo principal de la investigación es el desarrollo de una técnica no destructiva orientada al análisis de humedades, la complejidad de los materiales estudiados ha requerido de una investigación paralela de los mismos. A este respecto, se han desarrollado modelos matemáticos que explican su comportamiento cuando se someten a procesos de capilaridad y evaporación. Tales modelos se han verificado experimentalmente a partir de medidas termográficas desarrolladas en laboratorio.

En relación con la técnica, se han analizado distintos factores externos que pueden perturbar las medidas termográficas así como la forma de eliminarlos o minimizarlos en la toma de datos.

Se han desarrollado distintos elementos complementarios a la Termografía Infrarroja que mejoran la detección mediante dicha técnica y aumentan la información aportada por la misma.

El primero de tales elementos se basa en el uso de filtros interferenciales y ha dado lugar a la llamada Termografía Infrarroja Selectiva. Físicamente, la técnica se basa en la selección de distintas bandas de detección mediante el uso de filtros acoplados a la termocámara. Mediante esta técnica se aumenta la información aportada por la termografía ya que es posible estudiar cómo afecta al proceso general cada uno de los gases involucrados en el proceso que se estudie.

Como segunda técnica complementaria se han desarrollado fuentes externas de radiación infrarroja capaces de aumentar la radiación total emitida por el objeto sin producir un calentamiento real en él. Así, se recibe una señal más intensa, lo que permite detectar fenómenos no localizables mediante Termografía Infrarroja Clásica. Además, a partir de una modelización matemática del proceso ha sido posible cuantificar el contenido de agua en la superficie de los materiales.

Como tercera técnica se presenta la conjunción de las dos antes mencionadas. El adecuado uso de la Termografía Infrarroja Selectiva y de las Fuentes Infrarrojas Externas potencia en gran medida los resultados de la técnica.

Finalmente se han aplicado todos los desarrollos anteriores al estudio de patologías en distintos Monumentos con el fin de verificar los resultados obtenidos en el laboratorio. Dicho trabajo ha generado unos resultados tan positivos que convierten la investigación llevada a cabo en una alternativa muy prometedora dada su aplicabilidad a problemas reales.

Capítulo I: Introducción

Son muchos los esfuerzos realizados en los últimos años para conservar los Monumentos de Nuestro Patrimonio Histórico. En muchos casos, la actuación se ha centrado en la reparación de daños sin tener en cuenta las causas originarias del deterioro, encontrándose al poco tiempo con la reaparición del mismo problema.

Uno de los agentes patológicos más importantes en todo tipo de construcción es la presencia de humedad, que alcanza dimensiones preocupantes en el caso del Patrimonio Histórico. Una cuestión muy importante en este tipo de estudios es la detección de los orígenes de la humedad para corregir las causa y garantizar una adecuada restauración de la obra.

La forma tradicional de analizar los orígenes del deterioro implica la acción directa sobre los Monumentos, con toma de muestras, sondeos, etc, que, por regla general, proporciona una información muy parcial, y que, en muchas ocasiones, resulta desaconsejable debido a la riqueza cultural de la obra de arte a restaurar.

En el presente trabajo de tesis se plantea el desarrollo de técnicas de análisis no destructivas basadas en Termografía Infrarroja, encaminadas a determinar los orígenes del agua en los Monumentos. Estas técnicas se complementan con el desarrollo de modelos matemáticos que explican determinados procesos relacionados con la presencia de agua en materiales de construcción. Dichos modelos relacionan los parámetros medibles por la termocámara (radiación, temperatura) con propiedades características de los materiales (porosidad, capacidad calorífica, conducción térmica, etc) de manera que, a partir de la Termografía Infrarroja, se pueda determinar que proceso o procesos están implicados, para, a partir de esta información poder actuar eliminando las fuentes de la patología.

I.1 Tipos de humedades

Uno de los objetivos principales en el desarrollo de una investigación orientada al estudio de Patologías de Humedades en un edificio consiste en determinar el origen que tiene el agua presente en dicho monumento. Las manifestaciones de los distintos tipos de humedad son múltiples y el conocimiento de su origen es decisivo para atajar el problema. Los tipos de humedades que pueden afectar a un edificio atendiendo a las respectivas clasificaciones de Ortega Andrade y G. Lozano (/1/ y /2/) son:

Humedades de construcción o de obra. Son las recibidas por el edificio durante su construcción. Tienen su origen en el agua introducida en algunos materiales (por ejemplo, la retenida en la arena), la aportada para la hidratación de morteros y hormigones, así como la recibida por la estructura debido a la lluvia antes de la colocación de cubiertas y cerramientos. Sus manifestaciones son tan diversas como los componentes del inmueble a los que afecta: manchas, eflorescencias, desprendimientos, etc.

Humedades de cubierta. Se deben a las infiltraciones de agua exterior a través de la envolvente superior del edificio. Los diferentes tipos de cubierta y la diversidad de sus componentes dan lugar a patologías muy variadas, que se pueden resumir en las debidas a los propios elementos de cobertura a otros componentes estructurales y a la formación de pendientes. Se manifiestan a través de goteras o simples manchas de humedad.

Humedades de fachada. Se producen por la penetración, la infiltración o la absorción del agua exterior a través de los cerramientos del edificio. Su origen es la entrada a través de huecos, fisuras y poros. Se manifiestan por entradas francas de agua, manchas y agresiones diversas.

Humedades de condensación. Se conocen como tales a las producidas por la condensación del aire húmedo sobre o en el interior de los cerramientos. Son el resultado de la superposición de tres leyes físicas: la variación de la proporción aire/agua con la temperatura, y la transferencia de calor y vapor de agua a través de los cerramientos. Se manifiestan más o menos de forma intermitente, en forma de gotas, veladuras o manchas producidas por colonias de hongos sobre las partes frías y poco ventiladas de la edificación.

Humedades de capilaridad. Son las producidas por la ascensión del agua del terreno a través de los cimientos y muros del edificio hasta alcanzar sobre éstos una cierta altura.

Tienen su origen en la tensión superficial existente entre el agua y las paredes de los conductos capilares de los materiales componentes del muro. Se manifiestan mediante manchas de humedad y de sales en las paredes del edificio.

Humedades de sótano. Son las producidas por la agresión del agua exterior en la envolvente inferior del edificio. Se manifiestan a través de infiltraciones, eflorescencias, hinchamientos y despegues de los revestimientos. Se deben a la penetración del agua del subsuelo a través de los muros o de la solera del sótano. La situación a nivel del terreno hace que el sótano sea muy proclive a la aparición de humedades de capilaridad y de condensación.

Humedades accidentales. Son las debidas a accidentes o fallos puntuales de las instalaciones del propio edificio o de los colindantes, así como a la falta de mantenimiento de aquellas.

1.2.- Procesos físicos ocasionados por la presencia de humedad

Para explicar los procesos patológicos anteriormente citados, es necesario recordar los mecanismos de intercambio de agua entre los materiales y su entorno.

Por una parte, el agua puede penetrar en un material de construcción mediante capilaridad, absorción o por procesos bajo presión. Además, como el material debe mantener un equilibrio con su entorno, pueden ocurrir procesos de evaporación o de convección en los que el material cede agua al ambiente. Por último, se pueden dar procesos de difusión que ocurrirán en un sentido o en otro (hacia el material o desde el material) dependiendo de las concentraciones salinas, las presiones de vapor, etc..

1.2.1.- Procesos de absorción

La humedad de absorción es un fenómeno propio de los cerramientos y, quizás, el más particular de las construcciones antiguas. El fenómeno se hace más pronunciado con el envejecimiento de los materiales de construcción, ya que los morteros de los muros suelen estar muy disgregados y, en consecuencia se hacen más porosos. El lavado de su superficie y el establecimiento en ella de sales recristalizadas origina una estructura de poros abiertos (/1).

El agua circula muy libremente por el muro y cambia fácilmente el sentido de flujo

en favor de los cambios relativos de presión de vapor. Los materiales quedan cargados de sales anhidras que se hidratan y permanecen sin actividad mecánica, manteniéndolo frío y favoreciendo la formación de humedades de condensación.

La absorción de agua en un cerramiento puede estar originada por causas distintas. Una lluvia suave en un material con baja tensión superficial es responsable de una absorción capilar sin presión, equivalente a un fenómeno de succión. Además, una fachada puede verse sometida a absorción capilar bajo presión. En esta situación pueden superponerse fenómenos de absorción capilar bajo presión con fenómenos de infiltración y penetración de agua de lluvia.

En muchos casos, las condiciones climáticas tienen una importancia decisiva en el desarrollo de dichos procesos. Algunos factores meteorológicos como la intensidad de las lluvias en la zona (zonas de altas precipitaciones, áreas secas, etc) y el fenómeno conocido como agua-viento influyen de forma notable en tales procesos (/1/).

1.2.2.- Capilaridad

La difusión de un fluido a través de la estructura porosa de un material puede estudiarse como una extensión del fenómeno físico de la capilaridad. La capacidad que tiene un líquido para ascender o descender en un capilar depende de sus propiedades intrínsecas, de las características del capilar y de su diámetro. Además, interviene la temperatura del fluido a través de su viscosidad. La ley de Jurin determina la altura que alcanza un líquido dentro de un capilar:

$$h_c = \frac{2T_s \cos\theta}{\rho r} \quad [1.1]$$

donde T_s es la tensión superficial, θ es el ángulo del menisco, r es el radio del menisco y ρ es la densidad del líquido.

De la ecuación anterior se deduce que en tubos de diámetro pequeño el ascenso por capilaridad será más acusado en las mismas condiciones, lo cual relaciona la altura alcanzada por el agua en un material de construcción, sometido a un proceso de capilaridad o el movimiento de agua en un material no saturado, con las características de su red porosa. En cualquier caso, la capilaridad no debe entenderse como un fenómeno exclusivo de ascenso vertical, sino que su flujo se extiende radialmente en cualquier dirección en la que encuentre succión o actividad capilar.

En construcción, y más concretamente en el campo de las humedades, debido a la tensión superficial, el agua puede desplazarse dentro de un elemento. La tensión superficial es función de la viscosidad del fluido y de su temperatura pero, su comportamiento sobre un medio sólido es también función de la calidad de la superficie a la cual se adhiere. El parámetro de la viscosidad contribuye fundamentalmente a las oscilaciones en el nivel de la cota máxima de ascensión y es consecuencia de las variaciones térmicas habidas en los ciclos frío-calor o diurnos-nocturnos y tiene como resultado el deterioro de los revestimientos del muro en la línea de máxima altura capilar (/1/).

I.2.3.- Evaporación

Los procesos de evaporación se originan por las diferencias de presión de vapor entre el agua contenida en los poros y el entorno del material que da lugar al paso de moléculas de agua a la atmósfera. Esta transferencia se detiene cuando se alcanza la humedad relativa del 100%. La evaporación contrarresta, por una parte, las humedades de capilaridad, aunque, es responsable de la continuidad ascensorial del agua (/3/).

I.2.4.- Difusión

La diferencia de presiones de vapor de agua a uno y otro lado de un material permeable da lugar a un desplazamiento del vapor desde el recinto de mayor al de menor presión. La citada transferencia es función de la diferencia de presiones, de la permeabilidad del material y de sus espesores.

Los procesos de difusión junto con la transferencia de calor del recinto más caliente al más frío y la variación de los contenidos de vapor de agua en función de la temperatura son las responsables de las humedades de condensación (/1/).

I.2.5.- Condensación

La condensación se produce por licuación del vapor de agua contenido en el aire sobre o en el interior de los cerramientos. Se denominan puentes térmicos a aquellos puntos de un cerramiento que bien carecen de aislante o bien éste se interrumpe por la presencia de pilares, vigas, u otros elementos de construcción. Son éstos puntos de posible condensación ya que mantienen su temperatura superficial por debajo del resto de la superficie. Si la temperatura mínima en la superficie queda por debajo de la temperatura de rocío del aire del local se producirá una condensación de vapor en ellos.

I.3.- Movimiento del agua en los materiales

Por otra parte, son muchos los parámetros externos al material objeto de estudio que están o pueden estar involucrados en su deterioro. Por una parte, las características físicas de los materiales de construcción sufren continuas evoluciones a lo largo del tiempo que impiden establecer un valor absoluto que las determine. Además, cualquier fenómeno ambiental puede ser de extraordinaria importancia en los procesos de deterioro por presencia de agua en los materiales. Estos fenómenos no solo involucran procesos meteorológicos o ambientales de la zona donde se enclava, sino también todos los relacionados con el propio microclima que el edificio ha creado. En general, los edificios antiguos presentan condiciones ambientales internas mucho más drásticas que las externas y prácticamente invariables en función de las distintas épocas del año. Esto condiciona no solo el proceso de deterioro del edificio sino las propias técnicas de estudio a utilizar.

A la vista de la complejidad de los materiales y de las causas que originan el deterioro, resulta muy importante la modelización de los procesos a tratar. En la literatura, se pueden encontrar distintos intentos de modelización del movimiento del agua en los materiales de construcción así como de transferencia de humedad entre elementos de construcción. En general, los métodos teóricos se comparan con resultados experimentales obtenidos mediante diversas técnicas y, por lo tanto, la forma de abordar y cuantificar los resultados teóricos puede ser muy distinta según el tipo de experimentación realizado y el tipo de proceso que se estudia.

Así pues, y debido a que los procesos relacionados con el movimiento del agua dentro de los materiales son extraordinariamente complejos, y también a la dificultad para cuantificar todos los parámetros que influyen en el sistema, en muchos estudios relacionados con este tema se parte de resultados experimentales y se desarrolla un modelo matemático a partir del tipo de curva de ajuste para dichos resultados, de las constantes obtenidas, etc. Por ejemplo, Parrot (/4/) desarrolla un modelo de absorción en hormigones a partir de resultados obtenidos con ensayos gravimétricos. Este autor obtiene desviaciones de un comportamiento que considera "standard" según el tiempo de curado, el tipo de exposición (interior o exterior), etc.

Nielsen y Hoffmann (/5/) establecen un modelo matemático basado en ensayos de evaporación y succión capilar en ladrillos. En las curvas relacionadas con procesos de succión capilar, todos los términos obtenidos en el ajuste se relacionan con parámetros que

describen el proceso físico. Por contra, no se da una interpretación física a los coeficientes relacionados con los procesos de evaporación.

En general, son muy comunes, dentro del tema que nos ocupa, los modelos elaborados a partir de analogías con otros procesos físicos cuya formulación matemática es mejor conocida. Ejemplo de ello son los siguientes trabajos:

El movimiento de agua en materiales porosos ha sido profundamente estudiado por C. Hall y otros autores en diversos trabajos (/6/- /12/). En los primeros (/6/ y /7/), se estudian los aspectos generales del movimiento de agua en los materiales porosos y se describe el equilibrio termodinámico entre el agua en los poros y el material. Se establece un paralelismo entre el flujo de agua en materiales de construcción y el flujo de calor. En los trabajos posteriores (/8/, /9/, /10/, /11/ y /12/), el autor particulariza el modelo desarrollado en /6/ a morteros y ladrillos sometidos a procesos de succión hidráulica, absorción capilar o sortibidad.

C. Hall parte del coeficiente de sortibidad, introducido en 1957 por Philip (/6/), que se define para cualquier cuerpo poroso en el cual un flujo de agua obedece la Ley generalizada de Darcy:

$$u = -V \nabla \phi \quad [1.2]$$

donde u es el flujo, V , la viscosidad y Φ es un potencial hidráulico que incluye tanto las fuerzas externas que actúan sobre el líquido (por ejemplo, la gravedad) como las fuerzas capilares. A partir de esta ecuación, C. Hall llega a la expresión:

$$i = S\sqrt{t} \quad [1.3]$$

donde i es el volumen de agua absorbida por unidad de área, S la sortibidad y t el tiempo. A partir de este modelo es posible obtener los rangos de sortibidad para distintos materiales. Este coeficiente se puede entender como un parámetro que define la succión de agua en un material de construcción.

Los mismos autores (/8/) mediante métodos numéricos establecen modelos de difusión de agua de lluvia en materiales de construcción y establecen la absorción como parámetro dependiente de la sorción y de la porosidad del material. De la misma forma, definen un parámetro de desorción (/9/) que controla los procesos de evaporación.

En modelos depurados, los mismos autores (/15/ y /16/) suponen una geometría para una cavidad y modelizan el mismo proceso en tres dimensiones.

Otros autores han desarrollado distintos modelos para el estudio del movimiento del agua en elementos de un edificio. En este sentido merece la pena destacar los trabajos de M. J. Cunnigham (/18/, /19/, /20/, /21/ y /22/). El planteamiento matemático que hace este autor, está basado no solo en el fenómeno que se desea estudiar sino en las condiciones externas establecidas en cada caso y en la estructura definida para el elemento en el que se produce el proceso. Así, se han desarrollado modelos para cavidades en las que no se produce condensación, en el cual se consideran infiltraciones de aire, difusión de vapor e higroscopicidad del material en estado de no equilibrio (/19/). A partir de este modelo se obtienen constantes de tiempo que gobiernan la velocidad de secado de la cavidad y un parámetro "v" que indica la proporción entre el volumen del material higroscópico y el volumen de la cavidad. Este modelo es la base de otros trabajos posteriores del mismo autor en los que se consideran elementos más complicados de un edificio. En estos trabajos (/18/, /19/ y /20/) se establecen similitudes entre el elemento de construcción que se estudia y un circuito eléctrico. En estos modelos, las zonas aislantes están representadas por resistencias.

I.4.- Materiales de construcción

Son muchos los parámetros, tanto intrínsecos de los materiales (porosidad, conductividad térmica, solubilidad, etc) como externos a ellos (condiciones meteorológicas y medioambientales, características hídricas del medio en el que se encuentra enclavado, sales disueltas, etc) que intervienen en la forma en que el agua se mueve por los materiales y, por supuesto, en la posible interacción con ellos.

I.4.1.- Mecanismos de agresión a los materiales

El agua es el fluido más abundante en la naturaleza. Forma los mares, aguas subterráneas, ríos, lagos, nieve, vapor, etc y sus características, presentadas en la tabla I (todas en condiciones normales de presión y temperatura), la convierten en el principal agente de deterioro de los materiales (/25/).

Las moléculas de vapor de agua, debido a su pequeño tamaño, son capaces de penetrar en poros muy pequeños. Además, por su carácter dipolar, tiene una gran capacidad para disolver sustancias. En consecuencia, la presencia de iones disueltos en agua favorece los procesos químicos de deterioro de los materiales. Su alto calor de vaporización favorece

la presencia de agua líquida en los materiales más que en estado de vapor. En los cuerpos porosos, además, los movimientos de agua en su interior y los cambios estructurales del elemento al cambiar de estado pueden producir importantes deterioros en el material. Ejemplo de estos procesos físicos son, además de la congelación del agua dentro del material, la diferencia de presión osmótica debido a distintas concentraciones iónicas (procedentes del material o arrastradas por el agua) o la diferencia de presión hidrostática originada por diferencias en la presión de vapor que generan tensiones dentro del material y pueden llegar a producir roturas en el mismo (/23/, /24/ y /25/).

| | |
|--------------------------------------|---|
| Calor específico | 4.1819 J/g°C |
| Presión de vapor | 17.535 mmHg |
| Conductividad Térmica | 0.5973 J/°C m seg |
| Volumen específico | 1.001797 cm ³ /g |
| Expansividad Térmica | 206.61 10 ⁶ °C ⁻¹ |
| Compresibilidad | 45.91 10 ⁶ Bar ⁻¹ |
| Tensión Superficial (en aire) | 72.75 dinas/cm |
| Viscosidad | 1.002 cp |
| Densidad | 0.998234 g/ml |

Tabla L1. Propiedades físicas del agua en condiciones normales de presión y temperatura.

El agua está involucrada en casi todas las formas de deterioro de los materiales de construcción. Los efectos físicos que origina su contacto más o menos intenso con los materiales son, por ejemplo, el deterioro de la superficie (abrasión, erosión, etc), la rotura debido a la cristalización de sales presentes en los poros o a los procesos de hielo-deshielo dentro del material y la disminución de la resistencia mecánica de los materiales (especialmente resistencia a compresión) (/1/, /25/, /26/, /28/ y /29/). Respecto a los efectos químicos se pueden destacar la lixiviación, la cristalización de sales en materiales, las reacciones de expansión como son las que produce el ataque de sulfatos al cemento portland, el ataque por ácidos, la corrosión de aceros en los hormigones o la modificación de la naturaleza química de los materiales (/1/, /2/, /25/, /26/, /27/, /28/, /29/ y /32/). En estados ya muy avanzados de deterioro pueden producirse, además, degradaciones de los materiales por acción de seres vivos (/2/, /25/), etc.

I.4.2.- Aspectos Microestructurales de los Materiales

La naturaleza de los materiales tratados en el presente trabajo, complica en gran medida la determinación de sus propiedades físicas. Los materiales de construcción son, en general, heterogéneos y, muchas de sus propiedades físico-químicas sufren continuos cambios. Además, cualquier tipo de adición a las materias primas con las que se fabrican dichos materiales puede alterar de forma radical su posterior comportamiento (mecánico, químico, etc). Es por eso que, en general, muchas de estas magnitudes están definidas dentro de una banda de variación para cada material específico con el que se trabaja y no por un valor absoluto para cada tipo de material. Por otra parte, la combinación de dos o más de estos parámetros puede modificar sustancialmente el proceso al que inicialmente se encontraba sometido el material, enmascarando o incluso perdiendo relevancia la causa originaria del problema.

I.4.2.a.- Porosidad

Respecto a las características intrínsecas, la estructura porosa del material es, a priori, una de las magnitudes físicas que más puede afectar a cualquier tipo de deterioro relacionado con la presencia de agua. Se considera como red porosa el entramado de poros de un material y como porosidad, el volumen de huecos medido en % (considerados todos con una forma específica y homogéneamente repartidos en el volumen de material) que se obtiene a partir de cualquier técnica de porosimetría.

La determinación de la porosidad de un material presenta importantes problema: En primer lugar, no está perfectamente establecido el rango de tamaños que definen realmente un poro. En el límite superior de tamaños, la presencia de grietas o cualquier tipo de ruptura interna puede enmascarar valores pequeños de porosidad; de igual forma, no existe limitación clara con respecto a los espacios pequeños que pueden ser considerados como poros. Tampoco está definida con precisión la propia geometría del sistema por tratarse éste de un sistema caótico. Por otra parte, como ya se ha puesto de manifiesto antes, ningún material de construcción tiene un valor puntual de porosidad sino que ésta se define mejor por una banda de variación específica para cada uno (/31/-/37/).

Aún obviando todo lo anterior, existe un amplio rango de tamaños de poro que no pueden ser determinados con la precisión requerida mediante una única técnica. B. Meng (/32/) establece el rango de radios de poro para materiales de construcción entre 10^9 m y

10^2 m. En la figura I.1. se representan las técnicas más ampliamente usadas para medir la porosidad en los materiales que nos ocupan y los rangos de radio de poro que cubre cada una.

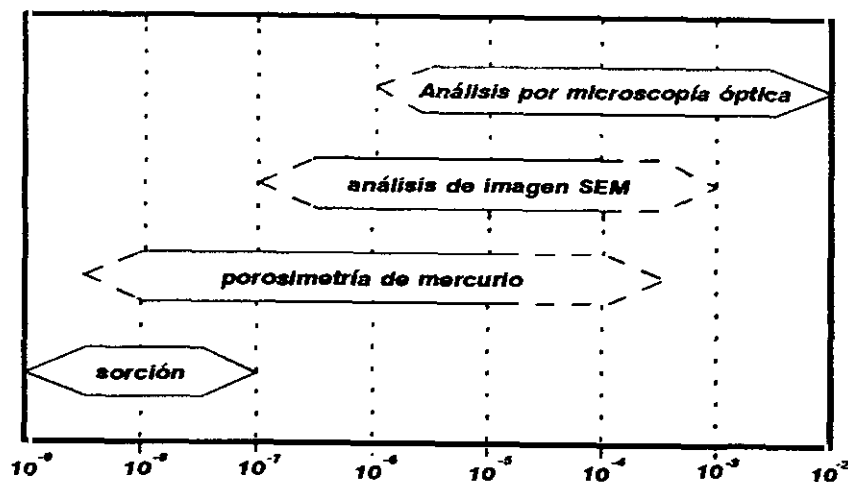


Figura I.1 Técnicas de medida de porosidad más usadas

A continuación se describen los métodos utilizados habitualmente para la determinación experimental de porosidad (atendiendo a criterios de tamaño de poro).

* Porosidad accesible al agua

La porosidad accesible al agua es un método habitualmente usado en el laboratorio para la cuantificación aproximada del volumen de poros que contiene un material. Existe una recomendación de la RILEM para el desarrollo del ensayo en materiales de construcción (/30/). En esta recomendación, el parámetro de porosidad accesible se define como la proporción de volumen de poros accesibles al agua en el volumen total de la muestra expresado en %. El fin del ensayo consiste en la cuantificación de la cantidad de agua que penetra en una muestra que previamente se ha secado en estufa y sobre la cual se ha hecho vacío.

* Técnicas microscópicas

Las técnicas microscópicas de uso más general son el análisis de imágenes mediante microscopía óptica, que puede reconocer poros en la banda de 10^6 a 10^2 m y el análisis de imágenes mediante SEM (Microscopía Electrónica de Barrido) a través del cual se puede barrer la banda comprendida entre 10^7 y 10^4 m.

En estos métodos microscópicos clásicos los valores de porosidad, tamaño medio de poro, morfología o conectividad de poros se obtienen a partir de técnicas de análisis de imágenes. La principal diferencia de cada tipo de cuantificación (SEM o microscopía óptica) estriba en la capacidad de resolución que impone la propia técnica. En ambas técnicas las muestras se embuten y se pulen. La bondad de los resultados obtenidos depende de la preparación correcta de la muestra. En el caso de técnicas de microscopía óptica las muestras pueden embutirse en resinas fluorescentes o coloreadas. De esta forma el microscopio mostrará todos los huecos del material como zona coloreada que destacan muy claramente sobre el fondo negro permitiendo un estudio más fácil y mucho menos sujeto a errores. En microscopía electrónica de barrido el estudio cualitativo se hace a partir de los diferentes tonos de gris que muestra la imagen (/38/, /39/ y /40/).

Otra técnica que se empieza a aplicar para el estudio de porosidad es la llamada Microscopía Láser confocal (/41/). Su característica fundamental es la eliminación de la luz dispersada, reflejada o fluorescente que no provenga del plano de foco. La imagen se forma plano por plano y como radiación de iluminación se utiliza un haz de luz láser. El método consiste en la iluminación de un punto del plano de foco colocado cada vez a una altura distinta. El resultado es una imagen en profundidad de una capa muy fina de la muestra (/41/).

Las técnicas basadas en Microscopía aportan información muy detallada de las características de los materiales en el caso de materiales homogéneos; en el caso que nos ocupa, la información es muy limitada debido a las propias características de los materiales estudiados. Los resultados obtenidos mediante microscopía se refieren a capas muy finas del material. En el caso de materiales con características porosas tan heterogéneas como las estudiadas, los resultados obtenidos mediante esta técnica pueden no ser representativos del material.

*** Porosimetría de mercurio**

La porosimetría de mercurio analiza la banda entre 10^{-3} y 10^{-4} m. El volumen de material se determina mediante inmersión de la muestra en mercurio. Como el mercurio no moja a la mayoría de los materiales, éste no penetra en sus poros. Después de hacer vacío sobre la muestra, se aplica una presión hidrostática con mercurio a la cámara que contiene la muestra. Poco a poco, el mercurio va aumentando a valores mayores. Como resultado, el líquido entra en la red porosa y, cuando la presión es suficientemente grande, en los poros más pequeños. De cualquier forma, la penetración no es nunca total porque para ello se

necesitaría una presión muy grande, y presiones demasiado grandes pueden dañar la estructura del material. Una vez alcanzada la presión máxima a la que se puede someter la muestra se ejerce una depresión sobre la misma. Durante todo el proceso, se registran los valores de presión y variación de peso de la muestra (/31/, /37/, /43/, /44/, /45/, /46/ y /47/).

Dullien (/31/), hace referencia al desarrollo, por Ritter y Drake en 1945, de la base de esta técnica para hacer medidas a altas presiones. Posteriormente, el método se generalizó y, en la actualidad, se utilizan porosímetros automáticos para exámenes de rutina de estructuras porosas de materiales.

Mediante esta técnica se obtiene un valor de porosidad absoluta del material (en %) así como una curva de distribución de tamaño de poros frente a la presión aplicada. Estas curvas se obtienen mediante diferenciación de las curvas de volumen acumulado frente a r . Su estudio permite predecir, mediante distintos modelos matemáticos, algunas propiedades físicas de los materiales relacionadas, por ejemplo, con la durabilidad de los mismos (/32/, /33/, /34/, /35/ y /36/).

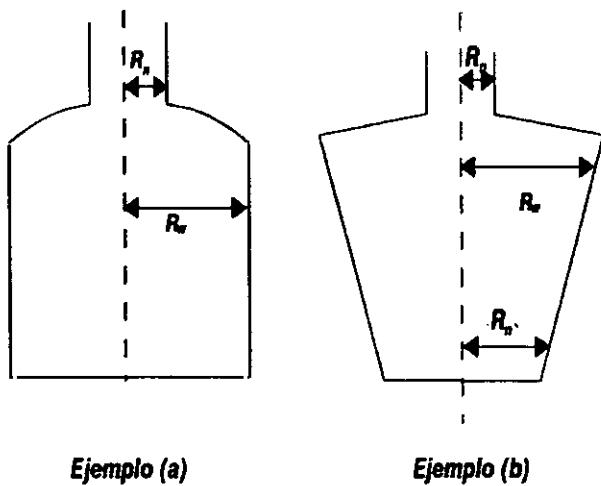
Esta técnica aporta información muy amplia sobre los tamaños de poro existentes en el material analizado (determina tamaños entre 10^{-8} y 10^{-4} m aproximadamente). En el caso de estudios de movimiento de agua en materiales de construcción cubre prácticamente todos los tamaños a considerar: materiales con poros de tamaños más pequeños tienen muy poca capacidad para absorber agua (salvo en el caso de que existan presiones externas que favorezcan su entrada) y, por tanto su secado por efecto de evaporación es muy rápido; en poros mayores, según las leyes físicas hasta ahora expuestas es difícil que pueda quedar agua retenida.

* Método BET

Los métodos de sorción (método BET) analizan la banda entre 10^9 y 10^7 m. El término adsorción fue introducido por Kayser en 1881 para indicar la condensación de un gas en las superficies libres de un material en contraposición con la absorción gaseosa en la que las moléculas del gas penetran en la masa del sólido absorbente. En 1909, McBain (/45/) propuso el término sorción para agrupar los conceptos de absorción en la superficie, absorción por penetración en la red del material y condensación capilar en los poros. Cuando un sólido se expone en un recinto cerrado a la acción de un gas o vapor a una presión dada, se empieza a observar en él el proceso de adsorción del gas, que se manifiesta en un aumento del peso del sólido y una disminución de la presión del gas. Pasado un cierto

tiempo, ambos parámetros se equilibran. Es evidente que la cantidad de gas o vapor adsorbido por el material debe estar relacionado con la cantidad de huecos (grietas, poros, roturas, etc) que contenga. Los resultados obtenidos mediante este proceso se presentan en gráficas llamadas isothermas de adsorción en las cuales se representa la cantidad de gas adsorbido frente a la presión relativa. Existen seis tipos de isothermas de adsorción que han sido profundamente estudiados por distintos autores. Para el estudio de porosidades se recomienda el uso de nitrógeno como adsorbente.

En cualquiera de los métodos antes expuestos, basados en la penetración forzada de gas en el material, los poros se consideran esféricos. Sin embargo, la forma de llenado de estos poros depende de la relación entre sus radios máximo y mínimo (/45/). Como ejemplo, se pueden considerar los casos representados en la figura I.2.



En el primer caso, se requerirá una presión muy grande para atravesar el tramo más estrecho, pero una vez superado éste, presiones mucho más pequeñas serían suficientes para llenar el volumen; tanto en un caso como en otro, la presión necesaria para atravesar el segundo tramo no sería suficiente para llenar el volumen total del material. En el caso (a) se estarían registrando volúmenes más pequeños y más numerosos de lo que realmente son, mientras que en el caso (b), los volúmenes registrados serían más grandes y menos numerosos que en realidad son. Como ya se ha indicado, la

Figura I.2 Ejemplos de penetración de fluidos bajo presión

red porosa del material es tan importante como la propia porosidad del mismo en lo que respecta a la relación degradación del material-humedad. En las técnicas disponibles de medida de la porosidad, la existencia de esta red porosa está introduciendo errores en su determinación.

Según lo expuesto previamente, en el apartado referente a Porosimetría de Mercurio, el volumen de mercurio $v(Hg)$, que entra en la muestra como resultado de la presión P aplicada, crece gradualmente a medida que dicha presión aumenta. Por lo tanto, el valor v_i correspondiente a una presión dada P_i indica el volumen de todos los poros que tienen un

radio mayor o igual que r_i . A este volumen se le denomina volumen de "poros acumulado". Esta definición es inversa a la que se utiliza en porosimetría BET, donde el volumen de poros acumulado, $\Sigma(\delta v_i)$, es el volumen de todos los poros de radio menor o igual que r_i . Por tanto, en Porosimetría de Mercurio, el volumen de poro acumulado decrece cuando r crece, mientras que en los métodos BET, crece al incrementar r . En ambas técnicas, las curvas de distribución de tamaños de poro se obtienen haciendo la derivada de las curvas de volumen acumulado frente a r (dv/dr frente a r) (/45/).

El uso combinado de las distintas técnicas antes mencionadas para el estudio de la porosidad de un material presenta un problema complejo porque cada una de los equipos trabaja con parámetros físicos distintos y muy difíciles de interrelacionar entre sí (/33/, /34/, /35/, /36/ y /37/). Así, por ejemplo, en los métodos de análisis de imagen se estudian áreas y diámetros o radios de círculos equivalentes, mientras que la porosimetría de mercurio, basada en la intrusión hidráulica en el material, mide el radio de intrusión hidráulica y los métodos de sorción, la fracción de poros rellenos por condensación capilar.

Conociendo el funcionamiento de las distintas técnicas, las características de los materiales y el tipo de poros a determinar se seleccionará la técnica más adecuada, o la combinación de aquellas que proporcione la información requerida.

I.4.2.b Permeabilidad

Se define como permeabilidad la propiedad que gobierna la variación de flujo de un fluido en un sólido poroso. Para flujos estacionarios, el coeficiente de permeabilidad K se determina a partir de la ecuación de Darcy, que ya se expresó en [I.2]. En este caso, la ecuación se puede reescribir como:

$$\frac{du}{dt} = K \frac{\Delta p s}{LV} \quad [I.4]$$

donde:

du/dt es la variación del flujo de fluido

V es la viscosidad del fluido

Δp es el gradiente de presión

s es el área de la superficie

L es el espesor del sólido

Los ensayos de permeabilidad en materiales de construcción consisten en medir en cada instante y para una presión hidráulica dada el volumen de un cierto gas que atraviesa el material. Estos ensayos se realizan sobre láminas de geometría determinada con aire, agua o vapor de agua. En general, y según se deduce de la ecuación anterior, la viscosidad del gas usado determina de alguna forma el valor de la permeabilidad del material. Además, y como la forma de atravesar la lámina de material es siguiendo su red porosa, este valor debe de estar relacionado de alguna forma con ella (/25/).

El flujo de un fluido a través de un material de construcción depende de distintos factores. Por una parte, interviene el tamaño de las moléculas del fluido. Por ejemplo, en el caso de hormigones, aún cuando se mantienen "constantes" las características del material estudiado, en el desarrollo del ensayo con distintos fluidos se obtienen valores dispares de permeabilidad. Así, se habla de permeabilidad al aire, al agua, etc.

Por otra parte, la permeabilidad del material consiste en la medida de la cantidad de fluido que atraviesa un determinado espesor del mismo. Este fluido debe seguir la red porosa del material y, por eso, es imprescindible establecer un espesor de la muestra que será una solución de compromiso entre el mínimo para el cual tiene sentido dicha medida y el máximo que el fluido es capaz de atravesar.

I.4.2.c.- Conductividad térmica

Otra magnitud de importancia en el estudio del deterioro de materiales por la presencia de agua es la conductividad térmica del material. La conductividad térmica de un material (λ) se define como la cantidad de calor que atraviesa por unidad de área y unidad de tiempo una sección de dicho material de caras planoparalelas cuando se establece entre ellas una diferencia de temperatura de 1°C. La Ley de Fourier establece la relación matemática entre esta constante física del material y las condiciones térmicas del mismo:

Dado un material de superficie s y espesor ΔL en el cual existe una diferencia de temperaturas entre sus caras dada por T_2-T_1 , el flujo de calor que atraviesa el material (en ausencia de efectos de borde) se define como (/49/):

$$v_Q = \kappa s \frac{dT}{dr} \quad [1.5]$$

donde:

v_Q es la velocidad del flujo de calor que atraviesa el material en J/seg.

s es la superficie del material en cm^2 .

dT es la diferencia de temperatura entre dos puntos separados un dr en $^{\circ}\text{C}$.

κ es la conductividad térmica del material en $\text{J}(\text{^{\circ}\text{C cm seg}})^{-1}$

Dadas las características del ensayo presentado, se puede considerar que solo hay flujo de calor según la dirección L . Por eso, la ecuación general de transmisión de calor se puede aproximar a (/48/ y /49/):

$$v_q = \kappa s \frac{dT}{dL} \quad [1.6]$$

Algunos ejemplos de conductividad térmica de materiales construcción se expresan en la tabla I.2. (/27/):

| Material | Conductividad Térmica ($10^{-3} \text{ J/seg m } ^{\circ}\text{C}$) |
|-----------------|---|
| Ladrillo | de 7.2 a 14.4 |
| Yeso | 7.2 |
| Vidrio | de 12 a 16.8 |
| Caliza | de 9.6 a 21.6 |
| Hormigón | de 4.8 a 7.2 |
| Arenisca | de 19.2 a 38.4 |
| Mármol | de 33.6 a 48 |
| Granito | de 31.2 a 67.2 |

Tabla I.2. Conductividad térmica de algunos materiales de construcción.

Existen distintos métodos de medida de la conductividad térmica. Dentro de los métodos de régimen permanente, el llamado Método de Poensgen, también llamado de la Placa Caliente Protegida ha sido el más usado y, concretamente en España, es la base de las normas de medida, puesto que con él se obtienen valores reproducibles y con un error del orden del 2.5%.

La medida de la conductividad térmica en materiales de construcción está normalizada (Norma UNE 92-202-86) aunque esta norma está limitada para los siguientes tipos de materiales:

- *Materiales homogéneos o mezclas granulosas compactas de granulometría sensiblemente continua y de dimensión máxima de grano no superior a 1/4 del tamaño de la probeta.*
- *Materiales fibrosos con entramado continuo y uniforme sin cámaras de aire superiores a 3 mm.*
- *Estructuras con alvéolos o celdillas estadísticamente repartidas con diámetros medios inferiores a 3 mm.*

Aunque es bien conocido el aumento de la conductividad térmica de los materiales de construcción cuando crece el contenido de agua en los mismos, no existe ningún método normalizado para la cuantificación de este incremento. La aplicación de la norma antes citada requiere la utilización de una cantidad de calor grande dado que los materiales de construcción son, en general, aislantes térmicos, como se muestra en la tabla I.2.; por tanto, no es válida para esta cuantificación, porque un calentamiento en una de las caras del material favorecerá la evaporación de agua dentro de él (ver tablas I.1 y I.2), y, por tanto, habría que considerar no solo un intercambio de calor entre el material y su entorno, sino también un intercambio de masa prácticamente imposible de cuantificar (/48/, /50/, /51/, /52/, /53/, /54/, /55/, /56/ y /57/).

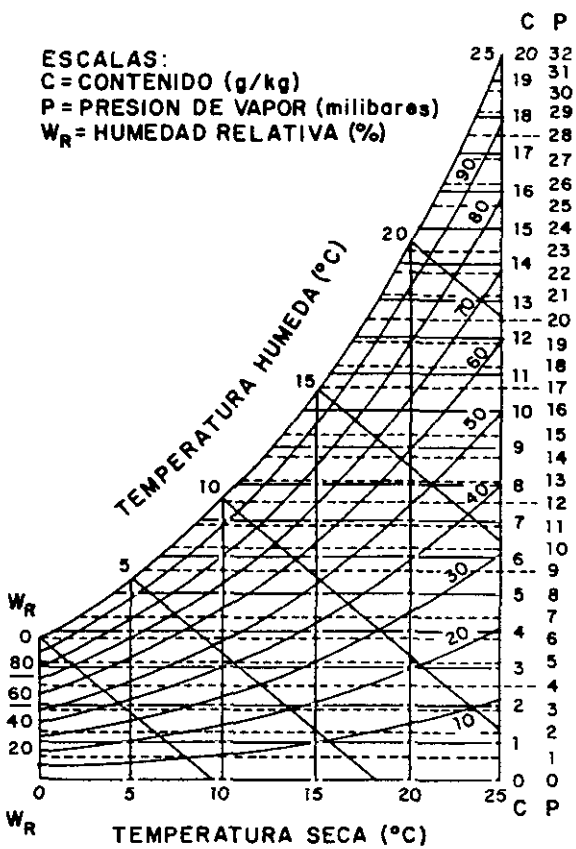
la medida de conductividad térmica en materiales de construcción con un cierto contenido de humedad podría determinarse usando sensores de alta resolución porque, en este caso, no es necesario un aporte importante de calor en el material para que ésta sea detectable por el sensor.

I.5.- Técnicas de medida de humedades en edificación

I.5.1.- Técnicas generales de medida

Una primera etapa para estudiar el estado de un edificio, cuando, previamente, se han detectado problemas de humedad, es el control de su ambiente y de las temperaturas superficiales en sus muros. Naturalmente, ambos factores determinan si el material está absorbiendo o cediendo agua a su atmósfera. La técnica más frecuente para el control ambiental es la del termohigrógrafo. Mediante estos equipos, se obtienen curvas de evolución de temperatura ambiente y humedad relativa en periodos previamente fijados de tiempo. Los resultados obtenidos para cada periodo de tiempo, llevados a un ábaco psicrométrico como el presentado en la figura I.3., permiten conocer los valores de temperatura de rocío, la humedad absoluta, etc (/1/). Se puede desarrollar una técnica similar basada en el uso de

sensores atmosféricos sensibles a los cambios de temperatura ambiente y humedad relativa. Las medidas obtenidas mediante este tipo de técnicas son valores promediados en espacio y tiempo y, por tanto, una información parcial del entorno del edificio. En la figura 1.4 se presenta las curvas psicrométricas usadas para este tipo de medidas. Estos datos se pueden complementar con medidas puntuales de distintos parámetros atmosféricos (temperatura, humedad relativa, humedad absoluta, temperatura de rocío, etc). Esto resulta un inconveniente importante en medidas en edificios donde lo deseable es conocer la evolución temporal de cada punto de la superficie estudiada para determinar el origen de la humedad.



Un problema importante en estos estudios es el control de las temperaturas superficiales de los muros, muchas veces necesario para determinar unívocamente el proceso que está ocurriendo en la parte del edificio que se estudia. Existen distintas técnicas capaces de determinar estas temperaturas, tales como termopares, resistencias de platino, o termómetros de contacto. En general, estos métodos pueden inducir errores en las medidas cuando no existe un equilibrio estable entre el objeto que se estudia y su atmósfera debido a las perturbaciones producidas por el contacto. Además, cualquier tipo de medida puntual implica el uso de muchos detectores para cubrir superficies relativamente grandes.

Figura 1.3 Ábaco psicrométrico

Otro inconveniente importante puede surgir al intentar aplicar este tipo de métodos en superficies donde el contacto puede deteriorar la superficie (por ejemplo, frescos o pinturas murales).

Existen, además, otras técnicas más sofisticadas para el estudio y detección de humedades en edificios. En general, todas ellas se pueden clasificar en dos grandes bloques atendiendo a su carácter destructivo o no destructivo. El primero de los grupos se refiere a una serie de técnicas basadas en el muestreo sobre el edificio y el análisis posterior de

dichas muestras en el laboratorio. Su carácter puntual y destructivo es el principal inconveniente para su aplicación. El valor histórico o artístico de los edificios en los que se pretende aplicar la técnica impide en muchos casos la toma de muestras y, aún cuando esto fuera posible, el número de ellas suele ser muy grande para que cualquier resultado tenga identidad como tal (/65/).

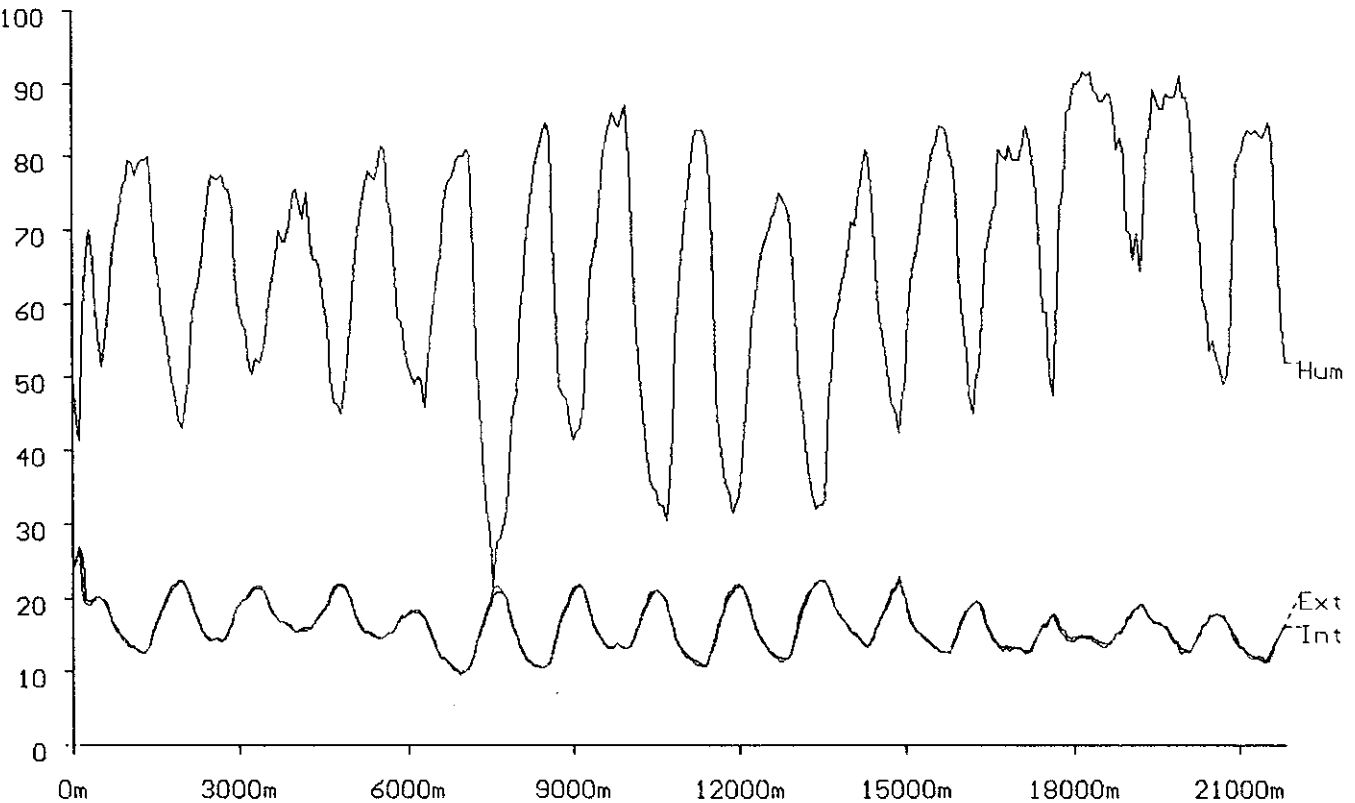


Figura I.4 Curvas psicrométricas obtenidas a partir de un sensor puntual donde HUM representa la curva de humedad relativa (en %) y EXT e INT las temperaturas registradas por los sensores interior y EXT al equipo respectivamente. Se representa el tiempo en minutos en el eje de abscisas y la humedad (en %) y la temperatura en °C en ordenadas.

También son múltiples las posibles técnicas no destructivas aplicables al estudio de problemas de humedad en edificios. Por una parte, las técnicas de contacto para la medida de temperaturas superficiales en muros o paramentos tienen como ventaja su carácter no agresivo para con el material pero siguen aportando valores puntuales de humedad. Además, en casos de equilibrio inestable entre el material y su entorno se pueden producir perturbaciones substanciales en los resultados obtenidos. Por tanto, un segundo requisito importante en la técnica "ideal" a aplicar sería que no necesitara el contacto físico con el material de estudio. Dentro de este segundo bloque, algunas de las técnicas más sofisticadas son las basadas en ultrasonidos y en microondas (/67/, /68/, /69/ y /70/).

Ambas técnicas se basan en el análisis de las ondas que, una vez emitidas, han atravesado, al menos parte del material. Así, se pueden estudiar ondas transmitidas, reflejadas o refractadas según los casos. En las técnicas basadas en ultrasonidos, se pueden producir dispersiones de la onda debido a la heterogeneidad de los materiales y problemas de acoplo en la onda debido a la diferencia de impedancias acústicas. Respecto al segundo método, además de problemas de acoplo y dispersión dados los altos valores de longitud de onda con los que se trabaja, pueden darse problemas de conducción por la presencia de agua, ruido y ecos (/67/). La ventaja principal de cualquiera de ellas es la capacidad de detectar agua en el interior del material, pero es necesario el conocimiento de la estructura que se estudia (/67/, /68/). Dadas las características de los materiales estudiados, este tipo de onda no tiene gran capacidad de penetración. Además, pueden producirse atenuaciones importantes debido a la existencia de cámaras de aire en el volumen del material. Finalmente, un último inconveniente importante es la accesibilidad de la zona que se estudia. Para obtener buena información de un elemento constructivo, es necesario colocar emisor y receptor en las dos caras perpendiculares del elemento (para recoger la onda emitida directa). Esto, en muchas ocasiones es inviable debido a las características de la zona que se desea estudiar (muros sin acceso por una de sus partes, bóvedas, tejados, etc).

I.5.2. La Termografía Infrarroja

La radiación infrarroja emitida por un cuerpo proporciona información característica de la materia que constituye dicho cuerpo y del estado en que se encuentra.

Por medio de un sistema apropiado de adquisición y tratamiento de esta radiación, se pueden obtener y caracterizar ciertos parámetros que difícilmente podrían obtenerse a partir de otras fuentes de información.

Dentro de los múltiples sistemas de adquisición y tratamiento de esta radiación, los llamados "Sistemas de Teledetección" o de determinación a distancia de estos parámetros permiten obtener información a partir de la radiación infrarroja desde puntos alejados del foco radiante a estudiar. Uno de los sistemas típicos de teledetección infrarroja son los llamados dispositivos de termografía infrarroja.

La termografía es un método que permite la adquisición de los fenómenos unidos a la distribución espacial de calor en los objetos examinados, al igual que la variación de esta distribución con el tiempo. Cualquier proceso relacionado con la presencia de humedad en un elemento de construcción se pondrá de manifiesto mediante esta técnica, ya que, está

relacionado, de una u otra forma con variaciones de temperatura en su superficie. Existen distintos agentes que hacen muy útil su aplicación en este campo. Como características fundamentales se pueden destacar su carácter no destructivo, su aplicabilidad a pie de obra ó la capacidad de la técnica para ofrecer la información mediante planos de líneas isorradiantes de la superficie (llamados termogramas).

1.5.2.a.- Radiación infrarroja

La radiación infrarroja corresponde a ondas electromagnéticas generadas por el movimiento de enlaces moleculares (tanto de vibración como de rotación). Este tipo de movimiento se manifiesta en todos los cuerpos cuya temperatura sea mayor que 0 °K, emitiendo todos ellos radiación infrarroja. La banda de radiación infrarroja o térmica ocupa el intervalo de longitudes de onda entre 0.7 μm y 1000 μm como se indica en la figura I.5 (/71/).

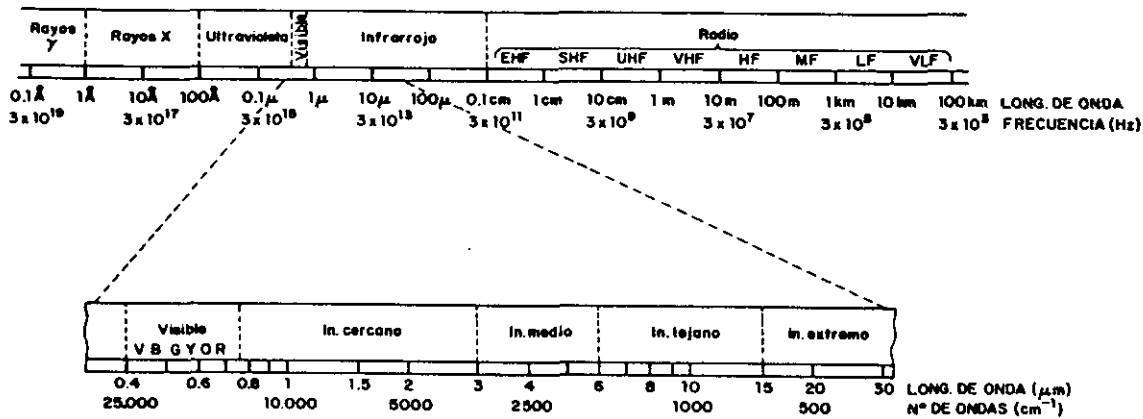


Figura I.5 Espectro electromagnético

La energía radiante se determina por las condiciones de superficie y de temperatura de un objeto, y, el estudio de éstas, se hace suponiendo un objeto ideal, llamado cuerpo negro, que absorbe radiaciones en todas las longitudes de onda. Teóricamente se encuentra que solo los cuerpos negros emiten espectros térmicos de características universales. Los llamados cuerpos negros absorben (y, por tanto, emiten) toda la radiación recibida (/71/, /72/ y /73/).

La radiancia espectral, que es la radiación térmica emitida por un cuerpo negro, es función de la temperatura y la longitud de onda y se describe mediante la ley de Planck:

$$E_{\lambda,T} = \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)} \quad [1.7]$$

donde:

$E_{\lambda,T}$ es la radiancia espectral del cuerpo negro a la longitud de onda λ (μm) y la temperatura T ($^\circ\text{K}$)

c_1 es la primera constante de radiación ($=3.7415 \pm 0.0003 \cdot 10^4 \text{ Wcm}^{-2}\mu^4$)

c_2 es la segunda constante de radiación ($=1.4388 \pm 0.0002 \cdot 10^4 \mu^\circ\text{K}$)

λ es la longitud de onda en μm

T es la temperatura termodinámica en $^\circ\text{K}$

En la figura I.6., se representa la intensidad espectral de la radiación (71/).

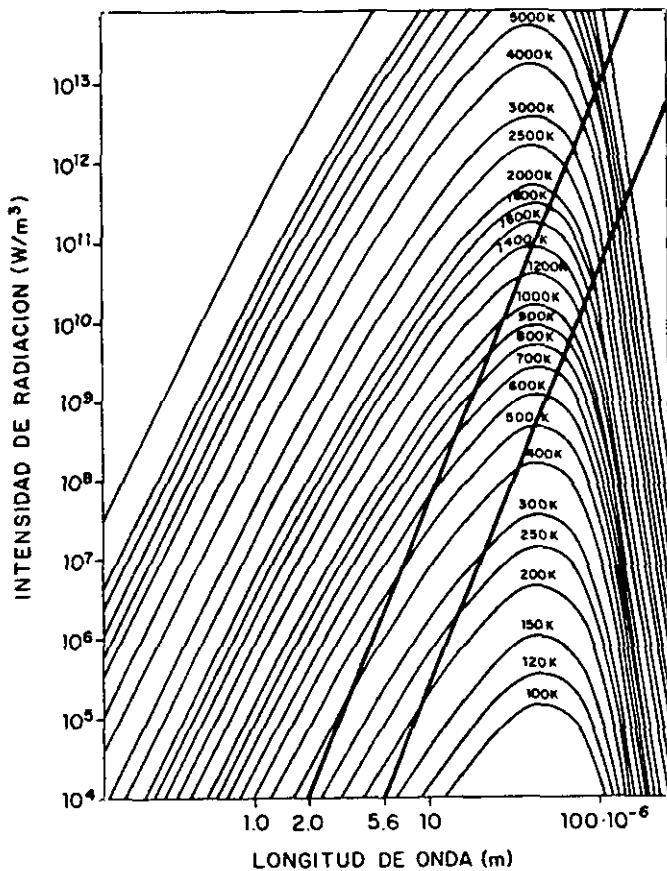


Figura I.6 Intensidad espectral de la radiación

La integral sobre todo el espectro de longitudes de onda de la ecuación [1.10] se conoce como ley de Stefan y expresa la energía total radiada por un cuerpo negro en todo el espectro de longitudes de onda:

$$E = \sigma T^4 \quad [1.8]$$

donde:

σ es la constante de Steffann-Boltzmann = $(5.670 \pm 0.003) 10^{-12} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

T es la temperatura termodinámica del cuerpo en $^{\circ}\text{K}$

Del análisis de máximos de radiación de la Ley de Planck se obtiene la Ley de desplazamiento de Wien:

$$\lambda_{\text{máx}} T = \text{cte} \quad [1.9]$$

donde $\lambda_{\text{máx}}$ es la longitud de onda en μm para la cual, a una temperatura T dada en $^{\circ}\text{K}$, la radiancia espectral alcanza su máximo valor.

La ley de radiación de Planck es el fundamento físico de muchas técnicas de medida de temperatura. Si lo que se mide es la radiación total emitida, según la Ley de Stefan (ec. [1.8]) las energías emitidas por dos fuentes están en razón de la cuarta potencia de su temperatura. Sin embargo, la medida de la radiación de la mayoría de las fuentes es difícil, debido a su carácter no puntual, y se mide la radiancia en una banda finita de longitudes de onda o una radiación monocromática de longitud de onda λ conocida..

Por otra parte, un cuerpo negro es una idealización física de un fenómeno. En la naturaleza no existen cuerpos negros "puros" y es necesario cuantificar de alguna forma lo que los materiales se separan de este carácter ideal. La proporción de energía emitida (en tanto por uno) por un cuerpo se denomina emisividad (ϵ) y es función, como la energía radiante, de la temperatura del cuerpo y de la longitud de onda. Por definición, un cuerpo negro tendrá emisividad 1. Según las bases de la Física Cuántica si se consideran dos cuerpos opacos separados por una distancia grande y colgados por hilos finos en una cámara a temperatura constante habrá un intercambio de calor entre ellos debido únicamente a efectos de radiación. Si e_i es la razón de emisión de energía de cada uno de los cuerpos y a_i la razón de absorción, se demuestra:

$$\frac{e_1}{a_1} = \frac{e_2}{a_2} = 1 \quad [1.10]$$

Esta relación se conoce como Ley de Kirchhoff. Si uno de los cuerpos (por ejemplo, el cuerpo 1) es un cuerpo negro, se tendrá que $a_1 \geq a_2$, y, por tanto, $e_1 \geq e_2$. Lo cual indica que los cuerpos más absorbentes son mejores emisores de radiación.

Resulta también importante tener en cuenta la relación entre los factores de absorción reflexión y transmisión de un cuerpo. En la figura 1.7. se representa el comportamiento de una radiación R_{inc} cuando penetra en un medio (medio 2) con características distintas al inicial (medio 1)

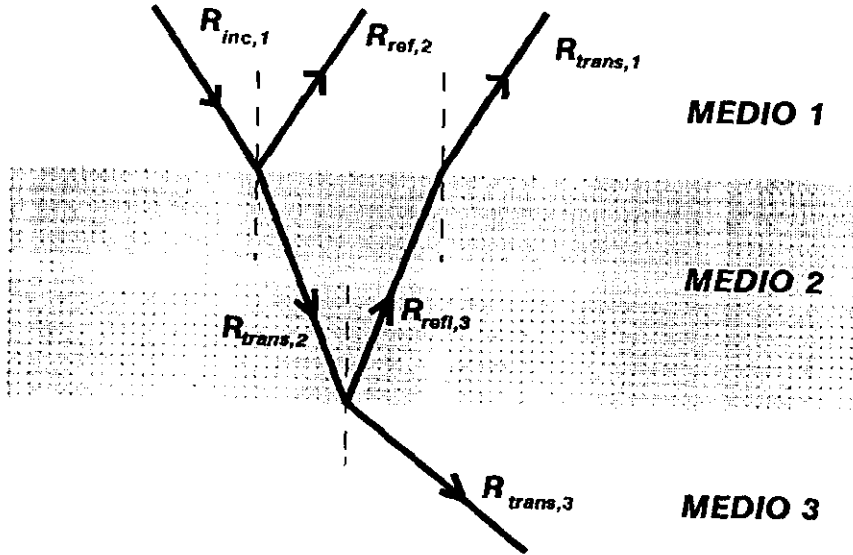


Figura 1.7 Comportamiento de la radiación al atravesar un medio material

Cuando se analiza la radiación emitida, reflejada o transmitida por un cuerpo, es importante considerar las posibles pérdidas producidas por estos efectos. En el caso que nos ocupa, cualquier elemento constructivo se puede considerar como un sistema de capas en el cual, la radiación transmitida sufrirá los efectos antes explicados.

1.5.2.b.- Equipos infrarrojos

Para cualquier tipo de equipo infrarrojo se pueden considerar los siguientes elementos generales (/71/, /72/ y /73/):

1.- **Fuente emisora de radiación.** En nuestro caso se trata del propio material estudiado. En general, toda la investigación se centrará en evaluar las diferencias entre las señales emitidas por distintas partes de una superficie para determinar los posibles factores que producen el deterioro del material.

2.- **Medio de transmisión de la radiación.** En nuestro caso, se trata de la atmósfera. Cualquier propiedad de la misma capaz de perturbar la información emitida será estudiada con posterioridad.

3.- **Detector.** Determina la banda del infrarrojo en la que se está realizando la medida. Es importante considerar las bandas de emisión de los materiales que se desea estudiar. Lo más deseable es trabajar en la banda del infrarrojo donde el cuerpo a analizar tiene máxima emisión.

4.- **Sistema de análisis** Transforma la señal recogida en un mapa de radiación.

Cada uno de los elementos antes expuestos se analizarán en profundidad en puntos posteriores.

*** Detectores infrarrojos**

Los detectores infrarrojos pueden clasificarse dentro de dos grandes grupos:

- Detectores térmicos
- Detectores cuánticos

Los **detectores térmicos** hacen uso de la energía infrarroja como calor. Esto implica que la responsividad es independiente de la longitud de onda y que no requieren refrigeración. Su tiempo de respuesta, por otro lado, es baja y su detectividad es menor que la de los detectores cuánticos. Dentro de este grupo se encuentran los siguientes detectores:

Termopilas. Es el tipo de detector infrarrojo más antiguo y utiliza fuerzas termoelectromotrices generadas entre dos tipos diferentes de conductores (pueden ser tanto metales como semiconductores).

Bolómetros. Son resistores en los que cambia la resistencia cuando incide sobre ellos una radiación infrarroja.

Detectores Pneumáticos. hay dos tipos de detectores:

- * Celdas de Golay.
- * Capacitores

En el primer caso, un recipiente lleno de gas xenon se expande cuando actúa sobre él una radiación infrarroja. El resultado de esta variación de presión actúa sobre un espejo localizado sobre una fuente de luz y una fotocelda, variando la cantidad de luz que entra en ella y cambiando, por tanto, su señal de salida.

En el segundo caso, la variación de expansión del gas afecta a un film que recoge las variaciones de capacidad electrostática.

Detectores piroeléctricos. Cuando incide una radiación infrarroja en un cristal varía su temperatura. En la superficie del cristal se genera entonces una carga eléctrica variable según la variación de temperatura.

Los detectores cuántico tienen alta detectividad y rápida respuesta. La responsividad depende de la longitud de onda y, en general, necesitan refrigeración. Estos detectores se clasifican en dos tipos:

Detectores de tipo intrínseco La banda de longitudes de onda de detección está determinada por la energía del gap y su responsividad cae drásticamente cuando se superan los límites de longitudes de onda.

Los detectores fotoconductores, cuya conductividad cambia cuando incide sobre ellos una radiación infrarroja, tienen alta responsividad y permiten un procesado simple de la señal. Los detectores fotovoltaicos generan una corriente eléctrica cuando incide la radiación infrarroja, y tienen alta responsividad y rápida velocidad de respuesta.

A este grupo de detectores intrínsecos pertenecen también los detectores HgCdTe y PbSnTe. En estos casos, el pico de responsividad puede cambiar controlando la composición de la mezcla ternaria.

Detectores de tipo extrínseco. Son detectores fotoconductores cuyos banda de longitudes de onda de detección se determina por el nivel de impurezas dopadas en semiconductores de Ge o Si. La principal diferencia con los detectores de tipo intrínseco son las temperaturas de funcionamiento. Los detectores de tipo extrínseco deben enfriarse por debajo de la temperatura del helio líquido. A este grupo pertenecen los detectores de InGaAs, PbS, PbSe, InSb y HgCdTe.

Los parámetros físicos que definen un detector infrarrojo son:

Respuesta o responsividad (responsivity) Los detectores proporcionan, en general, una señal eléctrica S proporcional a la potencia incidente P . Se puede definir un coeficiente de proporcionalidad, válido mientras no haya saturación, entre la variación de la señal ΔS correspondiente a la variación ΔP de la potencia.

Si la potencia es una función del tiempo, se define por la raíz cuadrada del valor cuadrático medio P expresado en vatios. La señal correspondiente se medirá también por la raíz cuadrada de su valor cuadrático medio S en voltios. La respuesta será:

$$R_v = \frac{S}{P} \dots \quad [1.11]$$

La responsividad está definida para una cierta frecuencia de modulación de la potencia P y por el espectro de radiación característico. Depende también de la temperatura de trabajo, de la corriente ó campo de polarización del detector, etc.

Potencia mínima detectable (Noise Equivalent Power). Cuando el detector no recibe ninguna energía incidente, subsiste una señal errática R que es ruido del detector (el ruido del amplificador asociado se supone despreciable). Este ruido limita la potencia mínima detectable que es la potencia incidente para la cual el valor eficaz de la señal es igual al valor cuadrático medio del ruido. El ruido es proporcional a la raíz cuadrada del de la banda pasante Δf del amplificador. Si $\Delta f \ll f$, se considera habitualmente la potencia equivalente al ruido de una banda pasante de 1 Hz.

$$\text{N.E.P.} = \frac{P \cdot R}{S \cdot \sqrt{\Delta}} \quad [1.12]$$

medida en $W \text{ Hz}^{-1/2}$

Detectividad específica. Se llama detectividad D a la inversa de NEP:

$$D = S \frac{\sqrt{\Delta f}}{P R} \quad [1.13]$$

En general, la potencia mínima detectable es proporcional a la raíz cuadrada de la superficie A del elemento sensible del detector. La detectividad Específica es la detectividad referida a un detector de 1 cm^2 de superficie

$$D^* = S \frac{\sqrt{A \Delta f}}{P R} \quad [1.14]$$

medida en $\text{cm}^2 \text{ W}^{-1} \text{ Hz}^{1/2}$

la detectividad es un parámetro que depende fuertemente de las condiciones de empleo y medida (naturaleza de la radiación, frecuencia de modulación, temperatura de funcionamiento del detector, apertura de campo tensión de polarización, etc).

En general, las condiciones de medida de D^* se expresan de forma $D^*(A,B,C)$ donde A es la temperatura (en $^{\circ}\text{K}$) o la longitud de onda de la radiación en ($m\mu$) de una fuente radiante, B la frecuencia de choqueo y C la anchura de banda en el filtrado de la señal.

Lo más habitual para caracterizar detectores es definir D^* a la longitud de onda a la que $D(\lambda, f, \Delta f)$ se hace máxima. A esta longitud de onda se le llama λ_p y la detectividad específica se expresa entonces como $D^*(\lambda_p, f, \Delta f)$.

Según la Ley de Planck, los detectores de radiación y todos los elementos ópticos que les rodean (diafragma, lentes, etc), emiten radiación en la misma banda en la que son sensibles. Para disminuir la radiación emitida tanto por el detector como por los elementos cercanos a él, y, por tanto, aumentar su detectabilidad es necesario reducir su temperatura hasta valores tales que la emisión propia sea despreciable (/71/ y /73/).

Existen en el mercado cámaras infrarrojas equipadas con distintos tipo de sensores: InSb (fotovoltaico) o HgCdTe (fotoconductor). La banda de detección infrarroja así como el tipo de sistema de refrigeración varía para cada tipo de sensor. En general, existen termocámaras con respuesta espectral entre 2 y 5.6 μm o con respuesta espectral entre 8 y 12 μm (/74/ y /75/). En el presente trabajo, se ha utilizado una termocámara de primera generación dotada de un sensor de InSb y respuesta espectral en la banda de 2 a 5.6 μm .

En general, los detectores de InSb son sensibles en la banda 0-5.6 μm a 77 K de temperatura pero, el límite inferior de detección de la cámara está determinado por el uso de lentes de Ge en 2 μm . En la figura I.8. se muestra la transmitancia espectral para el Ge (de espesor 2mm) y la detectabilidad relativa del InSb (/75/). La refrigeración del sistema se realiza mediante nitrógeno líquido.

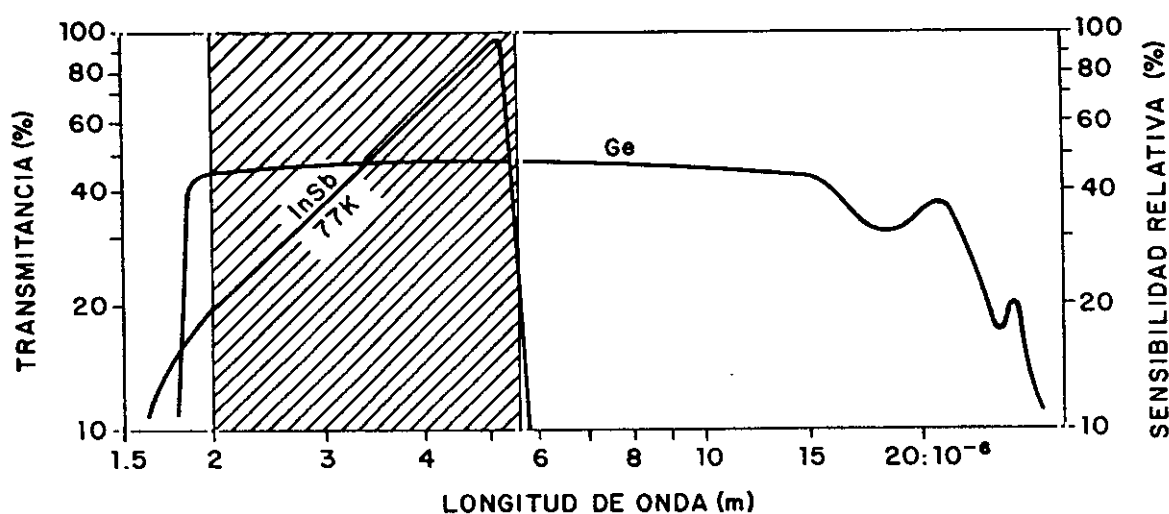


Figura I.8 Transmitancia espectral del Ge y detectabilidad relativa del InSb

*** Medio de transmisión**

El medio de transmisión de las señales infrarrojas detectadas por una termocámara es el aire. Dichas señales pueden sufrir fenómenos de extinción (atenuación y/o "scattering") dificultándose su detección. Tales efectos ocurrirán en dos casos generales:

- * Cuando la distancia entre detector y emisor es muy grande
- * Cuando la región atmosférica situada entre ambos contiene un número muy grande de partículas, aunque la distancia fuente y detector sea pequeña.

Estos factores tienen una importancia destacada en la presente investigación. Su estudio y las posibles formas de anular o cuantificar su efecto constituyen una de las partes principales del presente trabajo de tesis. Por eso, el tratamiento en profundidad de tales fenómenos será considerado posteriormente.

*** Filtros interferenciales**

Los filtros interferenciales permiten detectar una banda determinada del espectro. Se pueden clasificar por sus características de transmisión o por los fenómenos en los que se basa su acción. Un filtro de paso de onda larga transmite toda la radiación con longitudes de onda mayores que un valor específico; un filtro con paso de onda corta permite el paso de toda la radiación con longitudes de onda menores que un valor específico; un filtro paso de banda transmite sólo entre las dos longitudes de onda especificadas.

La descripción de filtros interferenciales y las características de sus curvas de transmisión no ha sido "standarizada". A continuación se presentan los términos más ampliamente utilizados para su descripción (/71/). En la figura 1.9 se presentan las características principales (/71/).

Paso de banda (Passband) es el primer intervalo de longitud de onda de transmisión en un filtro de transmisión o de reflexión en un filtro de reflexión.

Stopband es la primera región de reflexión de un filtro interferencial

Background Regions son regiones de baja transmisión o reflexión en un filtro de transmisión.

Center Wavelength (λ_0) es la longitud de onda en el centro del paso de banda. En filtros interferenciales, λ_0 es, generalmente, el valor medio de las longitudes de onda de corte.

Bandwidth o Halfwidth (HW) es el ancho total del paso de banda a la mitad de su altura máxima. Normalmente se expresa como porcentaje de λ_0 .

Basewidth (BW) es el ancho del paso de banda a un valor pequeño (en general el 1% o el 3%) del pico de transmitancia. Es más preciso y útil expresar, por ejemplo, el 3% del ancho como $(\Delta\lambda)_{0.03}$. En este caso, HW se convierte en $(\delta\lambda)_{0.5}$.

Peak transmittance (τ_p) es la transmitancia máxima del paso de banda. Para filtros interferenciales se suele especificar como porcentaje de la transmitancia del sustrato.

Substrate transmittance (τ_s) es la transmitancia del sustrato

Free Filter Range (FFR) es el intervalo de longitudes de onda por encima del cual el ruido es menor que una cantidad especificada.

Cutoff y Cuton Wavelengths (λ_c) son las longitudes de onda límite del paso de banda.

Slope es la aproximación lineal a la pendiente de cutoff o cuton. Se suele expresar como $(\lambda_{0.8} - \lambda_0)/\lambda_c$ donde $\lambda_{0.8}$ es la longitud de onda al 80% de transmisión.

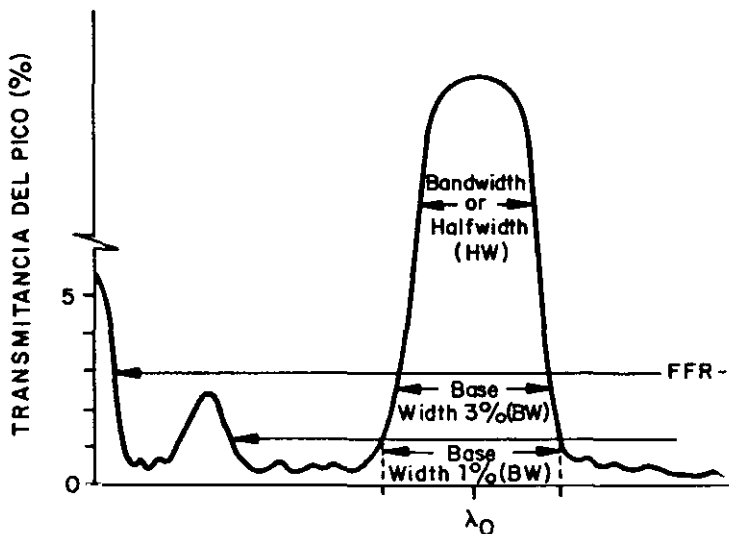


Figura I.9 Nomenclatura de un filtro interferencial

I.5.2.c.- Equipos de Termografía Infrarroja

Una cámara de Termografía Infrarroja reproduce en un monitor la radiación térmica total (emitida, reflejada y transmitida) procedente del cuerpo que se estudia en forma de una imagen llamada termograma. En las figuras I.10. y I.11., se representan los elementos básicos de una termocámara y el camino recorrido por los rayos en ella (/73/) y /74/).

Las cámaras de termografía están equipadas con un sistema de análisis que permite la medida de los flujos energéticos emitidos por un gran número de puntos de la superficie de estudio y forma a partir de ellos un mapa de radiación de dicha superficie (/74/, /75/).

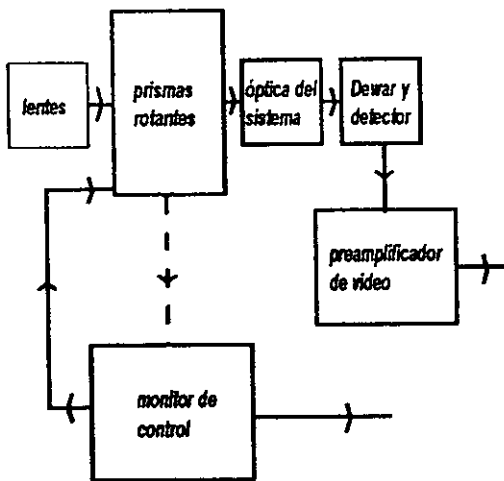


Figura 1.10 Elementos básicos de una termocámara

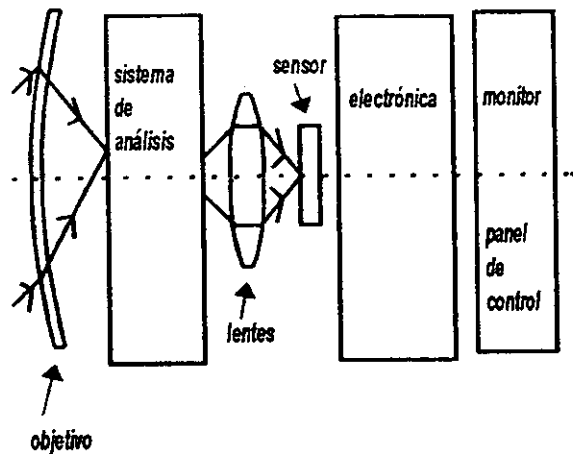


Figura 1.11 Camino recorrido por los rayos en una termocámara

Se puede considerar que las aplicaciones prácticas de la radiación térmica surgieron entre los años 1900-1920. Los primeros intentos para la detección de personas, barcos o icebergs fueron desarrollados en este período aunque fue durante la Primera Guerra Mundial cuando se produjeron avances espectaculares en este campo. En general, todos los sensores usados hasta este momento estaban basados en la idea del bolómetro. En el período de entreguerras la detección mediante termografía infrarroja fue desarrollada únicamente como tecnología militar. Se desarrollaron nuevos detectores, los llamados convertidores de imagen que supusieron una revolución en la investigación. Estas técnicas se denominaron "sistemas de imagen térmica activa" porque necesitaban de radiación externa para su aplicación. Fue durante la Segunda Guerra Mundial, y también dentro del ámbito militar, cuando se desarrollaron las "sistemas de imagen térmica pasiva" apoyados en la gran sensibilidad de los detectores fotónicos. En la década de los cincuenta, la termodetección dejó de ser secreto militar. Fue también en este período cuando se desarrollaron los detectores cuánticos. La buena sensibilidad de estos detectores y sus breves tiempos de respuesta han permitido el desarrollo de sistemas muy sofisticados y aplicables a campos muy diversos de la ciencia y de la industria (/71/, /72/ y /73/).

1.5.2.d.- Aplicación de la Termografía Infrarroja a la edificación

El uso de la Termografía Infrarroja para la detección de defectos relacionados en general con el aislamiento de edificios (zonas carentes de aislante, puentes térmicos) se remonta a la década anterior (/75/-/91/). Posiblemente, dentro del estudio de problemas relacionados con la edificación, sea ésta la aplicación más inmediata de la técnica. El

estudio en estos casos se basa en la identificación de zonas isorradiantes con zonas isotermas, obteniéndose así un mapa fácilmente interpretable del elemento de construcción estudiado (/75/, /76/, /77/). De cualquier forma, el uso de la Termografía Infrarroja se ha desarrollado, independientemente de su aplicación, en dos vertientes.

Por una parte, se pueden mencionar las técnicas de tratamiento de imagen que, además de facilitar el trabajo de detección y mejorar el estudio de las termografías (y, por tanto, evitar errores), generalmente, llevan acoplados programas informáticos para el tratamiento de datos (/80/, /81/ y /82/). Por otra parte, muchos trabajos de campo se complementan con el uso de otras técnicas que, generalmente, miden temperaturas superficiales (/83/, /84/, y /91/). En estos casos, el uso de una u otra técnica está condicionado por la precisión que se necesita en la medida, por lo que se desea detectar y por factores puramente logísticos (accesibilidad de la zona a medir, posibilidad de usar grandes equipos, etc).

La aplicación de la Termografía Infrarroja a la detección de humedades en edificación es un problema sumamente complejo ya que en este caso no es inmediata la identificación de zonas isorradiantes y zonas isotermas debido a la variación de la emisividad del cuerpo con el contenido de humedad.

Las técnicas para la medida de una de las variables en laboratorio son también múltiples y no solo desarrolladas para el campo de la construcción, aunque, en general, también válidas para este caso. En general, la Termografía se puede complementar con otras técnicas para la medida de temperatura superficial o con el uso de referencias de emisividad conocida (/87/, /88/, /89/ y /90/). En el primer caso, como ya se ha expuesto antes, la Termografía se utilizaría como medidor de emisividad, mientras que en el segundo se utilizaría como medidor de temperatura superficial.

Los primeros trabajos aplicados a detección de humedades en materiales de construcción usan otras técnicas que permiten la cuantificación de humedad como soporte a la Termografía (/92/-/97/)). Las posibles zonas mojadas en un elemento de un edificio se distinguen de otras anomalías principalmente por la forma que presentan (/92/). En la actualidad se empiezan a desarrollar métodos de medida más elaborados que, en general, requieren de una modelización previa del proceso que se desea estudiar (/95/ y /96/). Algunos autores (/94/), sobre todo en trabajos de laboratorio, utilizan referencias de emisividad conocida como complemento a la Termografía. En otros casos, más relacionados con materiales de construcción (/96/) se considera una emisividad constante para todos los

materiales de construcción y próxima a la unidad. Esta aproximación (/97/) está avalada por el hecho de que el error introducido por otros factores no evitables es muy superior a las pequeñas variaciones que puede sufrir la emisividad del material con el contenido de agua.

Por otra parte, distintos autores han estudiado la posibilidad de introducir mejoras técnicas, válidas solo para el problema específico que les ocupa, que permitan una mejor detección mediante Termografía. En el tema concreto objeto del presente trabajo, el comportamiento del agua como material emisor de radiación infrarroja es de vital importancia. R. Schickert (/98/ y /99/) empieza a aplicar el llamado método de Reflectografía Infrarroja para el estudio de defectos en la edificación mediante Termografía. Mediante esta técnica se aprovecha la banda de emisión del agua en 3 μm para favorecer la detección mediante Termografía.

Capítulo II: Objetivos propuestos

El objetivo fundamental que se pretendía alcanzar al inicio de este trabajo de tesis, consistía en desarrollar la Termografía Infrarroja como técnica de estudio no destructivo para su aplicación a la detección de humedades en Monumentos del Patrimonio Históricos y Cultural.

El trabajo realizado consta de tres partes claramente diferenciadas que han merecido el planteamiento de objetivos específicos diferentes:

II.1.- Objetivos concretos relacionados con la técnica

En primer lugar hay que destacar que la aplicación de cualquier técnica al estudio de un problema concreto, requiere una adecuación específica del equipamiento disponible al problema que se va a abordar. En este sentido se planeó una actuación que permitiera:

** Conocer y evaluar cuantitativamente todas aquellas variables que conforman el ruido de fondo de una medida tales como: distancia cámara-objeto, atenuación atmosférica, existencia de radiación externa no controlada (tanto solar como de fuentes artificiales), efecto de borde, factor de forma, ángulo de incidencia de la radiación, etc. Anular la influencia de estos parámetros no será siempre posible en medidas in-situ y, por eso, resulta muy conveniente establecer el efecto de cada uno de ellos en medidas en laboratorio.*

** Establecer los principios de lo que en lo sucesivo se llamará Termografía Infrarroja Selectiva, basada en el uso de filtros interferenciales capaces de limitar la banda de detección de las termocámaras.*

Mediante esta técnica, basada en el uso de filtros interferenciales capaces de limitar la banda de detección de la termocámara, se persigue la anulación de efectos producidos por la atenuación atmosférica, así como la determinación de variaciones en la velocidad de evaporación en un material dado según el tipo de material, la disolución que actúa, etc.

** Facilitar la detección de agua en los materiales mediante el uso de una fuente de radiación controlada externa.*

II.2. Objetivos concretos relacionados con el estudio de los movimientos de agua en los materiales

** Establecimiento de modelos matemáticos capaces de explicar los fenómenos físicos relacionados con el movimiento de agua a través de los materiales porosos (evaporación, capilaridad, difusión, etc).*

** Evaluación experimental de los modelos a través de la Termografía Infrarroja. Estudio de la influencia de la temperatura del agua y de la presencia de sales.*

II.3. Objetivos concretos relacionados con la aplicación "in situ" de la Termografía Infrarroja a la medida de humedad en algunos ejemplos de monumentos del Patrimonio Histórico y Cultural

** Establecer la metodología más adecuada para hacer medidas "in-situ".*

** Selección de locales, salas, etc, preferentemente situados en edificios pertenecientes al Patrimonio Arquitectónico Español, que presenten claros síntomas de estar afectados por problemas de humedades y en los que se aplique la metodología establecida.*

** Evaluación del método a través del análisis de los resultados.*

Capítulo III: Experimentación y resultados

Para desarrollar la presente memoria de tesis, orientada al estudio de humedades en Monumentos del Patrimonio Histórico mediante Termografía Infrarroja, se han considerado tres puntos generales a estudiar. En el primero de ellos se desarrollan todos los aspectos relacionados con la propia técnica. Se incluye, en este punto, tanto la puesta a punto del equipo como el desarrollo de modificaciones a la misma que contribuyen a un mejor estudio de los materiales mojados.

El segundo se refiere a la caracterización de los materiales usados así como a los estudios (realizados principalmente con Termografía Infrarroja) orientados a determinar el movimiento del agua dentro de ellos.

Finalmente, en una tercera parte, los conocimientos obtenidos se aplican a casos prácticos de Monumentos de nuestro Patrimonio aquejados de problemas de humedad.

III.1.- Técnica

III.1.1.- Calibrado del equipo

*Una cámara de termografía (termocámara) mide la radiación total, en una banda específica de longitudes de onda, procedente de un cuerpo en un sistema de unidades llamado **Unidades Isotermas**. El equipo muestra una imagen de la superficie estudiada que se llama **termograma**. En dichos termogramas, cada color (o distinto tono de gris, en el equipo usado en el presente trabajo) representa un valor de radiación distinto. Según lo explicado en el punto 1.5.2, la radiación detectada por una termocámara procedente de un cuerpo negro estará expresada por la integral de la Ley de Planck en la banda de longitudes de onda de trabajo de la termocámara:*

$$E = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\lambda,T} \varepsilon_{\lambda,T} d\lambda \quad \text{[III.1]}$$

donde:

$E_{\lambda,T}$ es la radiancia espectral de un cuerpo negro a temperatura T y en función longitud de onda λ .

$\varepsilon_{\lambda,T}$ es la emisividad del cuerpo a la temperatura T y en función de la longitud de onda λ .

La curva que define el comportamiento de la radiación infrarroja que, procedente de un cuerpo negro, detecta la termocámara se obtiene integrando la ecuación [III.1] en la banda λ_1 - λ_2 (banda de detección de la termocámara) y será (/71/, /72/, /73/ y /74/):

$$R = \frac{A}{e^{\frac{B}{T}} - 1} \quad \text{[III.2]}$$

donde:

A y B son las constantes de calibración del equipo. A se mide en unidades de radiación y B en $^{\circ}\text{K}$.

T es la temperatura superficial del cuerpo en $^{\circ}\text{K}$.

La ecuación [III.2] se usa para determinar las curvas de calibración de la termocámara. Estas curva se obtienen midiendo la radiación emitida por un cuerpo negro a distintas temperaturas y ajustando los resultados obtenidos a un modelo como el de la ecuación [III.2]. Las medidas se realizan colocando la termocámara perpendicular al cuerpo negro en una atmósfera "standard" (20°C y 35% de humedad relativa) y a una distancia suficientemente pequeña para minimizar las pérdidas por atenuación atmosférica. Una vez conocidos los valores de las constantes A y B se pueden calcular los valores de temperatura superficial a partir de cualquier valor de radiación emitida por un cuerpo negro.

| | |
|---|--|
| Rango de temperaturas | de 25°C a 1000°C |
| Precisión | $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ |
| Estabilidad | $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ |
| Elemento sensible | Resistencia de platino |
| Apertura de la cavidad | 2.54 cm de diámetro |
| Emisividad de la cavidad | $99\% \pm 1\%$ |
| Termopares de control de la temperatura de la cavidad | Platino-platino con 10% de rodio |

Tabla III.1 Características del cuerpo negro usado en la calibración

En la figura III.1. se presentan las curvas de calibración de la termocámara usada en el presente trabajo.

La calibración de la termocámara se realizó cada año aproximadamente. Además, se efectuaron controles de la desviación que pudieran sufrir dichas curvas en periodos de tiempo más pequeños, variables según la cantidad de medidas realizadas con el equipo. Estos últimos controles de las curvas de calibración del equipo se realizaron usando una resistencia calibrada a través de la cual se hacía pasar distintas intensidades de corriente. Las características del cuerpo negro utilizado se presentan en la tabla III.1. Los valores de las constantes obtenidos en las últimas calibraciones del equipo se presentan en la tabla III.2

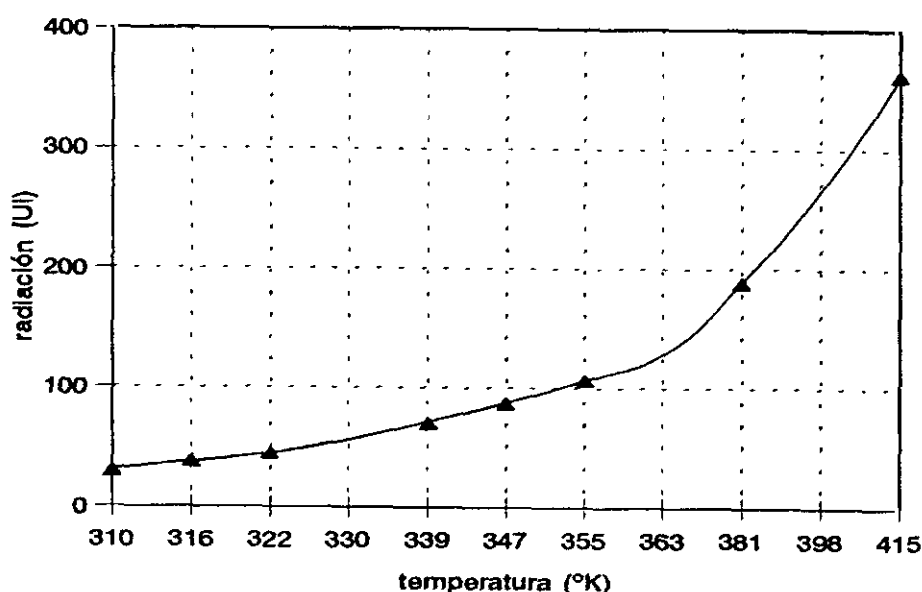


Figura III.1 Curva de calibración de la termocámara utilizada en el presente trabajo

| | A (UI) | B (°K) |
|----------------|--------|---------|
| NOVIEMBRE 1993 | 552855 | 2994 |
| JULIO 1994 | 529227 | 2996.86 |
| DICIEMBRE 1994 | 497328 | 2999.55 |

Tabla III.2 Constantes de calibración de la termocámara utilizada

De los resultados anteriores, se observa que no existen grandes variaciones de las mencionadas constantes (inferior al 10 % en el peor de los casos) y que el comportamiento de las curvas se mantiene siempre constante.

III.1.2.- Cálculo de temperaturas superficiales y emisividades

Ya se ha puesto de manifiesto en varias ocasiones que la variable física detectable mediante Termografía Infrarroja es la radiación procedente del cuerpo que se estudia. Sin embargo, en análisis como los desarrollados en este trabajo de tesis, es importante conocer las variaciones de temperatura superficial y emisividad del cuerpo en un proceso determinado, ya que ambas sufren modificaciones con el contenido de humedad del material. Para solventar este problema, se han desarrollado técnicas de separación de variables que permiten conocer los valores puntuales de emisividad y temperatura superficial a partir de cada valor de radiación emitida. Para ello, se considera un material de referencia de emisividad conocida (previamente medida en condiciones normales de humedad relativa y temperatura ambiente) en contacto térmico con la superficie que se estudia. En cada caso concreto se selecciona la referencia adecuada considerando distintas circunstancias como el buen contacto térmico con el material de estudio, la no penetración de agua procedente del material, el grado de deterioro que pueda producir en el cuerpo que se estudia (a considerar en medidas "in-situ"), etc.

Una vez establecido el contacto térmico entre el material y la referencia, se mide la temperatura superficial (idéntica para ambos) sobre la referencia, y, cuando ésta es conocida, la emisividad sobre el material.

Un primer problema importante cuando se realizan medidas termográficas sobre materiales en la banda de detección de la termocámara, es el cálculo de las emisividades de los mismos.

En las aplicaciones de la termografía relacionadas con la detección de humedades, se puede considerar, como primera aproximación, que las variaciones netas de temperatura superficial son pequeñas y, por tanto, la emisividad promediada de cada material en la banda de trabajo de la termocámara es constante. Según esta aproximación, la curva de evolución de la radiación de un cuerpo no negro será:

$$R = \frac{\epsilon A}{B} e^{\frac{T}{-1}} \quad [\text{III.3}]$$

donde:

A y B son las constantes de calibración del equipo. A se mide en unidades de radiación y B en °K.

T es la temperatura superficial del cuerpo en $^{\circ}\text{K}$.

ε es la emisividad del material en la longitud de onda de trabajo y a la temperatura T .

Los valores medios de emisividad para las bandas de longitudes de onda de trabajo están tabulados. En la tabla III.3 se muestran los valores de emisividad en la banda de 2 a 5.6 μm de distintos materiales de construcción (/24/, /71/ y /74/).

| Material | Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) | emisividad |
|-----------------|------------------------------------|-------------------|
| Cemento | temp. ambiente | 0.54 |
| Vidrio | de 20 a 100 $^{\circ}\text{C}$ | entre 0.91 y 0.94 |
| Yeso | 20 $^{\circ}\text{C}$ | 0.96 |
| Mármol (pulido) | 20 $^{\circ}\text{C}$ | 0.93 |
| Estuco (grueso) | de 10 a 90 $^{\circ}\text{C}$ | 0.91 |
| Ladrillo rojo | 20 $^{\circ}\text{C}$ | de 0.88 a 0.93 |
| Cal | temp. ambiente | de 0.30 a 0.40 |

Tabla III.3 Valores de emisividad en la banda de 2 a 5.6 μm de distintos materiales de construcción.

Sin embargo, en medidas más precisas relacionadas con procesos hídricos en materiales de construcción, es importante conocer el valor de la emisividad en cada momento ya que su variación no es siempre despreciable. La emisividad varía con el contenido de humedad de la muestra y, en materiales con porosidad relativamente grande como, por ejemplo, yesos o calizas, existen variaciones importantes entre los dos casos extremos: material seco y material saturado.

Los valores presentados en la tabla III.3 corresponden a valores promediados. Teniendo en cuenta que los materiales de construcción no son homogéneos y que los valores de emisividad tabulados están dados para rangos espectrales diferentes a los de sensibilidad de la termocámara utilizada, tales valores podrán utilizarse como una primera aproximación, pero será conveniente la determinación experimental de la emisividad de los distintos materiales objeto de estudio.

Se consideran dos tipos generales de medidas. El uso de uno u otro en cada caso depende básicamente de las condiciones del material que se estudia:

Medidas absolutas. La Termografía Infrarroja determina los puntos que pueden presentar, a priori, variaciones de temperatura. Estos valores se miden mediante termopares y la Termocámara se utiliza para el estudio de variaciones de emisividad. Su principal inconveniente en algunos casos es la carencia de un buen contacto entre el material y el termopar (por ejemplo, materiales rugosos o muy mojados). Además, se pierde el carácter visual de la Termografía.

Medidas relativas. Se considera una referencia de emisividad conocida en contacto térmico con el material. A partir de los valores de radiación sobre ella, se calcula la temperatura. Una vez conocida ésta, se calcula la emisividad del material a partir de la radiación procedente del mismo. La medida de la emisividad de referencia se realiza como medida absoluta mediante Termografía, en una atmósfera con humedad relativa del 35% y temperatura ambiente 25°C.

Se han estudiado distintos elementos como referencia: cinta aislante, pintura negra, chinchetas, etc. El uso de una u otra técnica depende de las condiciones del material: la cinta aislante proporciona un buen contacto con el material cuando éste no está muy mojado; la pintura no se puede usar en determinadas ocasiones, (por ejemplo, cuando se trabaja sobre frescos o pinturas murales). El uso de chinchetas de color asegura un buen contacto térmico con el material y causa muy poco daño en la superficie.

III.1.2.a.- Cálculo de errores en las medidas termográficas

Si se considera que toda la radiación recogida por una termocámara corresponde con la emitida por el cuerpo que se estudia, el valor total de esta radiación vendrá dado por la ecuación [III.3].

Si se considera la emisividad del cuerpo como constante y próxima a la unidad, dicha ecuación estará directamente relacionada con la temperatura superficial. Se estima que el error de la medida de temperatura en este caso, a temperaturas próximas a la ambiente y en condiciones tales que no influyan factores externos es de $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ (/72/ y /73/). De igual forma la precisión en la medida de radiación es de ± 0.1 U.I.

Con estas condiciones, si se deriva logarítmicamente la ecuación [III.3] se obtiene un error de medida para la emisividad de ± 0.02 en todos los casos estudiados.

Dado que el contenido de agua en el material es siempre inferior al 30% y que los valores de emisividad del material seco y mojado no varían drásticamente, es difícil

cuantificar variaciones de emisividad en los materiales. Por eso, las variaciones de emisividad de los materiales sólo se han usado para determinar si un material estaba seco o mojado, mientras que a través de las variaciones de temperatura superficial (que presentan mayor variación) fue posible obtener curvas de evolución de los procesos.

III.1.3.- Factores influyentes en las medidas termográficas

La aplicación de la Termografía Infrarroja a la detección de humedad en Monumentos implica la necesidad de una investigación previa en laboratorio enfocada a distintos tipos de estudios. Un primer aspecto a considerar es el análisis de parámetros cuya influencia puede perturbar las medidas realizadas "in-situ". Algunos de estos factores son, en determinadas circunstancias, evitables; de otros sólo es posible una evaluación de su influencia. La acción controlada de algunos puede, como más adelante se demostrará, mejorar la detección mediante Termografía. Por eso, resulta muy conveniente un estudio profundo de cada uno de los posibles parámetros. A continuación se presentan los posibles factores de perturbación de las medidas así como la forma en la que se ha abordado su estudio en el laboratorio, y, en su caso, establecido las correcciones a considerar en las medidas experimentales.

III.1.3.a.- Ángulo de incidencia y factor de forma

La no perpendicularidad entre cámara y objeto, las formas no planas, etc, en principio, podrían inducir una pérdida en la radiación recogida por la termocámara. Este fenómeno se reproduce en la figura III.2 donde se representa la componente de la radiación total emitida por distintos puntos de una superficie que recoge una cámara. Según esta figura, se recogerá toda la radiación emitida de puntos como el A (perpendiculares a la cámara), mientras que las pérdidas serán mayores a medida el ángulo que forman la línea que sigue el camino óptico del rayo y la que une objeto y cámara pasando por el eje de ésta crece, hasta que se alcanzan puntos como el B en los que no existe componente de la radiación siguiendo esta línea.

Por otra parte, aumenta la superficie eficaz de emisión. Teóricamente, el aumento de superficie junto con de la disminución de la componente normal de la radiación hace que permanezca constante. Sin embargo, Este fenómeno se pone de manifiesto en los termogramas mostrando zonas de aparente pérdida de radiación donde realmente no existe. Aparece en superficies con curvatura no plana (columnas, bóvedas, etc), en bordes de materiales o en superficies planas cuando cámara y objeto no están perfectamente enfrentados.

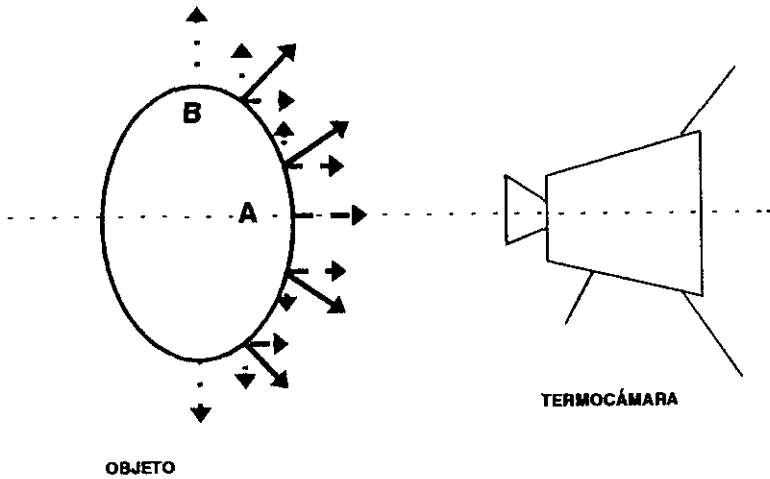


Figura III.2 Incidencia no normal de la radiación infrarroja

Es necesario, por tanto, conocer la influencia del ángulo en la variación de la radiación recibida por la termocámara. A este respecto se han desarrollado dos tipos de ensayos sobre placas de escayola. En ambos casos la distancia entre cámara y objeto es de, aproximadamente, 1m. En la primera prueba, la cámara se desplaza siguiendo una línea perpendicular a su eje (y, por tanto, paralela a la muestra); en la segunda, la cámara se mantiene enfrente a la muestra y se cambia el ángulo acimutal de la misma. La figura III.3 presenta la disposición de los ensayos de pérdidas por incidencia no-normal.

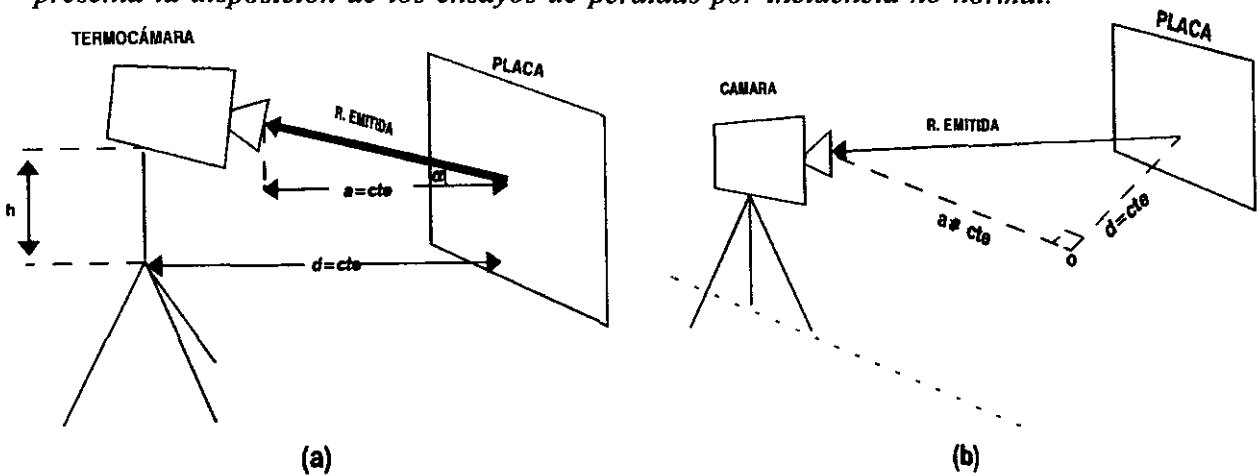


Figura III.3 Disposición de los ensayos por incidencia no normal

Los resultados obtenidos se presentan en las figuras III.4 y III.5.

Finalmente, es importante destacar que, en el caso de estudiar pérdidas en los extremos de un material, hay que considerar la combinación de dos fenómenos distintos. Por una parte, existe una pérdida aparente de radiación provocada por el fenómeno antes explicado. Y por otra, existirán variaciones reales ya que puntos de los extremos del material se están acelerando los procesos de evaporación.

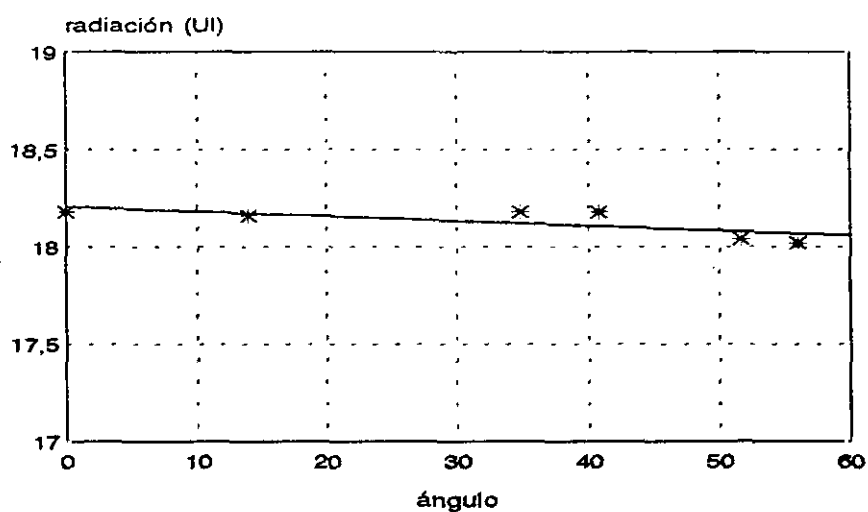


Figura III.4 Resultados obtenidos según la disposición (a)

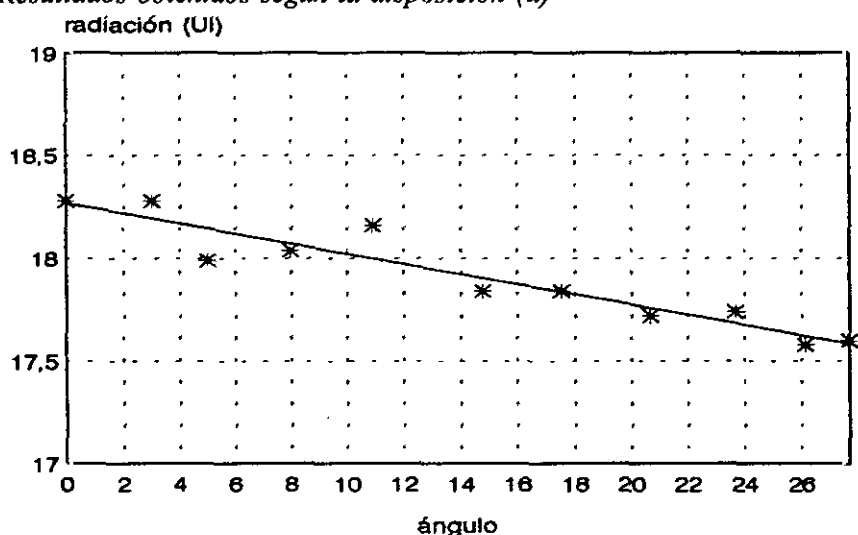


Figura III.5 Resultados obtenidos según la disposición (b)

Las variaciones obtenidas en el caso correspondiente a la figura III.4 quedan dentro del margen de error de la medida, por lo tanto, se puede considerar inexistente la influencia del ángulo de incidencia. Respecto al caso más desfavorable, representado en la figura III.5, la diferencia de radiación recogida por la termocámara entre los ángulos máximo y mínimo (que corresponden con la máxima y mínima radiación) no sobrepasa el 4% del valor medio de radiación y, por lo tanto, queda dentro del margen de error de la medida. Por lo tanto, se puede considerar que este tipo de perturbación es irrelevante. A pesar de ello, en todos los ensayos realizados en laboratorio la termocámara se mantuvo en posición perpendicular al objeto, para recoger toda la radiación emitida por el mismo. Además, la zona de medida correspondía siempre con puntos interiores de la superficie para evitar pérdidas por efecto de borde.

Respecto a las medidas "in-situ", a pesar de quedar establecida la no influencia de este factor, las medidas se consideraban comparables solamente en los casos en los que la posición relativa entre cámara y objeto era la misma.

La influencia del efecto de borde no se ha considerado en las medidas en el laboratorio, ya que siempre se realizaron en la parte central de la superficie del material. En medidas "in-situ", cuando se mide sobre bóvedas, columnas, etc, se considera una desviación máxima del 4% respecto al valor obtenido en la parte de la superficie enfrentada a la termocámara.

III.1.3.b.- Atenuación atmosférica

Como se ha explicado en el apartado I.4.1.d, referente a perturbaciones producidas por la atmósfera, la atenuación de la radiación térmica se debe, principalmente a la absorción y la dispersión presentes en la atmósfera. En aire puro, la absorción se debe principalmente a la presencia de vapor de agua y CO_2 .

Los efectos producidos por la atenuación atmosférica, dentro de las regiones denominadas "ventanas atmosféricas" (3-4 μm y 8-12 μm) se ponen de manifiesto para distancias relativamente grandes entre la cámara y el objeto, cuando la concentraciones de gases en la atmósfera no son extremadamente grandes (/71/, /72/, /73/, /74/). La ecuación de extinción está dada por:

$$\tau = e^{-\alpha x} \quad [III.4]$$

donde:

x es el camino óptico

α es el coeficiente de extinción que incluye fenómenos de absorción y de "scattering"

τ es la transmitancia de un rayo a través de la atmósfera

A partir de esta ecuación, se pueden corregir los valores de radiación obtenidos. El factor de corrección atmosférica se define como:

$$\tau = \exp(-\alpha(\sqrt{d_0} - \sqrt{d_{cal}}) - \beta(d_0 - d_{cal})) \quad [III.5]$$

donde:

τ es el factor de corrección

α y β son los coeficientes de atenuación

d_0 es la distancia entre el sensor y el objeto

d_{cal} es la distancia entre la referencia y el sensor.

Esta expresión se obtiene como aproximación a partir del método LOWTRAN para cortas distancias y para una atmósfera standard dada por los valores presentados en la tabla III.4 (/73/ y /74/).

| Parámetro | atmósfera standard |
|-----------------------------------|--------------------|
| temperatura del aire | 15 °C |
| Presión atmosférica | 1 atm |
| Humedad relativa | 35% |
| Concentración de CO ₂ | 300 ppm |
| Concentración de N ₂ O | 0.3 ppm |
| Concentración de CO | 1 ppm |
| Concentración de O ₃ | 0.355 ppm |
| Concentración de CH ₄ | 2 ppm |
| Visibilidad | 10 Km |

Tabla III.4 Parámetros de atmósfera standard

En la figura III.6 se representa el factor de corrección atmosférica τ frente a la distancia para una atmósfera standard y equipos infrarrojos de corta (sw) y larga longitud de onda (lw) adaptadas a las ventanas atmosféricas de 3 a 5 μm y 8 a 12 μm respectivamente (/74/).

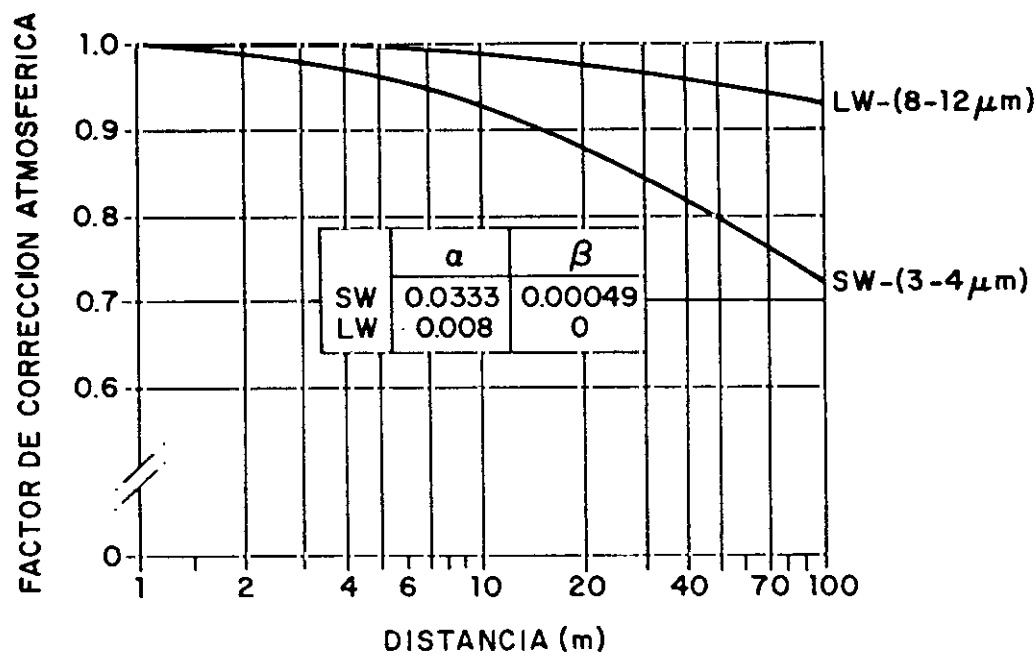


Figura III.6 Factor de corrección atmosférica en una atmósfera "standard"

De la figura anterior se deduce que para distancias menores de 4 m aproximadamente el factor de corrección supera el valor de 0.95 y por tanto, se puede considerar que en estos casos, los efectos de atenuación son despreciables siempre y cuando el análisis se restrinja a las ventanas atmosféricas.

Existen, sin embargo, casos en los que la concentraciones de partículas son mucho mayores de las consideradas para atmósfera "standard" o que trabajamos fuera de las ventanas atmosféricas y, aún para distancias pequeñas, los efectos de atenuación son muy significativos. En los ensayos de laboratorio dirigidos al estudio de este fenómeno se ha intentado reproducir las condiciones atmosféricas encontradas en muchos de los edificios sometidos a estudio (niveles muy altos de humedad relativa y temperaturas bajas).

Haciendo uso de la base de datos HITRAN se ha determinado el coeficiente de atenuación de la radiación IR en la atmósfera para diferentes contenidos de humedad y de CO₂ en función del camino óptico recorrido. La atenuación debida al CO₂ es prácticamente constante para "contenidos*distancias" superiores a los 100 ppm*m. Por su parte, el H₂O, al presentar numerosas bandas de absorción es muy dependiente del recorrido y del camino óptico recorrido. En el rango 2.5-5.6 μm varía según los resultados expuestos en la tabla III.5 donde se ha considerado "contenidos*distancias" en ppm*m y distintas temperaturas del cuerpo negro.

| HR* CAMINO (m*%) | TEMPERATURA DEL CUERPO NEGRO (°K) | | | | | | | | |
|------------------------|-----------------------------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 273°K | 300°K | 325°K | 350 °K | 400 °K | 500 °K | 600 °K | 700 °K | 800 °K |
| 5 | 91.3 | 91.8 | 92.4 | 93.2 | 93.9 | 94.7 | 94.9 | 94.6 | 94.2 |
| 10 | 84.7 | 86.9 | 87.9 | 88.9 | 90.1 | 91.6 | 92.91 | 91.8 | 91.3 |
| 40 | 71.7 | 75.4 | 76.9 | 78.4 | 81 | 83.9 | 84.9 | 84.8 | 84.2 |
| 80 | 67.4 | 70.5 | 72.7 | 74.7 | 77.4 | 80.7 | 81.8 | 81.6 | 80.85 |
| 160 | 63 | 65.6 | 68.2 | 70.1 | 73.2 | 76.7 | 77.8 | 77.5 | 76.5 |
| 280 | 58.7 | 62.3 | 64.4 | 66.6 | 69.8 | 73.4 | 74.3 | 73.8 | 72.7 |
| 1440 | 45.6 | 49.2 | 61.5 | 64 | 57.6 | 61.46 | 62.3 | 64.8 | 60 |

Tabla III.5 Atenuación de la radiación IR según el contenido de H₂O en la atmósfera

En la figura III.7 se muestran las curvas de atenuación obtenidas en los casos presentados en la tabla III.5. Los mismos resultados referidos al CO₂ se muestran en la tabla III.6 y la

figura III.8. Finalmente, los mismos resultados para una atmósfera "standard" con las características mostradas en la tabla III.4, se muestran en la tabla III.7 y en la figura III.9.

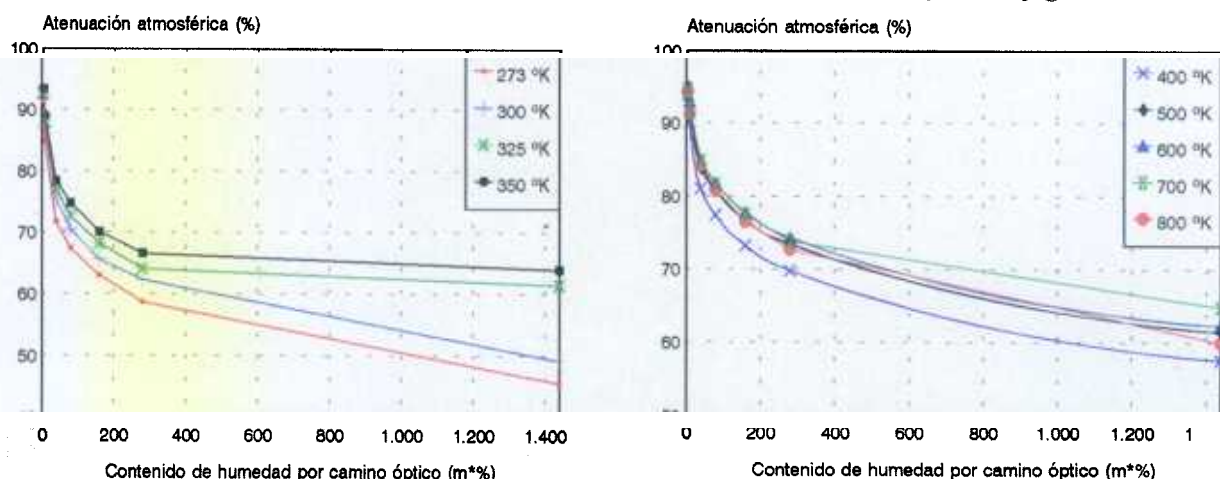


Figura III.7 Curvas teóricas de atenuación obtenidas a partir de la base de datos HITRAN

| HR* CAMINO m*% | TEMPERATURA DEL CUERPO NEGRO (°K) | | | | | | | | |
|----------------------|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 273°K | 300°K | 325°K | 350°K | 400°K | 500°K | 600°K | 700°K | 800°K |
| 330 | 95.6 | 95.1 | 93.9 | 93.8 | 93.1 | 92.6 | 92.6 | 92.8 | 93.1 |
| 3300 | 93.5 | 92.6 | 91.3 | 90.9 | 90 | 89.1 | 88.8 | 88.6 | 88.6 |
| 8200 | 91.3 | 90.9 | 89.9 | 89.3 | 88.3 | 87.3 | 86.8 | 86.5 | 86.3 |
| 16500 | 91.3 | 90.2 | 89 | 88.5 | 87.5 | 86.3 | 85.8 | 85.4 | 85.2 |
| 33000 | 89 | 89.3 | 87.9 | 87.4 | 86.3 | 85.1 | 84.6 | 84.2 | 83.9 |
| 330000 | 80 | 79.5 | 78.8 | 78 | 77 | 76.2 | 76 | 76.2 | 76.3 |

Tabla III.6 Resultados teóricos de atenuación obtenidos para distintas concentraciones de CO₂

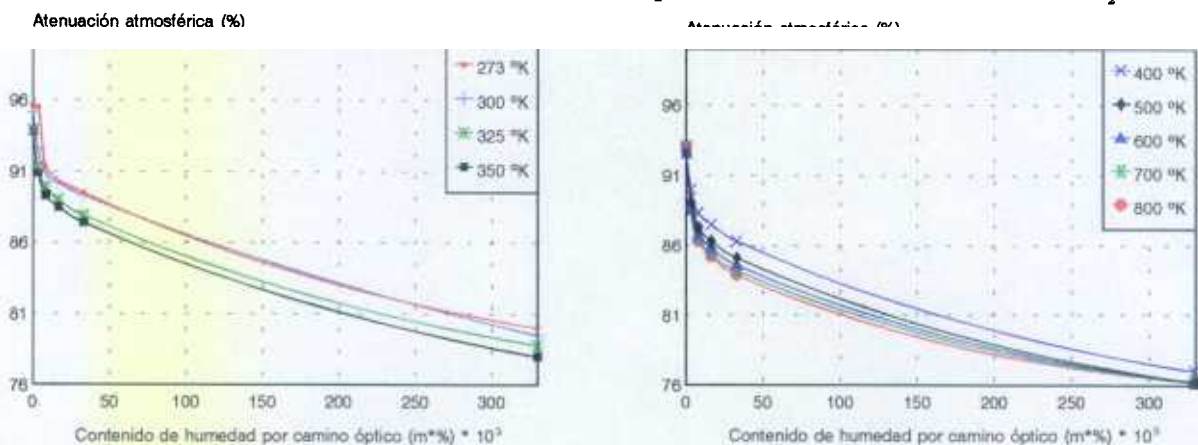


Figura III.8 Curvas teóricas de atenuación obtenidas a partir de los datos presentados en la tabla III.6

| HR* CAMINO (%*m) | TEMPERATURA DEL CUERPO NEGRO (°K) | | | | | | | | |
|------------------------|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 273°K | 300°K | 325°K | 350°K | 400°K | 500°K | 600°K | 700°K | 800°K |
| 0.5 | 76 | 77 | 77.6 | 78.6 | ----- | 81.7 | 82.5 | 82.6 | 82 |
| 1 | 71.7 | 72.9 | 74.2 | 75.5 | 77 | 79.1 | 80 | 80 | 79.7 |
| 5 | 54.3 | 55.7 | 57.2 | 59 | 61.5 | 64.8 | 61.1 | 66.3 | 65.8 |
| 10 | 47.8 | 49.2 | 51.1 | 52.8 | 55.5 | 58.9 | 60.2 | ----- | ----- |
| 50 | 30.4 | 32.8 | 34.8 | 36.9 | 39.8 | 43.4 | 44.9 | ----- | ----- |

Tabla III.7 Resultados teóricos de atenuación obtenidos para una atmósfera "standard"

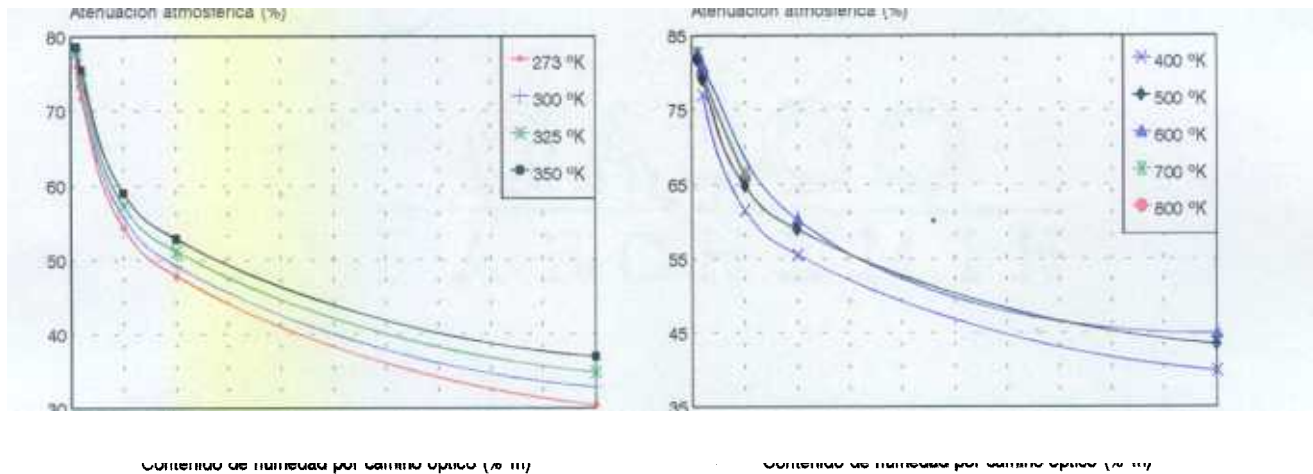


Figura III.9 Curvas teóricas de atenuación obtenidas a partir de los datos presentados en la tabla III.7

Comparando los resultados de esta última tabla con los correspondientes a la atenuación del H₂O y del CO₂ (tablas III.6 y III.7), se pone de manifiesto que son éstos los elementos determinantes de la atenuación y que conociendo su valor, es posible estimar y corregir la influencia de dicho parámetro.

En los ensayos dirigidos a evaluar los efectos de atenuación de la señal emitida, se usó como objeto de estudio un cuerpo negro cuya temperatura superficial puede variar desde temperatura ambiente hasta 100°C aproximadamente. La cámara se colocó siempre perpendicular a dicho cuerpo y a distancias de 1, 2 y 3 metros respectivamente. Los ensayos se realizaron en dos ambientes distintos:

- Condiciones ambientales normales: 35% de humedad relativa y 25°C de temperatura.
- Condiciones de humedad relativa alta (en torno al 80%).

Las curvas de variación de la radiación con la temperatura superficial del cuerpo para cada distancia cámara-objeto y cada una de las condiciones atmosféricas antes expuestas se presentan en las figuras III.10. y III.11.

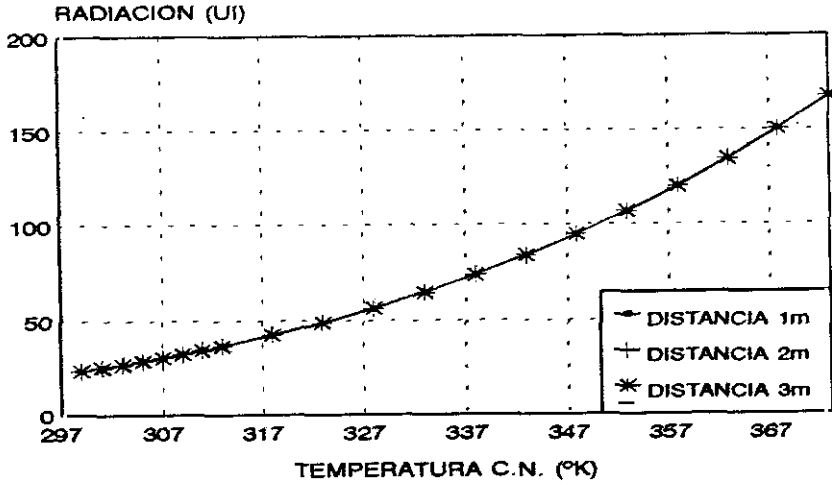


Figura III.10 Resultados obtenidos en una atmósfera con un 35% de humedad relativa

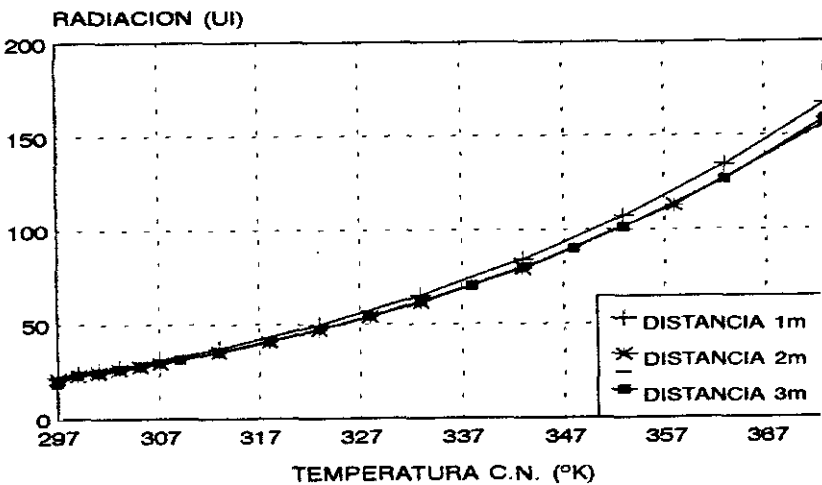


Figura III.11 Resultados obtenidos en una atmósfera con humedad relativa del 80%

Se puede comprobar que con contenidos de humedad del 35% la determinación de la radiación es independiente de la distancia. Para contenidos de agua mayores (80%), la distancia es importante, fundamentalmente a temperaturas altas. A temperatura ambiente, la atenuación atmosférica coincide con los valores determinados teóricamente.

Dichas medidas se tomaron considerando una referencia de emisividad conocida. Los efectos de atenuación aparecen tanto en las medidas sobre la referencia como en las medidas sobre el objeto, por eso, las curvas muestran caídas muy pequeñas respecto a los valores esperados a partir de datos teóricos.

El efecto de la atenuación atmosférica es, quizás, el que más claramente se pone de manifiesto en cualquier tipo de medida "in-situ" y en consecuencia es un parámetro que interesa cuantificar para poder corregir su influencia en las medidas.

En los estudios teóricos realizados mediante la base de datos HITRAN (ver tablas III.5, III.6 y III.7) se pone de manifiesto la importancia de este factor cuando varía la distancia entre emisor y receptor. De igual forma, los ensayos de laboratorio realizados en este punto hacen visible este fenómeno. En las figuras III.7, III.8 y III.9 se presentan los resultados obtenidos en este tipo de experimentación.

En el caso de atmósferas con alto contenido de humedad, la atenuación de la señal se pone de manifiesto aún para distancias cámara-objeto pequeñas como se refleja en la figura III.10. En esta figura, aparecen dos cuestiones importantes a analizar. Por una parte, existe una separación substancial entre las curvas correspondientes a 1 m y a 2 m, mientras que tal separación no se repite para distancias mayores. Además, la separación entre curvas es tanto mayor cuanto mayor es la temperatura del cuerpo negro usado: para temperaturas próximas al entorno (alrededor de 300 °K) no existe prácticamente salto entre las curvas mientras que éste es muy marcado para temperaturas próximas a los 320 °K.

La desviación de cada una de las curvas presentadas en III.11 respecto a la correspondiente a una atmósfera con humedad relativa del 35% y una separación entre cámara y objeto de 1 m, se presenta en la tabla III.8 (en %)

En dicha tabla se observa que, para una misma temperatura del objeto, es mayor la atenuación de la señal cuanto mayor es la distancia que los separa. Para distancia de 2 m, la atenuación de la señal es prácticamente la misma en todo el rango de variación de temperaturas; mientras que para distancias mayores, la señal se atenúa menos para mayores temperaturas. Este fenómeno puede ser debido a la propia emisión de las moléculas de agua (calentadas por el objeto) que solo se pondrá de manifiesto cuando el cuerpo emite a temperaturas relativamente altas y la separación entre ambos (y por tanto el número de moléculas de agua contenidas en el camino óptico recorrido por la radiación) es suficientemente grande.

Debido a la aplicación que se pretende dar a la técnica, este comportamiento de la señal en atmósferas con alto contenido de humedad, no es muy importante ya que, normalmente, se trabajará en condiciones de temperatura atmosférica próximas a los 20 °C. Sin embargo, este fenómeno deberá ser considerado en casos excepcionales cuando se realicen medidas

"in-situ" con fuentes externas de radiación que sean capaces de producir calentamientos en el objeto sometido a estudio.

| TEMPERATURA (°K) | DISTANCIA 2 m | DISTANCIA 3 m |
|------------------|---------------|---------------|
| 297 | 4.6 % | 15.2 % |
| 323 | 4.7% | 7.3 % |
| 373 | 5.0 % | 6.4 % |

Tabla III.8.- Desviación de las curvas de atenuación respecto al valor "real" de radiación recibida

Según resultados obtenidos, los fenómenos de atenuación atmosférica no se tomaron en cuenta en medidas realizadas en el laboratorio, donde nunca se superó el 35 % de humedad relativa atmosférica (además, la distancia entre cámara y objeto en este caso fue siempre inferior a 1 m); en medidas "in-situ", la forma de evitar dicho efecto varía de un caso a otro. Siempre que es posible, se consideran distancias entre cámara y objeto menores a 1 m. Cuando esto no ocurre, se establecen en el laboratorio las curvas de atenuación características de cada caso concreto (para la distancia entre cámara y objeto y humedad relativa estimada en cada caso). Además, como posteriormente se demostrará, el uso de filtros interferenciales puede ser muy útil en casos de atenuación atmosférica tales que no es posible considerar pequeñas distancias entre emisor y receptor.

III.1.3.c.- Radiación del entorno no controlada

Como ya se ha explicado en el apartado referente a la Termografía Infrarroja (apartado I.5.2), una termocámara recoge y analiza toda la radiación que le llega procedente del objeto que se estudia. Esta radiación puede ser, además de la emitida por la superficie investigada, la reflejada por ella o transmitida a su través. Esta última, en nuestro caso será despreciable por trabajar con materiales opacos.

Según las características de la superficie y de la naturaleza de la radiación externa, los valores reales de temperatura superficial y emisividad pueden quedar distorsionados y es, por tanto, conveniente anularlos cuando esto sea posible, o determinar la manera de compensar dicha distorsión .

Para evitar fenómenos como los presentados, los ensayos de laboratorio se han realizado manteniendo cámara y objeto perpendiculares entre sí a una distancia aproximada de 0.5 m y colocando las probetas, todas de igual forma y tamaño, dentro de una caja negra según

se indica en la figura III.12. En el caso de medidas in-situ, la cuantificación de tal fenómeno es imposible. En general, se realizaron medidas desde distintos puntos para compensar la incidencia de radiación externa. En este tipo de medidas será siempre necesario tener en cuenta el ángulo de incidencia, comentado en el punto III.1.3.a.

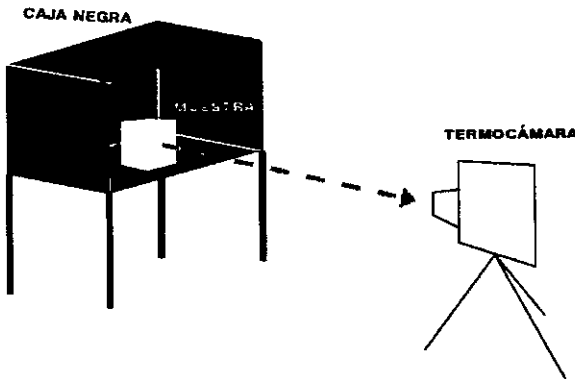


Figura III.12 Disposición de los ensayos en el laboratorio

Los fenómenos de radiación del entorno no controlada son, en general, aleatorios y bastante difíciles de reproducir en laboratorio. Es por eso que no se ha realizado un análisis experimental de su influencia en medidas termográficas. Sin embargo, es éste el único de los factores considerados en el presente trabajo que aparece explícitamente comentado en trabajos de otros autores (/73/, /85/, y /91/). Las recomendaciones aparecidas en estos trabajos se han llevado a cabo también en el presente: Las medidas en laboratorio se realizaron siempre colocando el objeto dentro de una caja negra para evitar los efectos de este tipo de radiación.

Respecto a las medidas "in-situ", se han consideraron distintas normas según el caso concreto. Siempre que fue posible, las medidas se realizaron desde el interior del edificio, sin fuentes térmicas ni luminosas y cubriendo las ventanas para evitar la entrada de radiación solar. Cuando fue necesario realizar medidas externas, éstas se realizaron durante la noche y cada punto fue medido desde distintos ángulos. Comparando los termogramas obtenidos en cada posición fue posible determinar posibles efectos de reflexión en la superficie y anularlos.

III.1.3.d.- Un ejemplo de perturbación por factores externos

En las figuras III.13 y III.14 se ilustran los fenómenos explicados. La figura III.13 corresponde al termograma de un vaso "dewar" lleno de nitrógeno líquido. Las superficies analizadas mediante Termografía Infrarroja aparecen tanto más claras cuanto mayor sea la

radiación emitida por las mismas. Estas variaciones de radiación se pueden producir por un cambio de material en la superficie de estudio (que produciría un cambio de emisividad), por un cambio de temperatura superficial (por ejemplo, en zonas donde hay puentes térmicos), o por un cambio de temperatura y emisividad (por ejemplo, en zonas mojadas)..

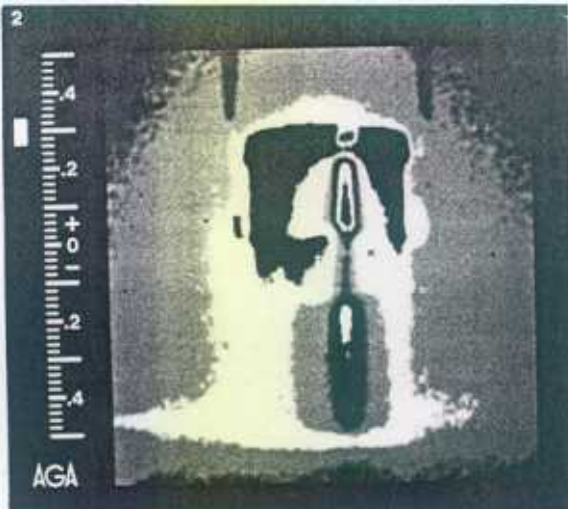


Figura III.13 Termograma de un vaso "Dewar" lleno de nitrógeno líquido

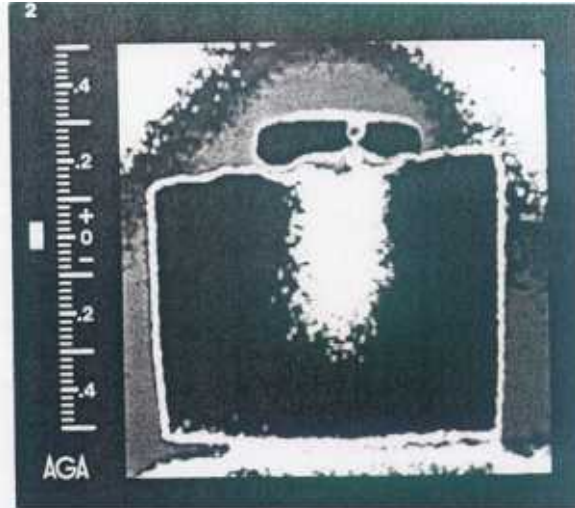


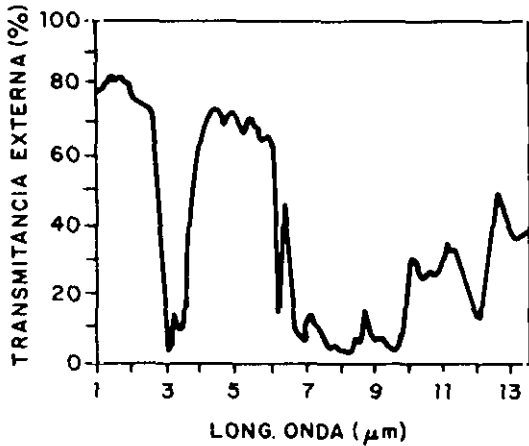
Figura III.14 Termograma del mismo vaso anterior con una placa de escayola

La figura III.13 muestra las zonas de máxima radiación en el eje de la superficie y las zonas de mínima en la parte superior del vaso. Intuitivamente se podría considerar la parte más próxima a la tapadera como zona más fría (porque allí se está produciendo la salida de vapor). Esta distribución queda confirmada en la figura III.14 que muestra un termograma correspondiente al mismo vaso pero cubierto con una placa de escayola. La distribución de radiación mostrada en la figura III.13 está producida por los fenómenos antes explicados: Por una parte, la componente de la radiación recibida en puntos alejados del eje, no corresponde con la radiación total emitida por la superficie. Además, se están produciendo reflexiones en la superficie (metálica) que fortalecen la radiación emitida por el cuerpo

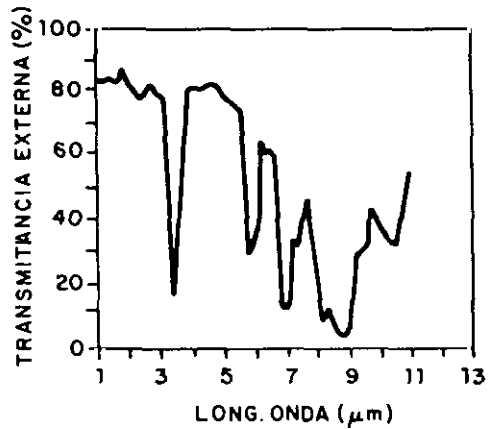
III.1.4.- Radiación externa controlada

Las fuentes externas, consideradas inicialmente como posibles causas de error en las medidas termográficas, pueden, sin embargo, resultar útiles cuando su naturaleza y la intensidad de la misma es conocida y controlada. En una situación real existen dificultades para eliminar fuentes externas no controladas como se ha explicado en el punto III.1.3.c. Sin embargo, si la radiación externa y controlada es conocida y mayor que la procedente del entorno, será predominante, y puede utilizarse como fuente de información sobre el material.

Distintos autores han estudiado la posibilidad de introducir mejoras técnicas, válidas solo para el problema específico que les ocupa, que permitan una mejor detección mediante termografía. En el tema concreto objeto del presente trabajo, el comportamiento del agua como material emisor de radiación infrarroja es de vital importancia. En la figura III.15 se presentan las curvas teóricas de reflectividad de algunos materiales. R. Schickert (/98/ y /99/) ha empezado aplicar el llamado método de Reflectografía Infrarroja para el estudio de diferentes daños en materiales de construcción mediante termografía.



(a) CEMENTO OK-50 (15.0 μm DE ESPESOR).



(b) CEMENTO ACRÍLICO (14.0 μm DE ESPESOR).

Figura III.15 Curvas teóricas de transmitancia externa de algunos materiales

En la figura III.16 se presenta la radiancia espectral integrada en escala logarítmica para distintas temperaturas de un cuerpo negro.

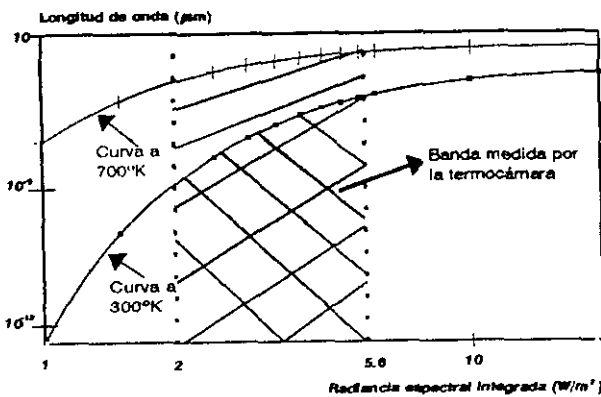


Figura III.16 Radiancia espectral integrada

Basándose en esta técnica se han conseguido algunos resultados en el estudio de pinturas murales y frescos que se suponían pintados sobre obras más antiguas (/98/ y /99/). De la misma forma, diversos autores proponen técnicas similares para el estudio de delaminaciones o espesores de coberturas protectoras.

Físicamente, tales técnicas se basan en la distinta capacidad de emisión/absorción de las diferentes moléculas constituyentes de los materiales. En nuestro caso, el nivel de humedad presente será diferente para cada región objeto de estudio. El agua presenta diversas bandas de emisión/absorción en el rango dinámico de la termocámara a utilizar, siendo la región centrada en 2.7 μm la que presenta una mayor absorción. Si se enfoca con una fuente de radiación centrada en esta región o que proporcione un alto nivel de energía en ella, se producirá un aumento en la radiación detectada por la cámara, tanto debido a fenómenos de reflexión (ver figura III.16) como al aumento de emisión del agua. De ambos fenómenos, el de la reflexión será el dominante, pero desaparecerá instantáneamente al retirar la fuente, mientras que el de aumento de emisión del agua permanecerá durante un tiempo más o menos largo en función de la energía de excitación suministrada. Ambos fenómenos serán tenidos en cuenta para conseguir una información más completa sobre la presencia de agua en los materiales.

Según dicha figura, un aumento de temperatura superficial del cuerpo que se estudia favorecerá la detectabilidad mediante termografía. Existen dos formas de medir posibles variaciones térmicas de un cuerpo. Por una parte, cualquier tipo de calentamiento real se pondrá de manifiesto en un aumento de radiación del cuerpo y, por tanto, de temperatura. Además, la incidencia de radiación externa de determinadas características sobre la superficie fortalece la radiación total recogida por la termocámara. Si esta radiación es tal que únicamente produce una reflexión sobre la superficie, el análisis termográfico mostrará un aumento aparente de la temperatura.

Para determinar la medida en que cada uno de los fenómenos influye en el aumento de radiación, se consideró conveniente desarrollar un modelo matemático que simulara el proceso anteriormente descrito, para, a partir de los datos experimentales obtenidos al trabajar con fuentes de radiación controlada, poder estimar parámetros característicos de los materiales tales como: porosidad superficial media, emisividad promedio en el rango de la termocámara, contenido de agua en superficie, etc.

III.1.4.a.- Modelización matemática del proceso

A partir de la ley de Kirchhoff expuesta en la introducción (apartado I.5.2) y considerando que en el presente trabajo se estudian únicamente materiales opacos en los que no hay transmisión de energía, la radiación total recibida por la termocámara cuando existe una fuente de radiación externa R_{inc} se expresará como:

$$E_{\text{rec.}} = E_{\text{emit}} + E_{\text{ref}} = \epsilon |_{\lambda} + (1 - \epsilon) R_{\text{inc}} \quad \text{[III.6]}$$

donde:

E_{emit} es la energía emitida por la superficie en UI.

E_{ref} es la energía reflejada sobre la superficie en UI.

ϵ es la emisividad del cuerpo

I_λ es la energía emitida por un cuerpo negro a igual temperatura que el material estudiado.

R_{inc} es la radiación procedente de la fuente externa

En la modelización matemática del proceso se considera un material de emisividad ϵ

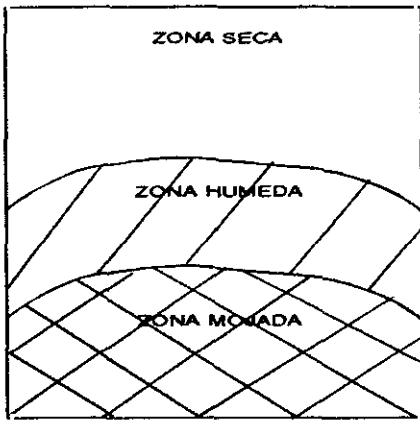


Figura III.17 Esquema del material

conocida, saturado de agua hasta la mitad de su altura, con un volumen de poros v todos esféricos y homogéneamente repartidos. Se mide la radiación emitida por el cuerpo en distintos puntos de su superficie (correspondientes a distintas alturas). En la figura III.17 se presenta un esquema de la superficie del material. Se considera que el punto más alto está totalmente seco. Se supone, además, que los puntos están suficientemente alejados de la zona de transición como para que no le

afecten posibles gradientes de temperatura producidos por el ascenso capilar del agua. Además, ninguna radiación externa, salvo la procedente de la fuente, incide sobre la superficie. Se consideran dos casos de análisis: antes de producirse la incidencia de radiación sobre el material y cuando dicha radiación está actuando. Las ecuaciones que rigen cada uno de los procesos antes expuestos son los siguientes:

ANTES DE RADIAR

$$E_b = \epsilon(1 - v)I_b = k_b I_b \quad [III.7]$$

$$E_a = \epsilon(1 - v)I_a + v\epsilon_{ag}I_a = k_a I_a \quad [III.8]$$

DURANTE LA RADIACIÓN

$$E'_b = \epsilon(1 - v)I'_b + (1 - \epsilon)(1 - v)R_{inc} = k'_b I'_b + K'_b R_{inc} \quad [III.9]$$

$$E'_a = (\epsilon(1 - v) + v\epsilon_{ag})I'_a + ((1 - v)(1 - \epsilon) + v(1 - \epsilon_{ag}))R_{inc} = k'_a I'_a + K'_a R_{inc} \quad [III.10]$$

donde:

E_b y E_a son las energías radiadas por puntos (secos y mojados, respectivamente) de la superficie

ϵ es la emisividad del material

ϵ_{ag} es la emisividad del agua

v es la porosidad del material en tanto por uno

I_a e I_b son las energías que emitiría un cuerpo negro de iguales características al material

Las diferencias de energía E_i entre parte seca y mojada o entre parte sin radiar y parte sometida a radiación son medibles mediante termografía.

Experimentalmente, se observa que la evolución del incremento de energía de la parte seca (antes y durante la radiación) frente al incremento de radiación de la parte mojada (antes y durante la radiación) es una recta.

A partir de las ecuaciones anteriores (ecs. [III.7] a [III.10]) se obtiene la siguiente recta teórica de evolución:

$$\Delta I_b = \frac{B_0}{K_b} - \frac{D_0}{K_a} + \frac{1-\epsilon}{\epsilon} \frac{\epsilon + v(\epsilon_{ag} - \epsilon)}{(1-\epsilon) + v(\epsilon - \epsilon_{ag})} \Delta I_a \quad [III.11]$$

donde:

B_0 y D_0 son, respectivamente, las diferencias de energía detectada por la termocámara del material seco antes y durante la radiación y del material mojado en los mismos casos en unidades isotermas.

K_b y K_a son constantes del material que relacionan el volumen de poros y la emisividad (ver ec.[III.7] y [III.8]) en la parte seca y mojada respectivamente.

ϵ es la emisividad del material

ϵ_{ag} es la emisividad del agua

ΔI_b y ΔI_a son las energías emitidas por el cuerpo seco y mojado respectivamente.

La pendiente de las rectas anteriores se relaciona con la porosidad a través de:

$$v = \frac{(m-1)(1-\epsilon)\epsilon}{(\epsilon - \epsilon_{ag})(1-\epsilon - m\epsilon)} \quad [III.12]$$

donde:

m es la pendiente de la recta

v es la porosidad del material en tanto por uno

ϵ es la emisividad del material seco

ϵ_{ag} es la emisividad del agua

En este tipo de ensayos, es importante que no haya un cambio real de temperatura en el material, o que el cambio sea lo suficientemente pequeño como para no alterar la evolución a la que está sometido el objeto que se estudia cuando actúa la radiación externa. De no ser así, esto supondría una perturbación que, en materiales de muy pequeña porosidad (por ejemplo, granitos o morteros muy compactados) generaría un cambio drástico en las condiciones de evaporación. Para comprobar que se cumple esta condición, el tiempo de incidencia de la radiación externa se reduce al imprescindible para realizar la medida, y en estas condiciones, se supone que el aumento de temperatura medido al incidir una radiación externa se debe solo a la reflexión de dicha radiación sobre la superficie. Es decir, medimos un aumento "aparente" de la temperatura del cuerpo. Considerando la aproximación anterior (sólo se produce reflexión de la radiación externa; nunca, cambios reales de temperatura), la ecuación obtenida es:

$$\Delta I_b = \frac{C_0}{\varepsilon(1-v)} + \frac{v(\varepsilon_{ag} - \varepsilon) + \varepsilon}{\varepsilon(1-v)} \Delta I_a \quad [III.13]$$

y por tanto, la relación entre la pendiente de la recta y la "porosidad aparente" será:

$$v = \frac{(m-1)\varepsilon}{(\varepsilon_{ag} - \varepsilon) + m\varepsilon} \quad [III.14]$$

En la figura III.18. se representan las curvas m frente a v para valores teóricos de emisividad.

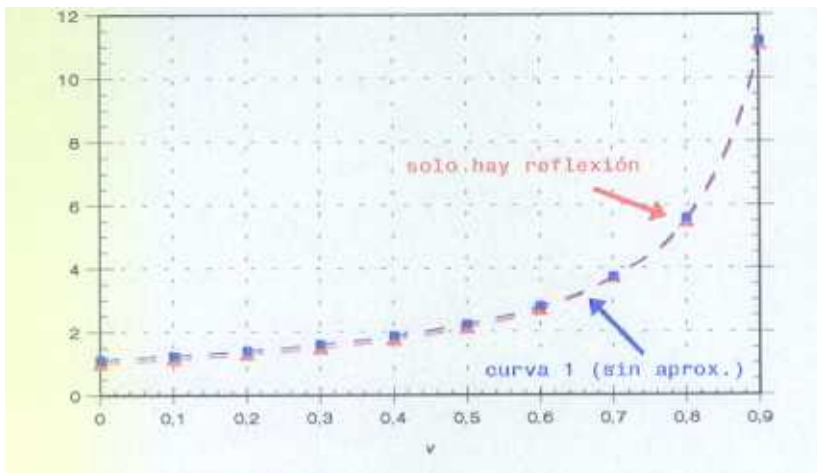


Figura III.18 Curvas m frente a v para valores teóricos de emisividad

En esta figura se puede observar que para valores altos de porosidad del material se tienen pendientes muy grandes, lo cual implica que, en estos casos, existe una mayor diferencia entre la radiación de las partes secas y mojadas de una misma superficie. Por lo tanto, la presencia de humedad es más fácilmente detectable cuanto mayor sea la porosidad del material, independientemente del contenido de agua existente en él, y aún sin considerar

que en estos casos, las posibles perturbaciones producidas por la acción de la fuente son menos importantes (es más difícil romper el equilibrio térmico en la superficie que se estudia)

III.1.4.b.-Experimentación

Los ensayos se realizaron en laboratorio en condiciones normales de humedad relativa y temperatura ambiente (35% y 25°C, respectivamente) sobre yeso y ladrillo. Estos materiales son suficientemente porosos como para que se produzca un gradiente de humedad importante en ellos (ver tabla III.13). Las muestras se mantienen dentro de una caja negra durante la realización del experimento para evitar la incidencia de radiación no deseada. La fuente externa se coloca detrás de la termocámara para evitar la entrada directa de radiación en la misma. En la figura III.19. se muestra la disposición del ensayo.

Los ensayos se realizaron con una lámpara de radiación de las características presentadas en la tabla III.9. En la figura III.20 se presentan las curvas espectrales teóricas de una lámpara de emisión de iguales características.

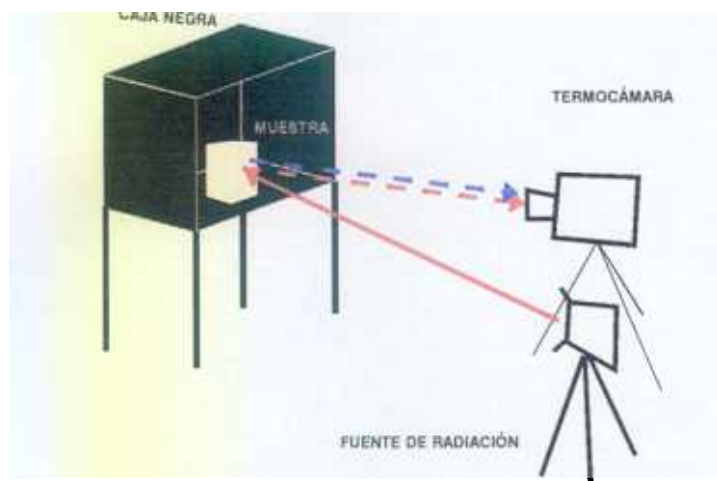


Figura III.19 Disposición del ensayo

| | |
|------------------------------|--------------------|
| Potencia eléctrica Consumida | 500 W (220 V) |
| Resistencia eléctrica | 96.8 Ω |
| Máximo de emisión | 3.9 μm |
| Rango espectral 80% | 2-6 μm |
| Superficie de emisión | 40 cm ² |
| Temperatura | 750 °K (220 V) |

Tabla III.9 Características de la lámpara de radiación utilizada

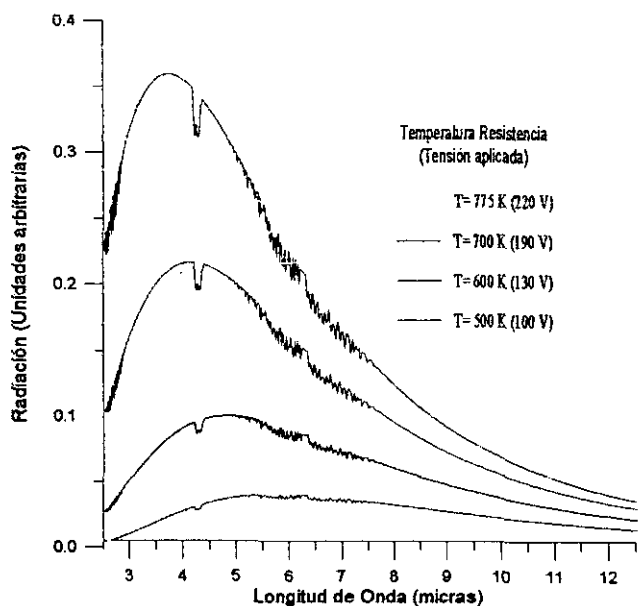


Figura III.20 Curvas espectrales de una lámpara como la presentada en la tabla III.9

*** Ensayos previos**

Se realizaron ensayos previos orientados a calcular el tiempo necesario para que la fuente de radiación se estabilice. Este tiempo se determinó midiendo la radiación recibida en la superficie de un espejo con un coeficiente de reflexión del 99%.

El espejo, que en este caso actúa como objeto, se coloca dentro de una caja negra enfrente a la termocámara y a la fuente de radiación. Se mide la radiación total emitida por el cuerpo mientras la radiación de la fuente actúa sobre él. En las figura III.21 se presentan los resultados obtenidos.

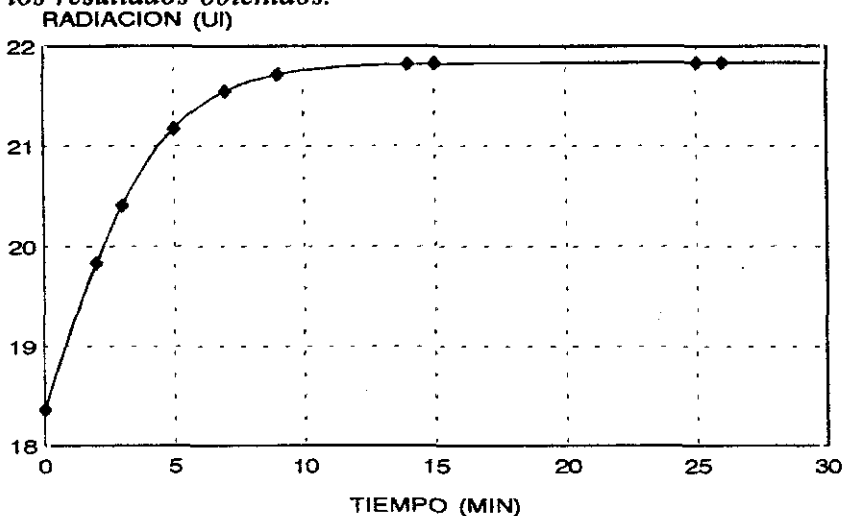


Figura III.21 Resultados obtenidos en medidas sobre espejos

El tiempo para el cual la radiación se hace constante determina el periodo necesario para que se establezca la radiación procedente de la fuente. Este valor de tiempo se considerará en todos los ensayos posteriores como el periodo de estabilización de la fuente.

Los primeros trabajos destinados a estudios termográficos con fuentes externas y controladas de radiación se realizaron con una termocámara de las características presentadas en la tabla III.10 y estaban orientados a determinar si la radiación infrarroja procedente la fuente externa perturbaba los procesos de evaporación en el material. Estos ensayos se realizaron sobre un ladrillo que se mantuvo sumergido hasta la mitad de su altura aproximadamente en agua durante 30 min. Se realizaron medidas termográficas en dos puntos de la superficie, situados en la parte mojada y la seca respectivamente y lo suficientemente alejados de la discontinuidad material seco/material mojado como para que no afectaran los procesos hídricos ocurridos en esta zona.

| | |
|-----------------------|--|
| Sensor | InSb |
| Respuesta Espectral | 3-5.4 μm |
| Sensibilidad | 0.1 $^{\circ}\text{C}$ a 20 $^{\circ}\text{C}$ |
| Rango de temperaturas | -20 a 950 $^{\circ}\text{C}$ |
| Refrigeración | Argon gas |

Tabla III.10 Características de la termocámara usada en los primeros ensayos de radiación externa

Los resultados obtenidos en este ensayo y la disposición de los puntos medidos en la superficie se muestran en la figura III.22.

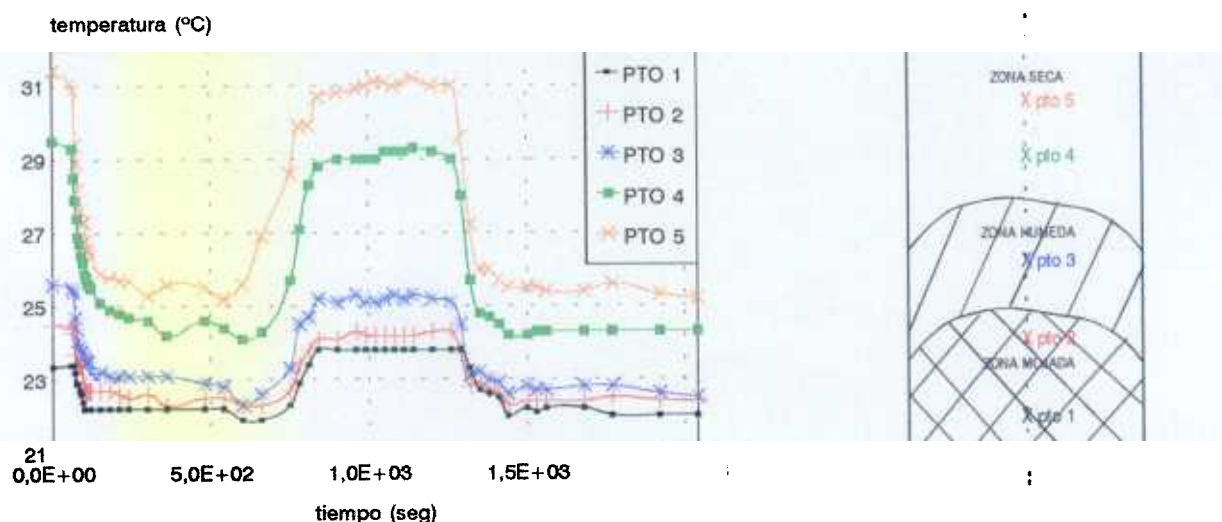


Figura III.22 Evolución de la radiación total emitida por un ladrillo cuando se enfoca con una fuente externa y disposición de los puntos medidos en la superficie del material

Estos ensayos permitieron verificar los resultados físicos considerados teóricamente: mediante este tipo de procesos se produce fundamentalmente reflexión en la superficie del material (las curvas caen rápidamente cuando se retira la fuente) y en las zonas mojadas se produce un aumento mayor de radiación que en las secas (mayor altura del escalón).

*** Ensayos sobre yeso y ladrillo**

Posteriormente, se realizaron otros ensayos con el equipo AGA 782 sobre probetas de yeso y ladrillos. Las características de esta termocámara, con la que se ha desarrollado todo el trabajo de tesis, se presentan en la tabla III.11. Las características de los materiales usados se presentan en la tabla III.12.

| | |
|-----------------------|-------------------------|
| Detector infrarrojo | InSb (fotovoltaico) |
| Respuesta espectral | 2.5 a 5.6 μm |
| Sensibilidad | 0.1 °C a 20 °C |
| Resolución | 100 elementos/línea |
| Refrigeración | Nitrógeno líquido |
| Rango de temperaturas | -15 a 800 °C |

Tabla III.11 Características de la termocámara utilizada

| | P. ACC. AGUA (%) | P.Hg (%) | ALTURA (cm) | PTS. MEDIDOS |
|-----------------|------------------|-----------|-------------|--------------|
| LADRILLO | 28.95±.03 | 21.98±.03 | 29 | 5 |
| YESO | 52.00±.03 | — | 16 | 4 |

Tabla III.12 Características de los materiales usados en los ensayos de radiación externa controlada

La disposición de los ensayos fue siempre la misma y ya ha sido explicada en el punto III.3. Se mide la radiación emitida por puntos correspondientes a la parte seca y mojada del material manteniéndose siempre alejados de la discontinuidad entre ambas partes. A partir de las ecuaciones [III.11] y [III.12], se obtiene la "porosidad aparente" para cada punto medido. Se consideraron puntos equidistantes entre sí y se numeraron siguiendo un orden creciente de alturas. En todos los casos se consideró el punto más alto como correspondiente a material seco. En el caso del ladrillo se realizaron ensayos a distintos tiempos una vez

sacado el material del agua. Los resultados obtenidos se muestran en las figuras III.23, III.24, III.25, III.26 y III.27.

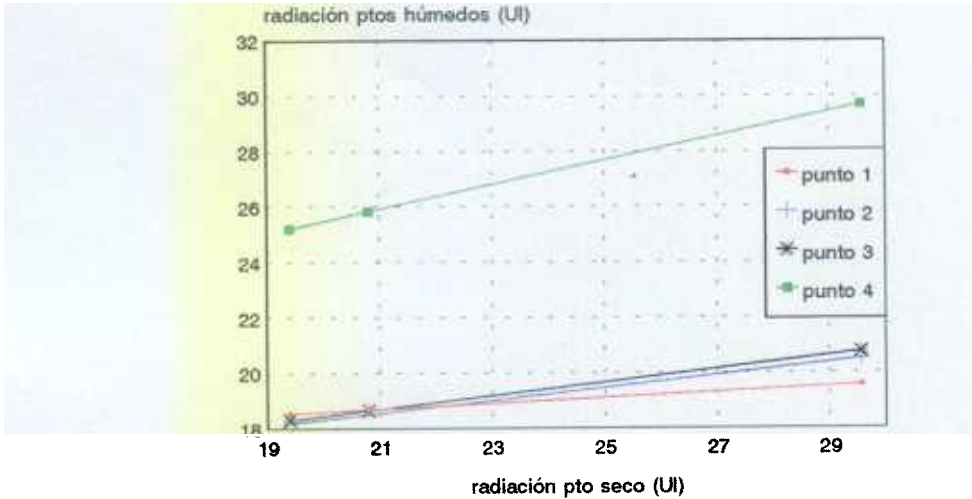


Figura III.23 Rectas obtenidas en el ensayo realizado con escayola

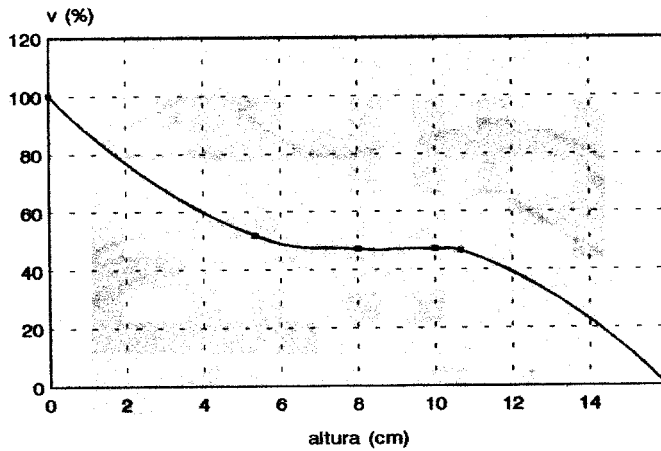


Figura III.24 Distribución de agua en la superficie de la muestra de escayola

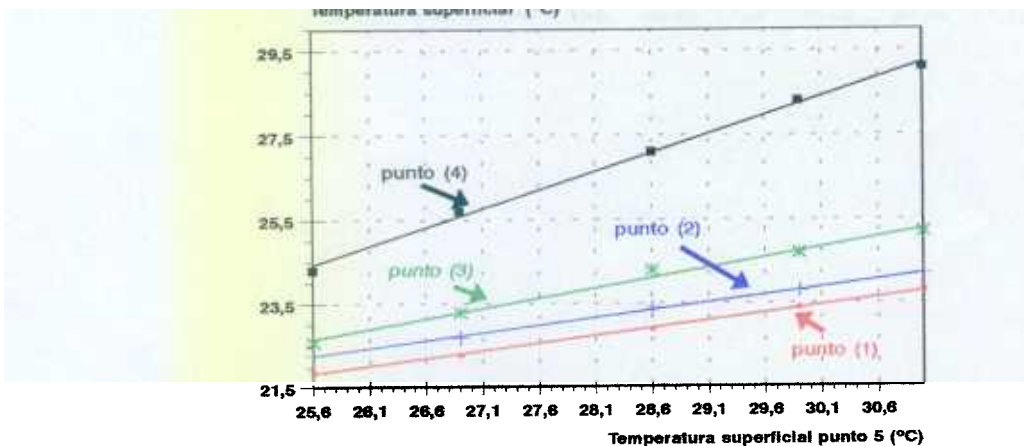


Figura III.25 Rectas obtenidas en el ensayo realizado con ladrillo

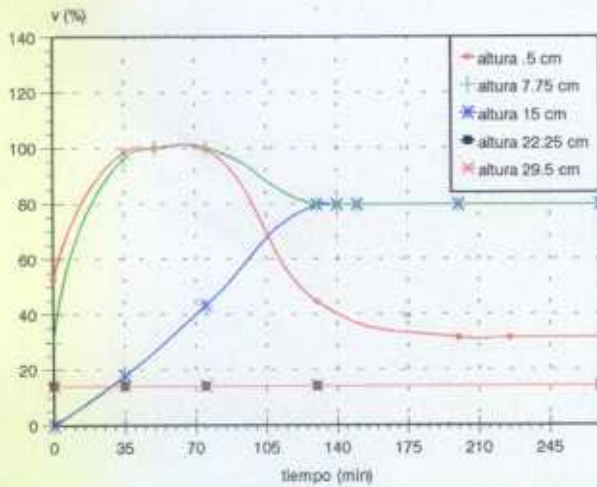


Figura III.26 Evolución de la humedad con el tiempo en cada punto medido en la superficie del ladrillo

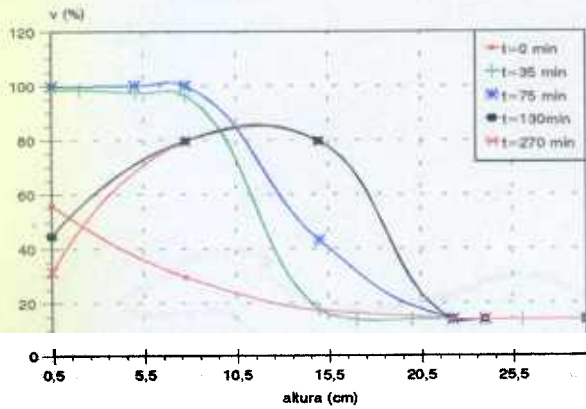


Figura III.27 Distribución de la humedad con la altura para cada tiempo en la superficie del ladrillo

Los valores de "porosidad aparente" obtenidos estarían directamente relacionados con el contenido de agua en superficie en cada punto, ya que, según las ecuaciones [III.7] a [III.10] v cuantifica la cantidad de agua en los poros del material. Esto supone que según la técnica antes presentada se puede conocer la evolución del contenido de agua del material tanto en distintos puntos de la superficie como en un único punto a lo largo del tiempo.

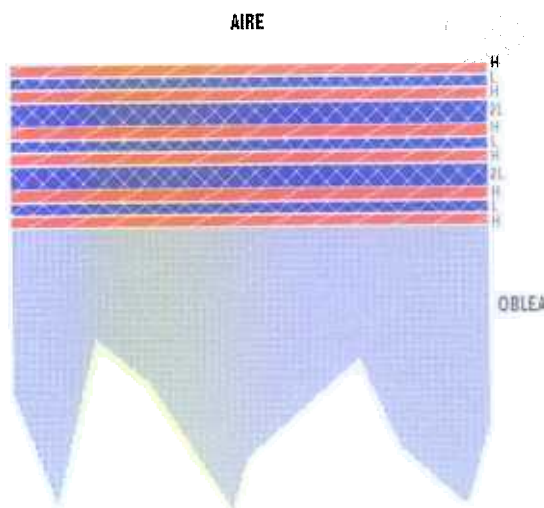
III.1.5.- Termografía Infrarroja Selectiva

Los efectos producidos por la atenuación atmosférica pueden, en muchos casos, perturbar, o incluso anular, la señal recogida por la termocámara como se ha indicado en los apartados I.5.2 y III.1.3. En casos concretos con condiciones ambientales extremas (altos índices de humedad relativa y CO_2) la Termografía Infrarroja es una técnica insuficiente para la detección de humedades, aún a distancias muy cortas entre la cámara y el objeto, debido al amplio rango espectral de detección, y a las pequeñas variaciones de energía a detectar. No obstante, si se limita la detección de la termocámara a una región en la que la atenuación

sea mínima, o en la que previamente se haya estudiado la respuesta de las termocámaras, el resultado obtenido puede mejorar sustancialmente la información recibida. Teniendo esto en cuenta se ha desarrollado la llamada **Termografía Infrarroja Selectiva**. Esta técnica está basada en el uso de filtros interferenciales específicos, ajustados a diferentes regiones, y con anchuras mínimas para que el equipo de termografía tenga capacidad de detección. De esta forma, aunque la energía total detectada por la termocámara es menor, al estar calibrada para un filtro específico es más sensible a los pequeños cambios que se produzcan en esta región.

III.1.5.a.- Filtros interferenciales

Los filtros interferenciales pueden clasificarse bien por sus características de transmisión o por los fenómenos físicos en los que está basada su acción. Un filtro de paso de onda larga



transmite toda la radiación con longitudes de onda mayores que el valor específico; un filtro de paso de onda corta, toda la que tiene longitud de onda menor que el valor específico. Un filtro paso de banda transmite entre las dos longitudes de onda límite (λ_1 , λ_2 y λ_3).

En la figura III.28 se presenta la estructura de un filtro obtenido por depósito alternativo de capas de Ge (con alto índice de refracción) y SiO (bajo índice de refracción). La estructura multicapa del elemento es:



donde H representa una capa de alto índice de refracción (Ge) y L, una de bajo índice de refracción (SiO)

La termocámara usada en el presente trabajo de tesis trabaja con un sensor cuántico de InSb que tiene respuesta espectral entre 2.5 y 5.6 μm (tabla III.11). En la figura III.29. se presentan las curvas de absorción del CO_2 y del H_2O en la región de 2 a 10 μm que incluye la banda de trabajo de la cámara infrarroja.

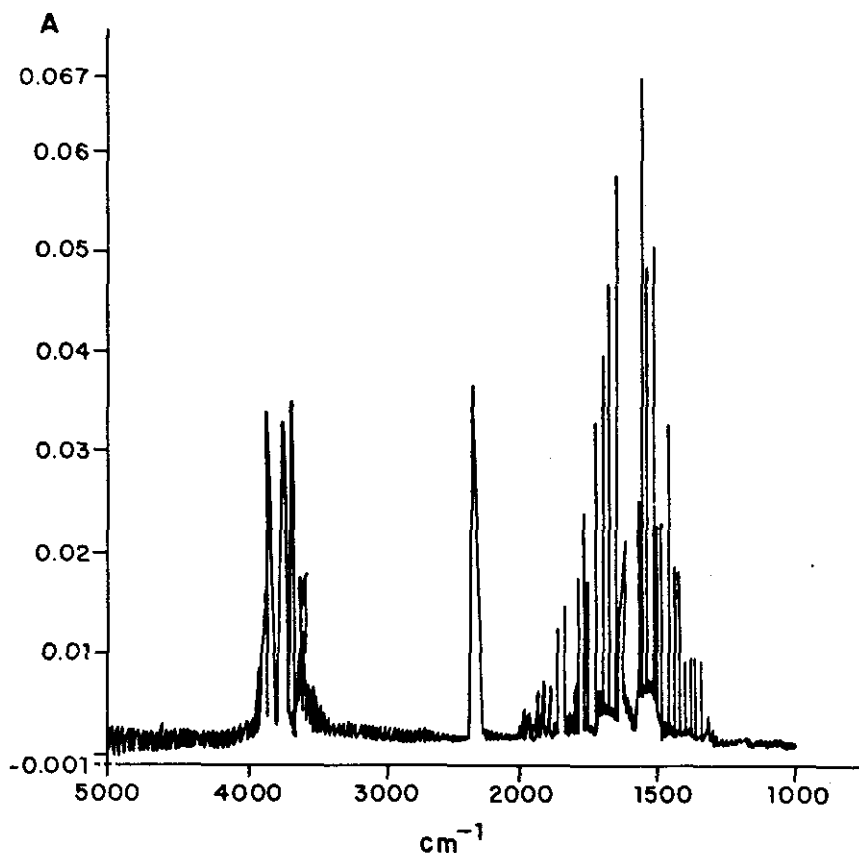


Figura III.29 Curvas de absorción del CO₂ y del agua

A partir del análisis de dichas curvas, se seleccionaron dos bandas de detección:

Entre 2.5 y 3 μm que corresponde a la banda de absorción del CO₂ y el H₂O.

Entre 4 y 4.5 μm que corresponde con una banda de absorción del CO₂.

Los filtros usados están, respectivamente centrados en 2.7 μm (filtro de H₂O) y en 4.3 μm (filtro de CO₂). Tienen un ancho de banda de 0.5 μm . El espesor óptico de cada capa es $\lambda/4$ a la respectiva longitud de onda y el coeficiente de transmisión es del 40 y del 60% respectivamente.

III.1.5.b.-Puesta a punto de la técnica

Una vez caracterizados los filtros que se habrían de usar en el equipo de termografía, se hacía necesario el examen de la Termografía Infrarroja Selectiva como herramienta desarrollada para un fin concreto. A este respecto, se consideró imprescindible abordar de

nuevo todo lo referente a la propia técnica ya expuesto en el apartado III.1. Las ensayos referentes al presente estudio se plantearon de la forma expuesta en dicho apartado. Los resultados obtenidos se presentan en las siguientes curvas:

*** Curvas de calibrado**

La figura III.30 muestra las curvas de calibración del filtro de H₂O y las del filtro de CO₂.

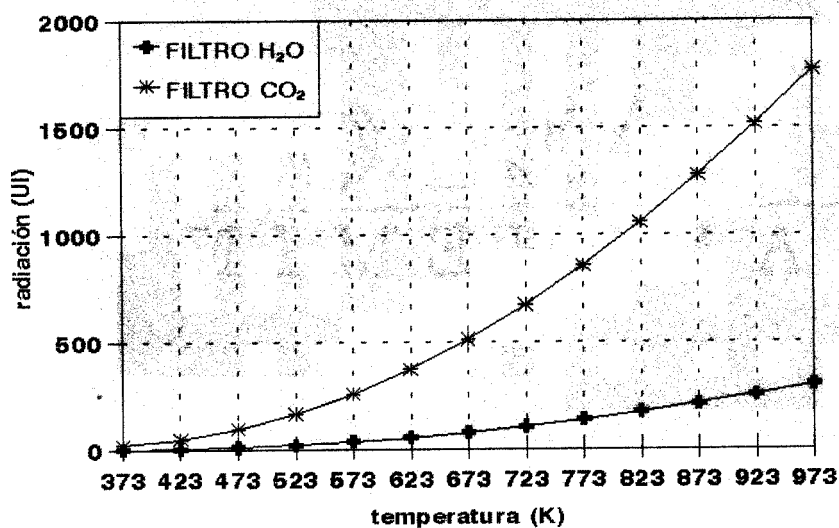


Figura III.30 Curvas de calibración de la termocámara usada con filtros interferenciales

*** Efecto de atenuación atmosférica**

La figura III.31 muestra las curvas de radiación/temperatura en atmósferas al 35% y al 80% de humedad relativa para el filtro de H₂O; La figura III.32, las mismas curvas para el filtro de CO₂.

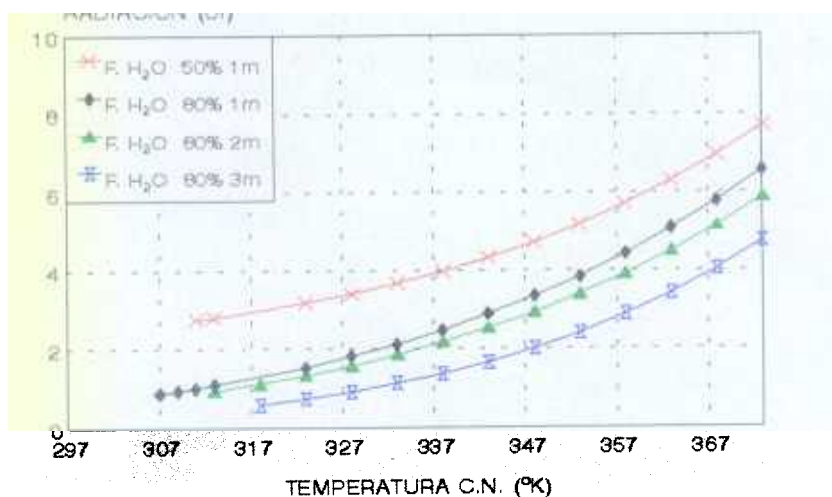


Figura III.31 Curvas de radiación/temperatura en distintas atmósferas para el filtro de H₂O

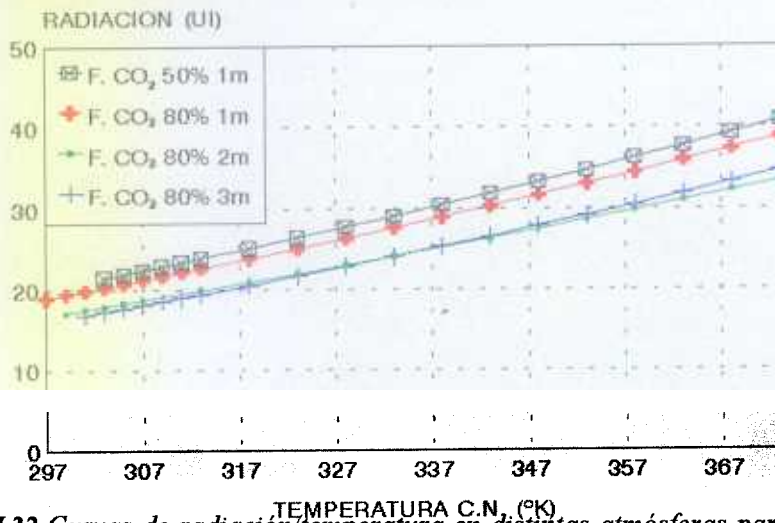


Figura III.32 Curvas de radiación/temperatura en distintas atmósferas para el filtro de CO₂

Como era de esperar, en función de los resultados obtenidos en el apartado de atenuación atmosférica, el filtro de CO₂ es prácticamente independiente del contenido de agua y de la distancia, mientras que el de H₂O es muy dependiente. En función del tipo de problema será conveniente usar uno, ninguno o los dos filtros.

III.1.5.c.-Ensayos en laboratorio

Con estos primeros ensayos se pretendía justificar experimentalmente el planteamiento teórico antes expuesto. Para ello se estudiaron procesos de capilaridad y evaporación en probetas de escayola. En ambos casos se utilizó agua destilada.

El objetivo último perseguido consistía en evaluar las mejoras aportadas por la Termografía Infrarroja Selectiva a los estudios relacionados con la presencia de humedad en materiales. Como se pretendía hacer un estudio comparativo de los termogramas obtenidos, todos se tomaron en el mismo nivel de radiación aún a riesgo de no obtener la mejor calidad posible de la imagen.

* Ensayos de capilaridad

Se realizaron ensayos sobre probetas de yeso de características conocidas, colocadas dentro de una caja negra en posición vertical y sometidas a procesos de succión capilar con agua pura a 20°C. La parte inferior de las probetas se mantuvo en contacto con la disolución durante 40 min durante este período de tiempo se hacían medidas de radiación con cada uno de los filtros interferenciales antes citados. En las figuras III.33 a III.35 se presentan los termogramas obtenidos.

La discusión tanto de los resultados aquí expuestos como de los referidos a procesos de succión capilar, que se presentarán en el siguiente punto, se realizará en dos apartados distintos referidos respectivamente a la técnica en sí y a los materiales. Hasta este momento, todos los resultados presentados se refieren a las características o posibles mejoras realizadas en la técnica. Un segundo problema importante a discutir está relacionado con los propios materiales de construcción y las disoluciones usadas. Este segundo aspecto se tratará en profundidad en capítulos posteriores, y, en ellos, se volverá a hacer referencia a los resultados que ahora se presentan.

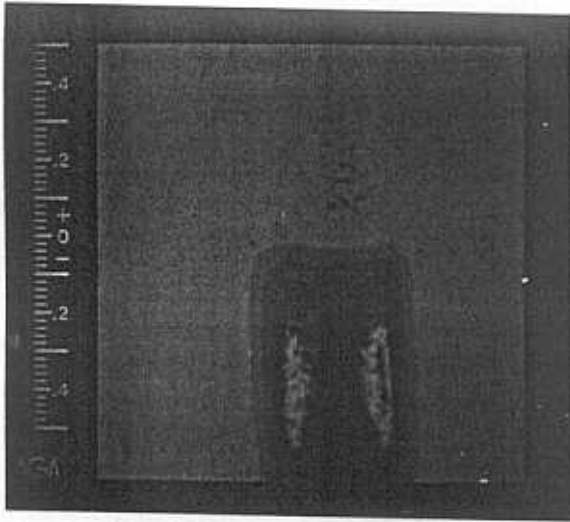


Figura III.33 Termograma correspondiente al ensayo sin filtro

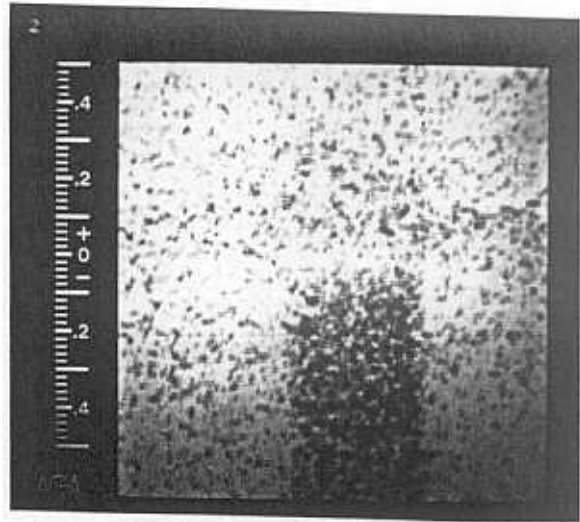


Figura III.34 Termograma correspondiente al ensayo con filtro de agua

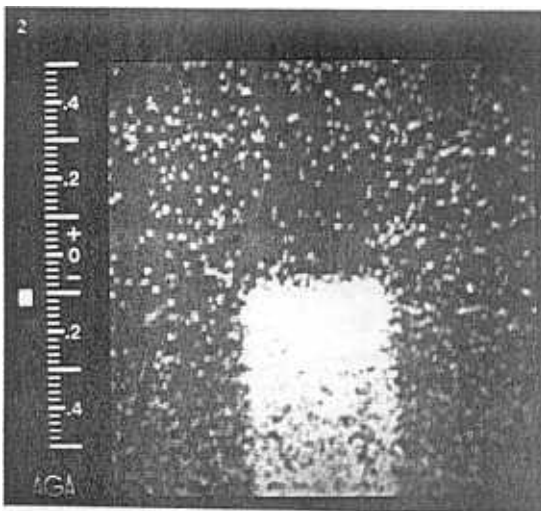


Figura III.35 Termograma correspondiente al ensayo con filtro de CO_2

*** Ensayos de evaporación**

Las probetas se mantuvieron sumergidas durante dos horas en agua destilada. Posteriormente, se colocaron en posición vertical dentro de la caja negra fuera del contacto con agua y se midió la radiación emitida usando cada uno de los filtros interferenciales. Las medidas se repitieron 48 horas más tarde. Además, las muestras se pesaron periódicamente hasta que los pesos se hicieron constantes. En las figuras III.36 a III.41 se presentan los termogramas obtenidos. Los resultados aquí presentados se estudiarán en el apartado III.4.3 referente a procesos hídricos en materiales de construcción.

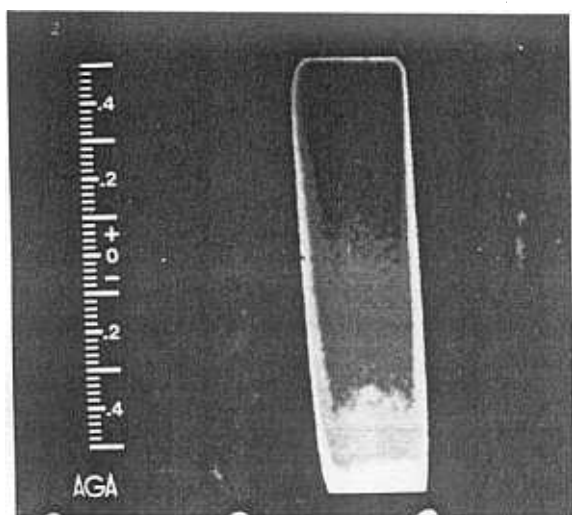


Figura III.36 Termograma correspondiente al ensayo sin filtro durante el primer día de evaporación

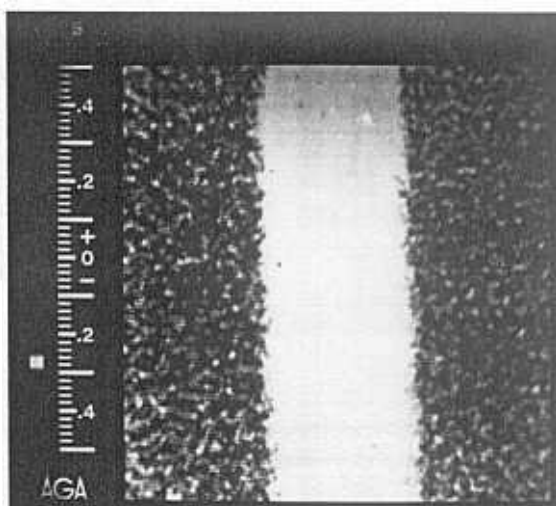


Figura III.37 Termograma correspondiente al ensayo con filtro de agua durante el primer día

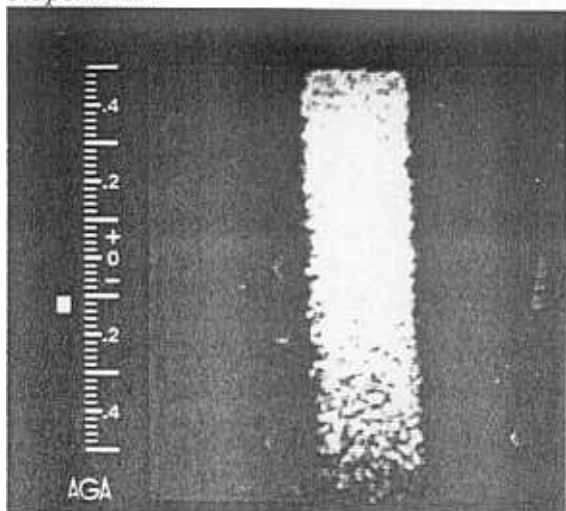


Figura III.38 Termograma correspondiente al ensayo con filtro de CO₂ durante el primer día de evaporación

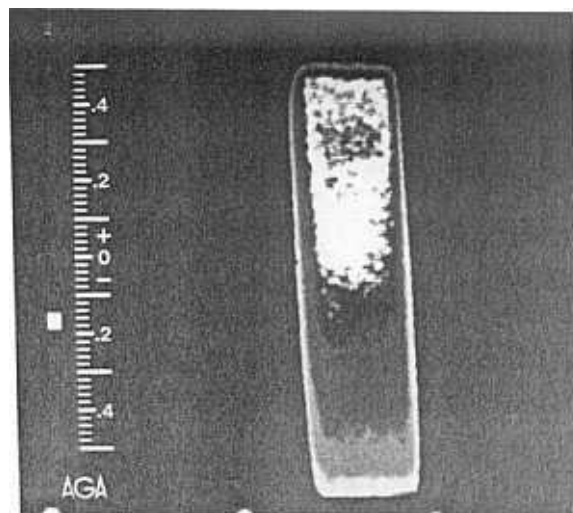


Figura III.39 Termograma correspondiente al ensayo sin filtro durante el tercer día de evaporación

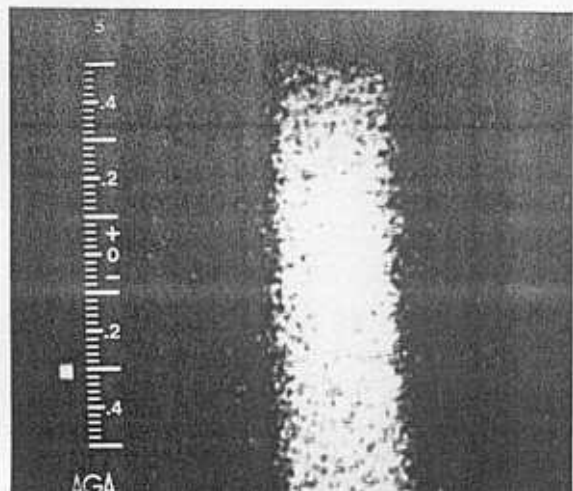


Figura III.40 Termograma correspondiente al ensayo con filtro de agua durante el tercer día de evaporación

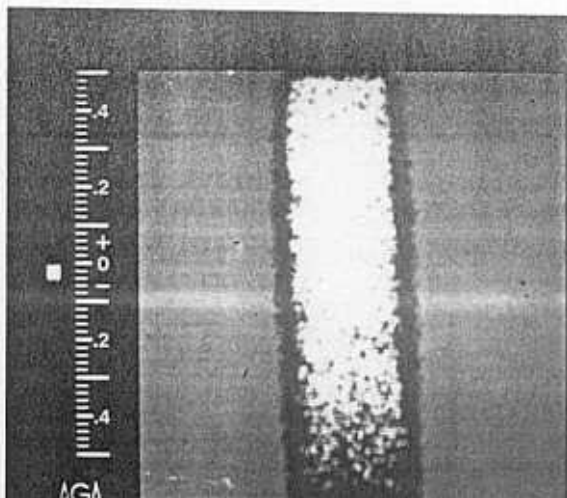


Figura III.41 Termograma correspondiente al ensayo con filtro de CO₂ durante el tercer día de evaporación

La comparación de los termogramas anteriores (figuras III.33 a III.41) pone de manifiesto el tipo de información que aporta el uso de filtros interferenciales. En primer lugar, se puede observar la pérdida de señal (respecto al caso de trabajar con la cámara abierta) ocurrida cuando se utilizan filtros interferenciales. Tal circunstancia ocurre por varias razones. Por una parte, existe una pérdida real de señal ya que el uso de filtros limita la banda de detección usada. Por otra, en el caso de estudios con **Termografía Infrarroja Selectiva** se pretendía hacer un estudio comparativo de las imágenes obtenidas en las distintas bandas de trabajo. Por eso, todos los termogramas se obtuvieron manteniendo constante el nivel de radiación de la superficie, aún a riesgo de obtener imágenes con peor calidad.

La comparación de los termogramas obtenidos independientemente del tipo de ensayo al que correspondan pone de manifiesto la validez de la **Termografía Infrarroja Selectiva** para el estudio de la humedad en materiales de construcción. El uso de la cámara abierta aporta la máxima información sobre el estado del material (figuras III.33, III.36 y III.39). El filtro de agua (figuras III.34, III.37 y III.40) muestra exclusivamente la parte tanto del material como de su entorno donde existe agua. Así, el uso de estos filtros pone de manifiesto los procesos de evaporación ocurridos en el material (observar la franja brillante que rodea al material en las imágenes correspondientes al filtro de agua). Finalmente, el filtro de CO₂ da una imagen más pobre de todo el material, pero, a partir de ella, es posible establecer la altura real que alcanza el agua en el material.

III.2.- Materiales de construcción

Como se ha señalado en el apartado I.2 son muchos los parámetros tanto físicos como químicos que condicionan el comportamiento de un material de construcción. Además, ninguna de las variables físicas que determinan su comportamiento puede definirse por un valor puntual, sino que existe una banda de oscilación de dichas propiedades para cada material específico. La complejidad de estos materiales implica que no pueden ser estudiados como formados por partes independientes que necesitan una caracterización individualizada, sino más bien, como un sistema intrincado e interconectado que obedece a leyes interdependientes de sus propiedades físico-químicas. Además, cualquier variación en las materias primas o en la forma de fabricación (por ejemplo, el grado de compactación o el tiempo de curado en morteros) puede tener una influencia drástica en las propiedades del mismo.

Por estas razones, es importante llevar a cabo una caracterización previa y rigurosa de los materiales utilizados. A continuación se presentan los ensayos de caracterización realizados.

III.2.1.- Caracterización de los materiales

De las propiedades físicas de un material de construcción es, probablemente, la porosidad la que mayor influencia tiene en la forma en que el agua se mueve en su interior. Sin embargo, se han estudiado también otros parámetros con objeto de completar una información que, como se verá más adelante, en ocasiones resulta ser muy útil.

Los materiales seleccionados para la realización de los ensayos fueron: Dos tipos diferentes de piedra (un granito y una caliza), mortero de cemento portland, mortero de cal, escayola (prismas y placas), ladrillo de tejar y tres tipos diferentes de morteros de los que en la actualidad se utilizan en restauraciones y reparaciones llamados respectivamente mortero I, II y III. Con todo ello se tiene una muestra de la mayor parte de los materiales utilizados en construcción.

La caracterización de los materiales se ha realizado atendiendo fundamentalmente a dos criterios:

- Un criterio químico y mineralógico
- Un criterio físico.

Según el primero de ellos, todos los materiales han sido sometidos, como mínimo, a un análisis por difracción de rayos X

Con respecto al segundo criterio, hay que resaltar, fundamentalmente el estudio de porosidades, llevado a cabo a través de la técnica de Porosimetría de Mercurio y mediante el ensayo de Porosidad Accesible al Agua. Finalmente, probetas prismáticas de los materiales fueron mecánicamente ensayadas a compresión.

III.2.1.a.- Caracterización mineralógica

Las figuras III.42 a III.49 muestran los difractogramas de los materiales utilizados en los distintos ensayos llevados a cabo durante la presente investigación. En cada figura se describe brevemente la composición mineralógica del material en lo que respecta a las fase mayoritarias que lo constituyen.

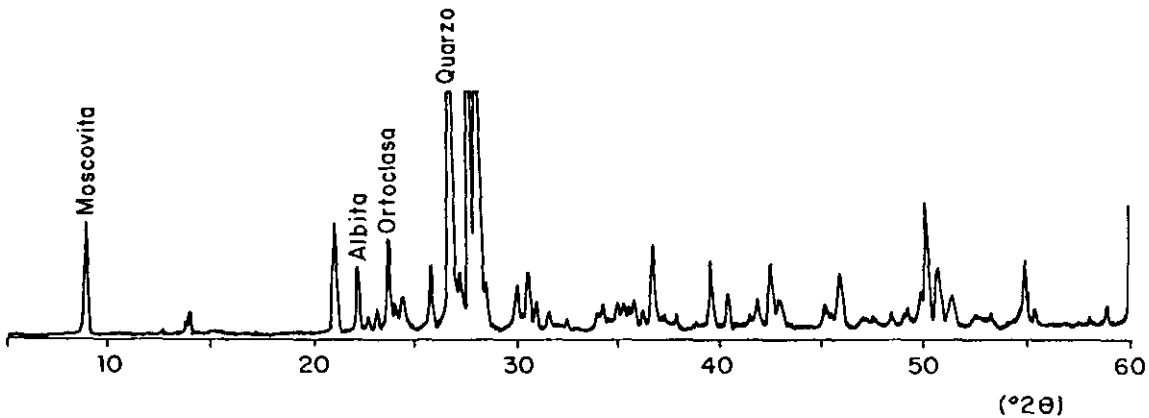


Figura III.42 Difractograma correspondiente al granito (procedente de la provincia de Madrid). Las fases constituyentes mayoritarias son: Cuarzo, Feldespato tipo Albita, Ortoclasa y una Mica del tipo Moscovita. Como en el resto de las figuras, se señalan las líneas de difracción de mayor intensidad.

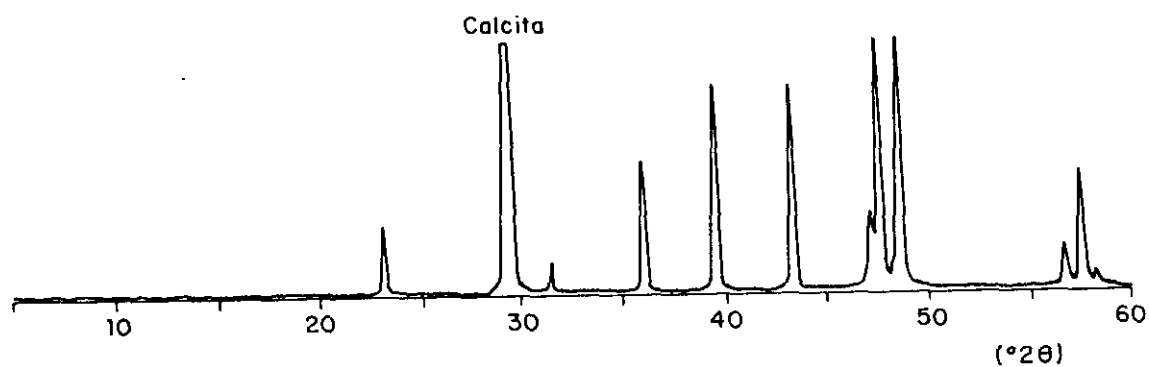


Figura III.43 Difractograma correspondiente a la piedra caliza (caliza de Colmenar). Mineralógicamente la roca está constituida por una única fase cristalina que es la calcita.

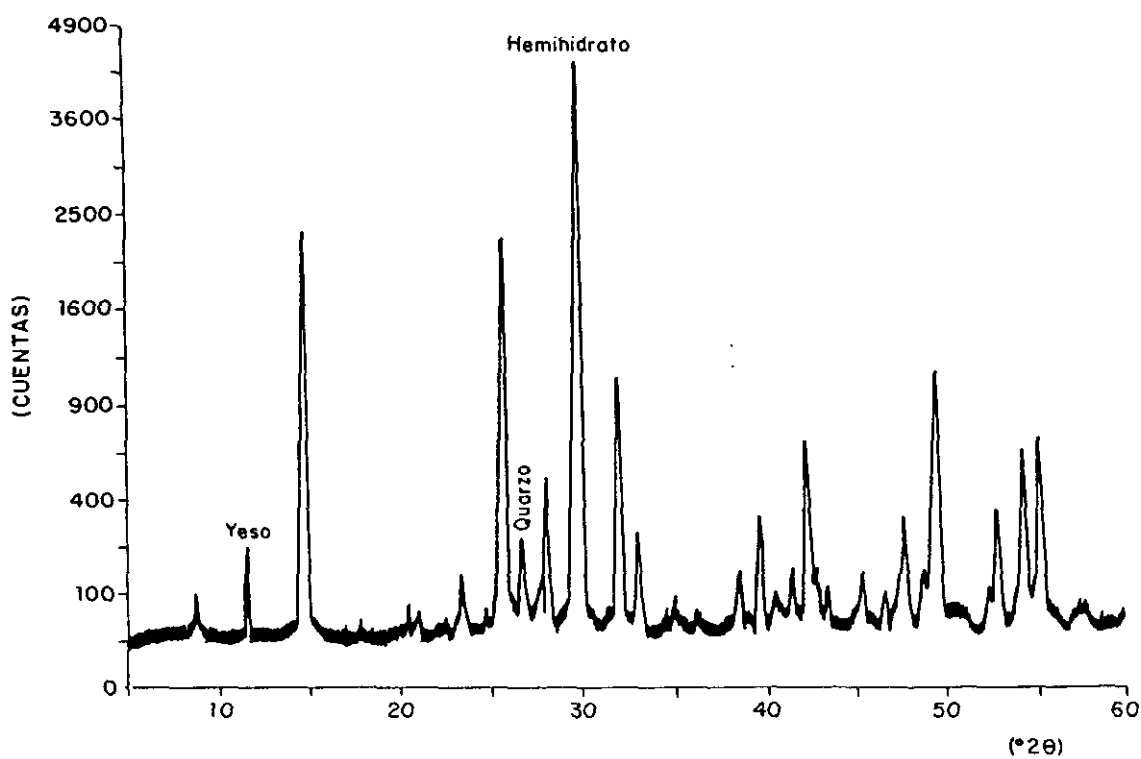


Figura III.44 Difractograma correspondiente a la escayola. Aunque el componente mineralógica fundamental es el Hemihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$) la placa contiene impurezas de Yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y Quarzo

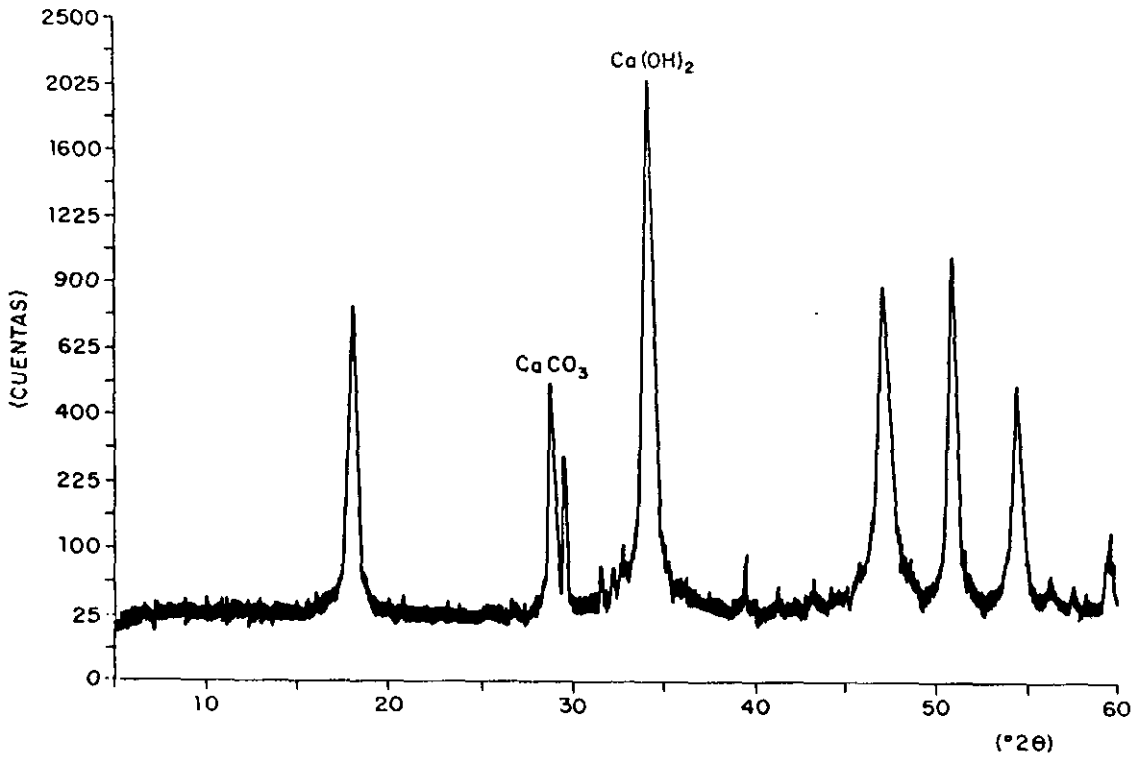


Figura III.45 Difractograma correspondiente a la Cal. Los morteros de Cal y Cemento Portland se hicieron utilizando una arena de tipo siliceo, monogranular y con un diámetro de partícula comprendido entre 1 y 1.5 mm. La cal utilizada fue, como se ve en la figura, una cal apagada constituida básicamente por Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) y trazas de Calcita.

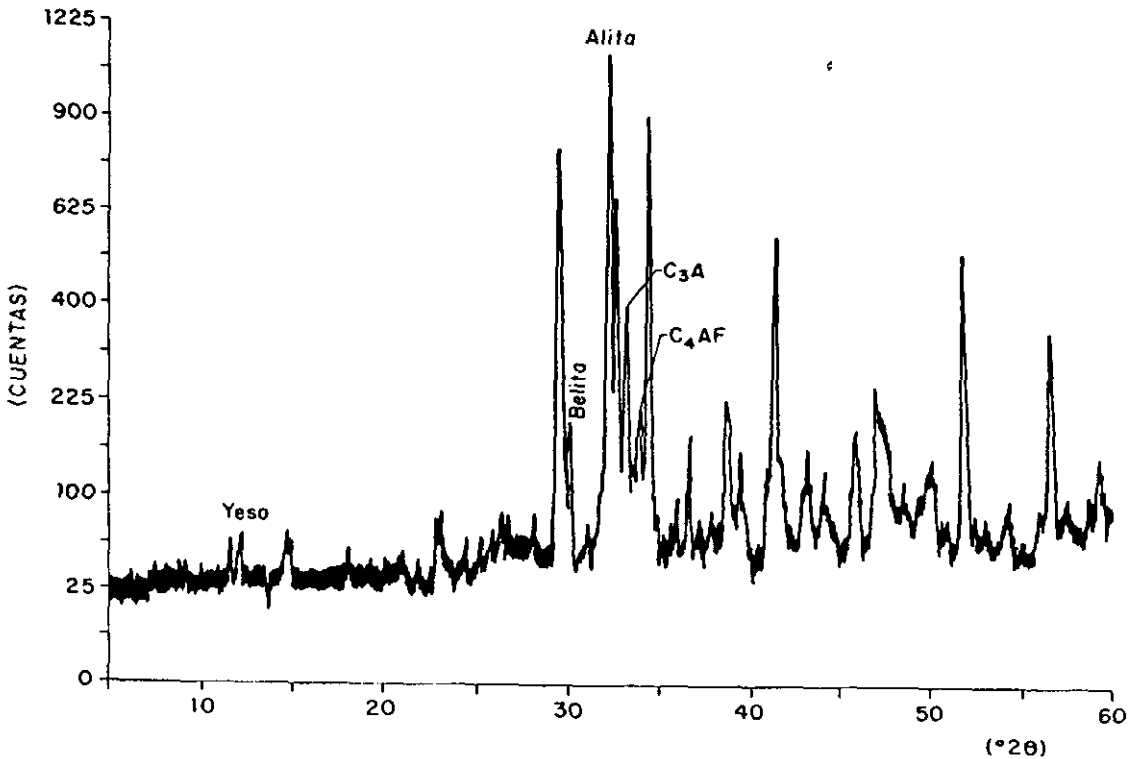


Figura III.46 Difractograma correspondiente al Cemento Portland. Está constituido fundamentalmente de Alita, Belita, Fase Ferrítica, Aluminato Tricálcico y Yeso.

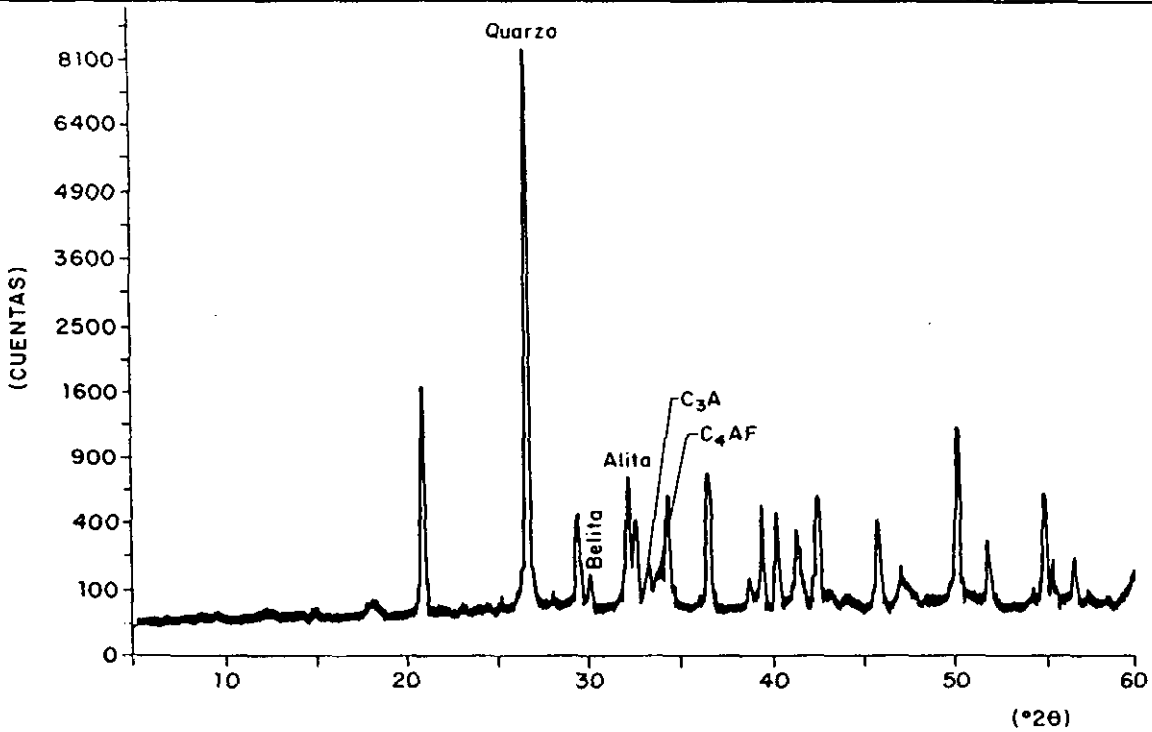


Figura III.47 Difractograma correspondiente al Mortero I. Es un mortero comercial que viene ya preparado (cemento + arena) y para ser mezclado con agua. El árido es de tipo silíceo, Quarzo, y se encuentra, aproximadamente en relación 1:1 con el cemento que, a su vez está constituido por Alita, Belita, Fase Ferrítica, Aluminato Tricálcico y Yeso.

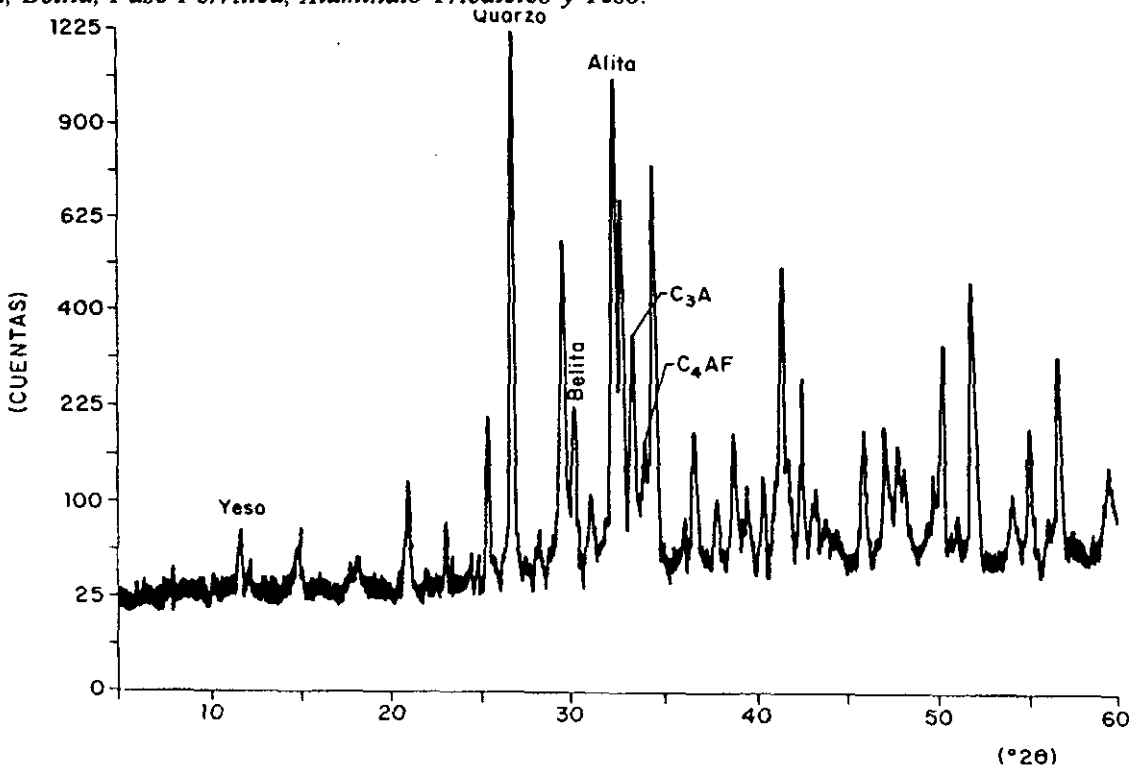


Figura III.48 Difractograma correspondiente al mortero II. También es un mortero comercial preparado para mezclar con agua. La diferencia fundamental con el mortero I estriba fundamentalmente en la relación cemento/arena, que, en este caso es de 1 a 5. Por lo demás, los constituyentes mineralógicos son los mismos.

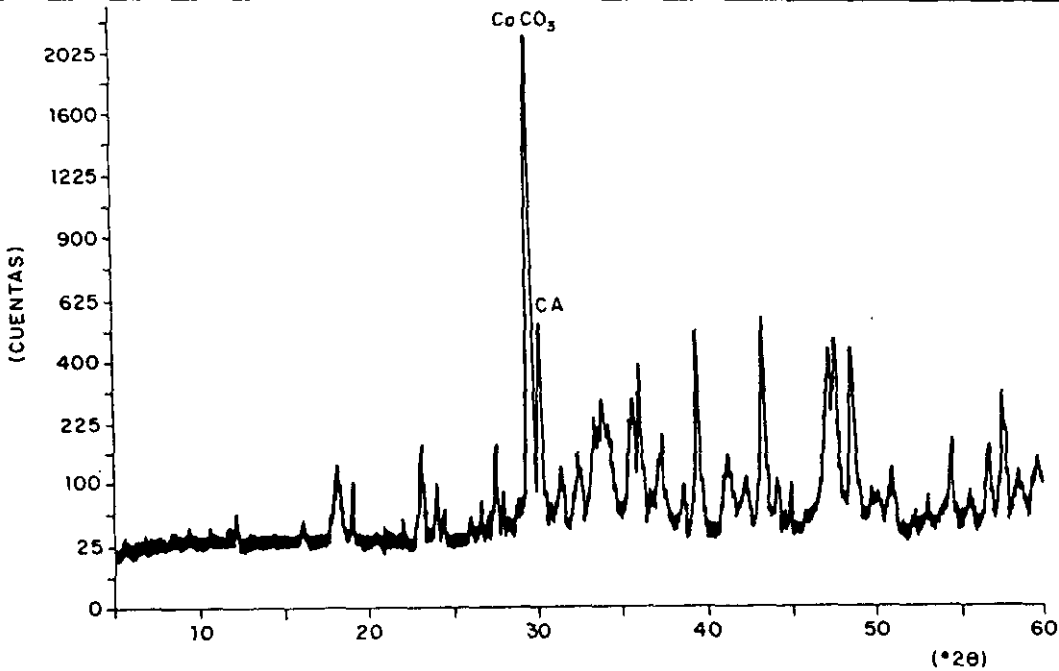


Figura III.49 Difractograma correspondiente al mortero III. Al igual que los anteriores, este mortero comercial se presenta preparado para su uso. Sin embargo, éste posee una diferencia fundamental que lo diferencia de los anteriores. El tipo de cemento con el que se fabricó el mortero es un cemento aluminoso, constituido fundamentalmente por Aluminato Monocálcico (CA). El árido de este mortero es de tipo calcáreo.

III.2.1.b.- Caracterización física

Debido a la actuación experimental desarrollada en la presente investigación, la caracterización física de los materiales y, más concretamente, el estudio de la porosidad, constituye uno de los aspectos más importantes. Es por eso que tal variable se midió utilizando dos técnicas diferentes: Porosidad Accesible al Agua y Porosimetría de Mercurio.

* Porosidad accesible al agua

Los ensayos de porosidad accesible al agua se realizaron siguiendo las recomendaciones de la RILEM (/30/). Se consideran tres cubos (denominados I, II, y III) de 4 cm de lado. Dichas muestras se mantienen en una estufa a 60 ± 5 °C hasta que alcanzan un peso constante, M_1 , que se considera cuando la diferencia entre dos pesadas sucesivas (realizadas cada 24 horas) no excede el 0.1% del peso de la muestra, determinada ésta con una precisión del 0.01%. En el caso de probetas de escayola, la temperatura de la estufa no debe exceder los 40 ± 5 °C, para evitar la deshidratación del material.

Una vez alcanzado el peso constante M_1 , las muestras se someten a una baja presión de 20 mmHg durante 24 h para eliminar el aire contenido en sus poros. Posteriormente, se

introduce agua a 15-20 °C de forma que las muestras permanezcan totalmente sumergidas al menos 15 min. El vacío se mantiene durante la entrada de agua y, posteriormente, durante 24 h.

Pasado este período de tiempo, las muestras se mantienen sumergidas en agua a presión atmosférica durante otras 24 h y se determina el valor de M_2 mediante pesada hidrostática (equivalente al volumen de agua desalojada por el material) y el peso de la muestra saturada M_3 para cada una de ellas. Para calcular M_3 es importante secar antes la muestra superficialmente con un paño húmedo, para evitar perturbaciones producidas por la evaporación. La porosidad accesible al agua (en %) se define como:

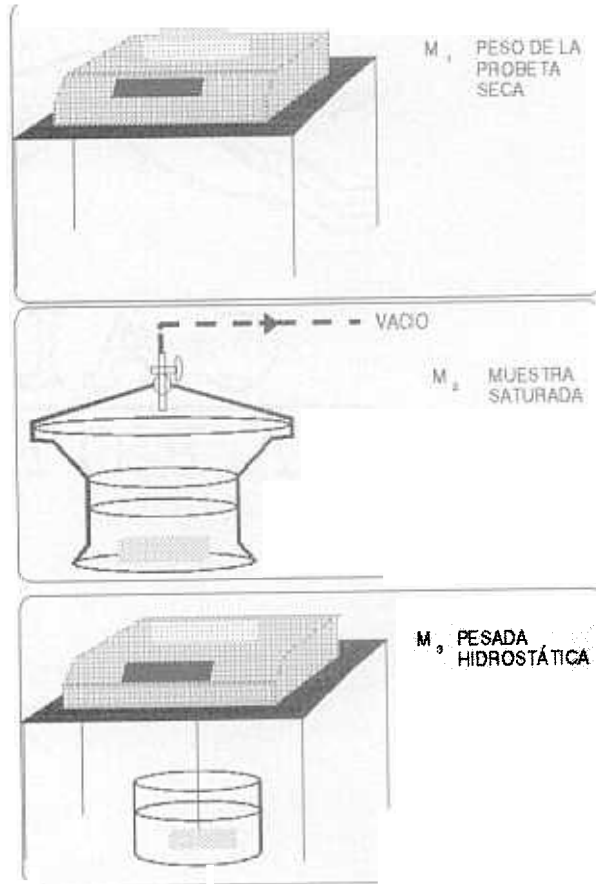
$$P = \frac{M_3 - M_1}{M_3 - M_2} 100 \quad [\text{III.15}]$$

donde:

M_3 es el peso de la muestra saturada en g

M_2 es el peso hidrostático en g

M_1 es el peso de la probeta seca en g



En la figura III.50 se muestra un gráfico del experimento.

Figura III.50 Gráfico del experimento de Porosidad Accesible al Agua

De igual forma, se puede calcular la densidad real del material (en Kg/m^3), definida como la masa por unidad de volumen de material impermeable:

$$\rho_R = \frac{M_1}{M_3 - M_2} 10^3 \quad [\text{III.16}]$$

y la densidad aparente (en Kg/m^3), como:

$$P_a = \frac{M_1}{M_1 - M_2} 10^3 \quad \text{[III.17]}$$

Los resultados obtenidos se presentan en la tabla III.13.

CÁLCULO DE ERRORES

Derivando logarímicamente las ecuaciones anteriores, se obtiene un error de ± 0.2 para las densidades y de ± 0.02 para la porosidad. Como los valores de Porosidad Accesible al agua se calculan como valor promediado de los tres obtenidos en las distintas muestras, se ha considerado un error de la medida triple al obtenido mediante estos cálculos. Los valores obtenidos se presentan en la tabla III.13.

En cualquier caso, la desviación entre los valores obtenidos para las distintas muestras de un mismo material son muy superiores a este valor (en torno al 20-30 %).

* Porosimetría de mercurio

Las medidas de porosidad a través de la técnica de Porosimetría de Mercurio, se realizaron sobre probetas cilíndricas de 1 cm de altura y 0.5 cm de diámetro que se extrajeron de otras prismáticas de 4X4X16 cm. Igual que en el caso anterior, las medidas se realizaron sobre tres muestras de cada material. El valor presentado corresponde con el valor medio de los obtenidos. Las medidas se realizaron con un equipo Autopore II 9220 (Micromeretics) mostrado en la figura III.51.

Según lo expuesto en el capítulo dedicado a la Porosimetría de Mercurio (apartado I.4.2), mediante esta técnica se obtienen resultados tanto de porosidad (en %) y de distribución de tamaño de poros como de densidad aparente del material para un modelo tal que todos los poros son morfológicamente iguales. En la tabla III.13 se presentan los valores obtenidos de porosidad absoluta (en %) y la densidad aparente en (Kg/m^3).

Sobre las curvas obtenidas mediante esta técnica, se realizó el siguiente análisis: En primer lugar, las curvas se ajustaron, mediante un programa informático adecuado, a una serie de funciones gaussianas. Una vez deconvolucionados los picos, se calculó el área encerrada por cada uno y el % respecto al área total de la curva. En la figura III.52 se presenta la curva ajustada de uno de los materiales estudiados. Los resultados se representan en las figuras III.53 a III.60. Cada diagrama de barras corresponde a uno de los materiales

estudiados y cada color a una de las muestras (denominadas muestra 1, 2 y 3).

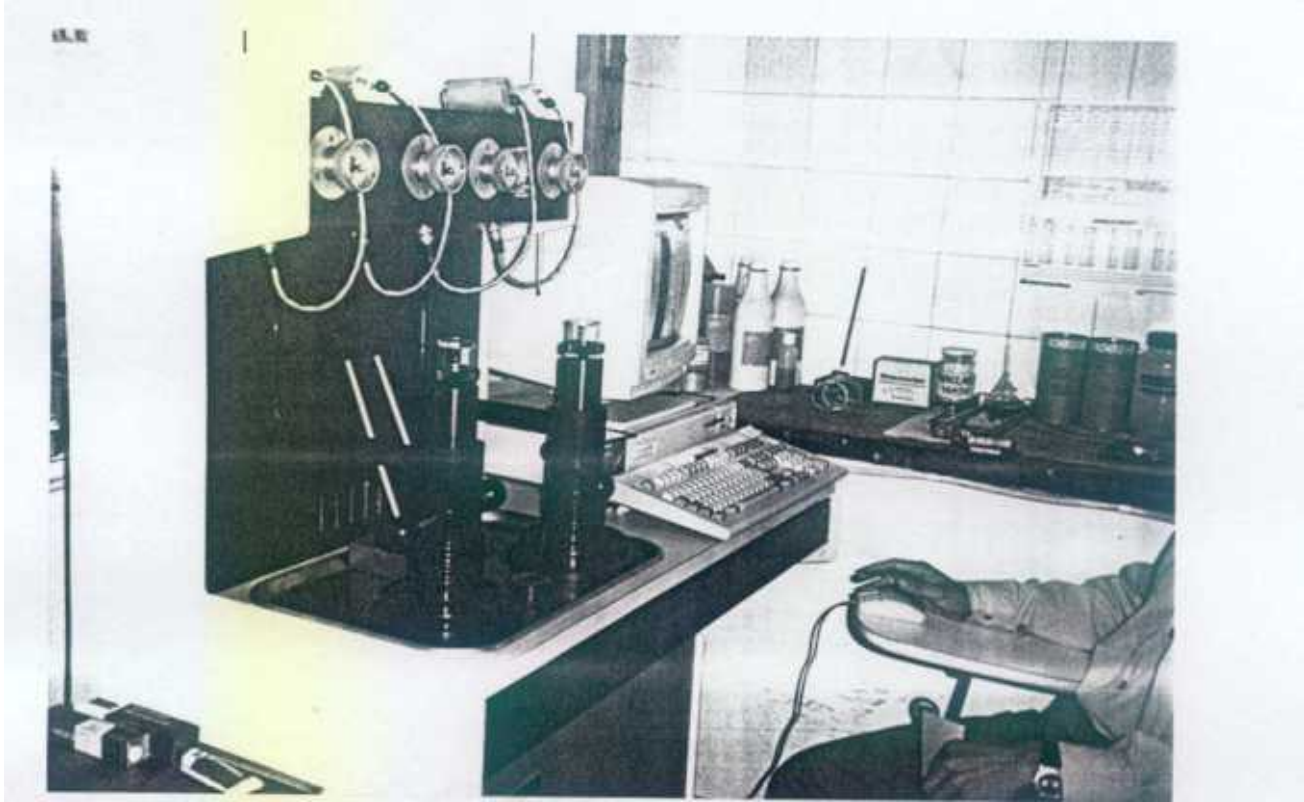


Figura III.51 Equipo de Porosimetría de Mercurio usado en la realización de los ensayos

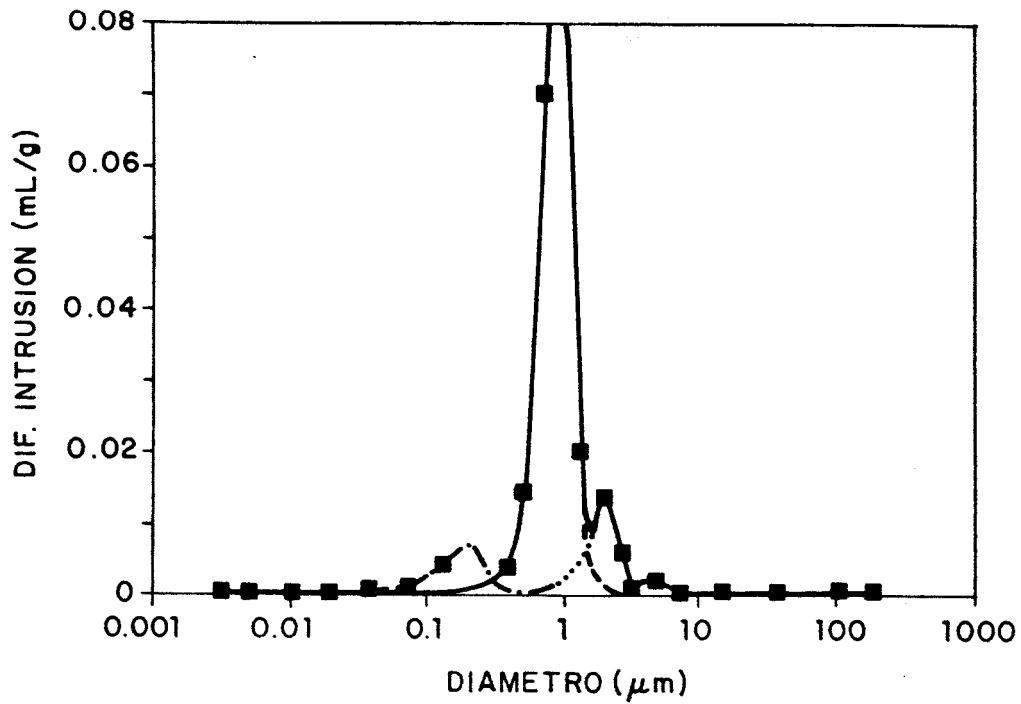


Figura III.52 Curva obtenida en el ensayo de Porosimetría realizado sobre mortero de cal

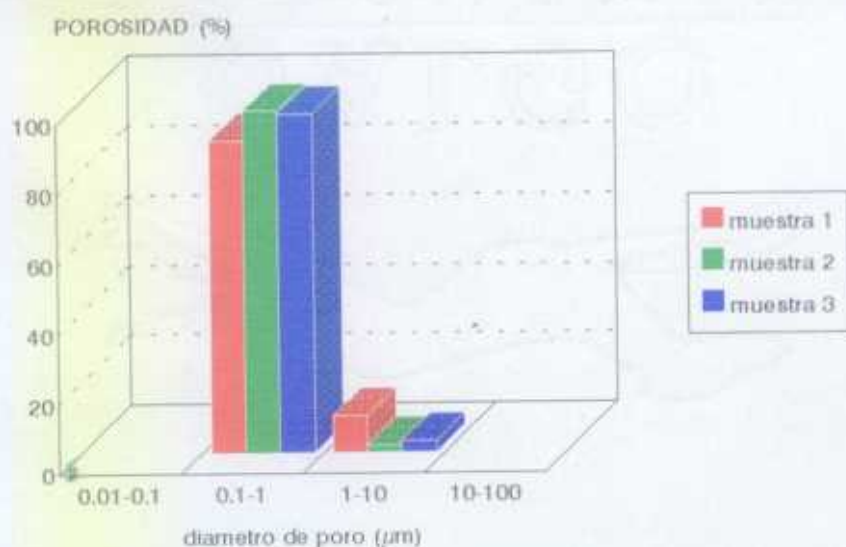


Figura III.53 Distribución de tamaños de poro obtenida en mortero de cal

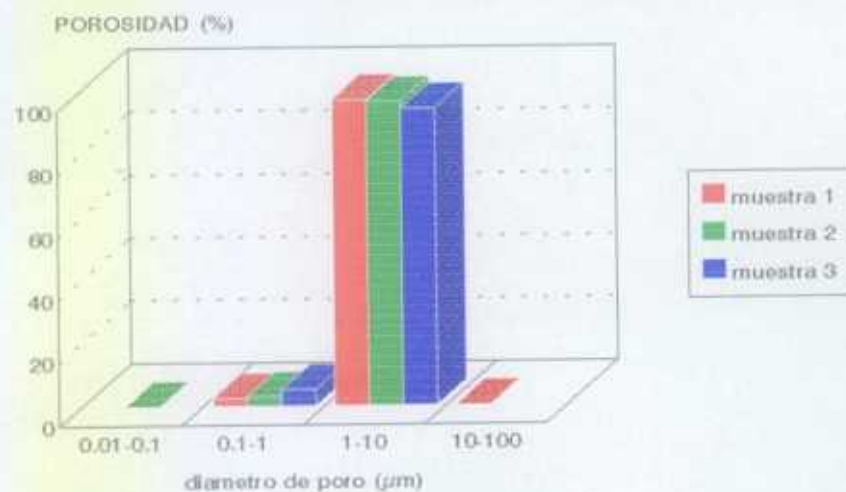


Figura III.54 Distribución de tamaños de poro obtenida en ladrillo

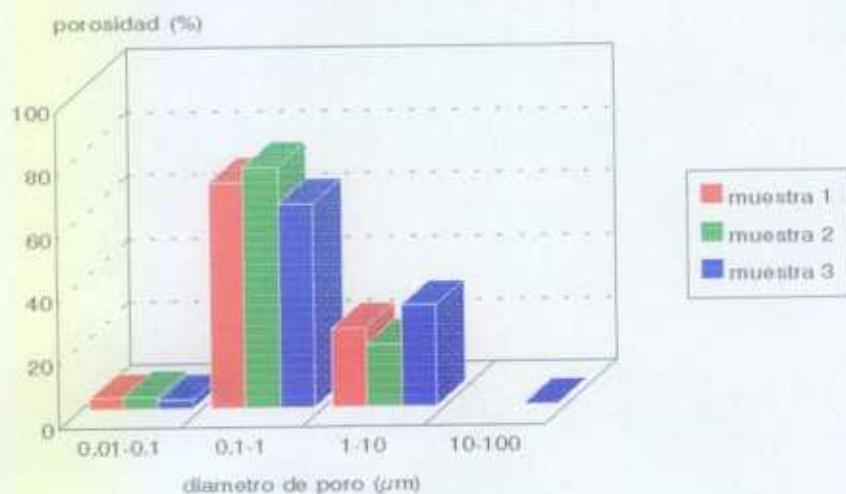


Figura III.55 Distribución de tamaño de poros obtenida en caliza

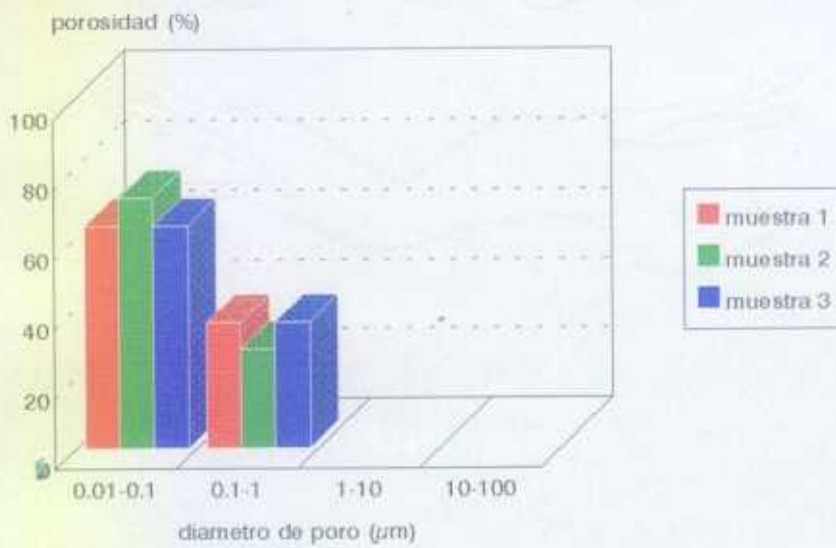


Figura III.56 Distribución de tamaño de poro obtenida mortero de cemento

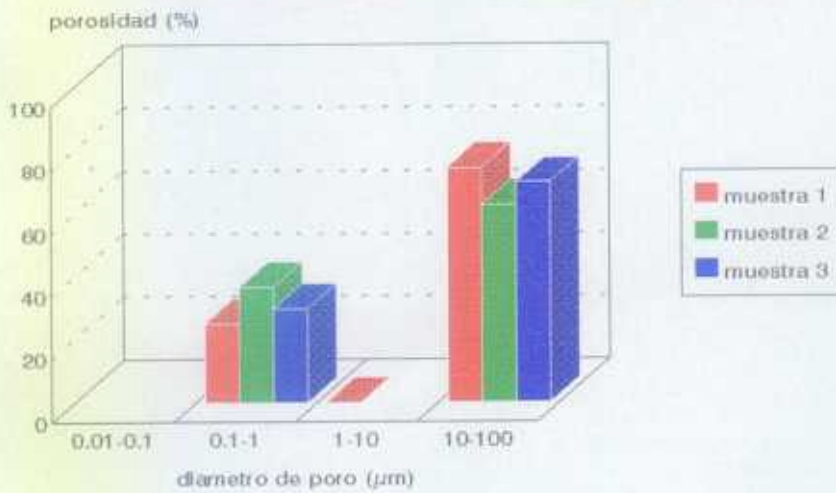


Figura III.57 Distribución de tamaño de poro obtenida en granito

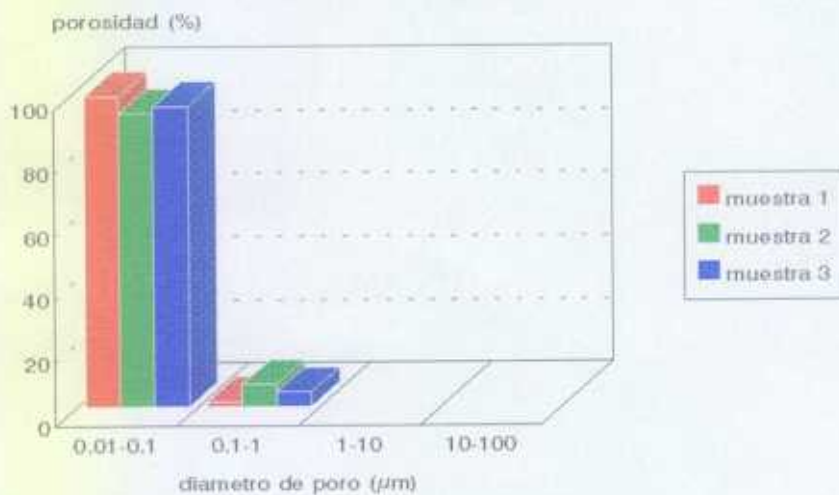


Figura III.58 Distribución de tamaño de poro obtenida en el mortero de reparación I

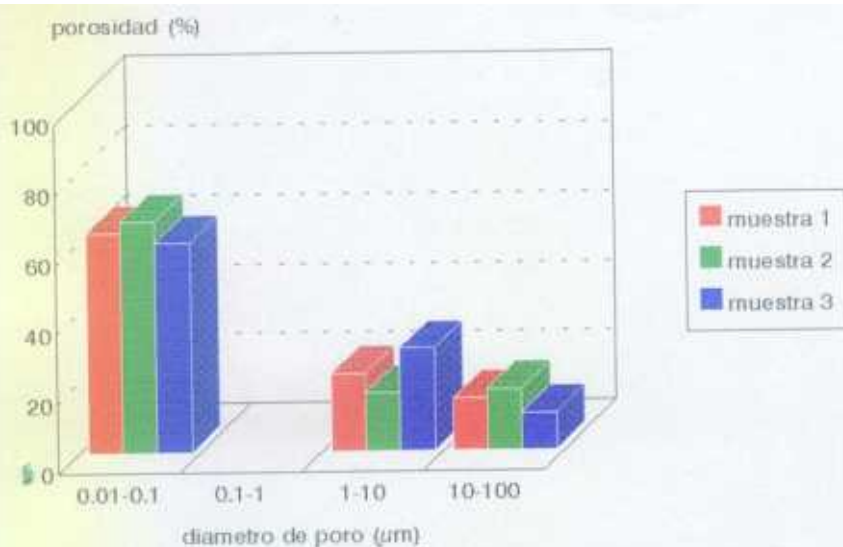


Figura III.59 Distribución de poros obtenida en el mortero de reparación II

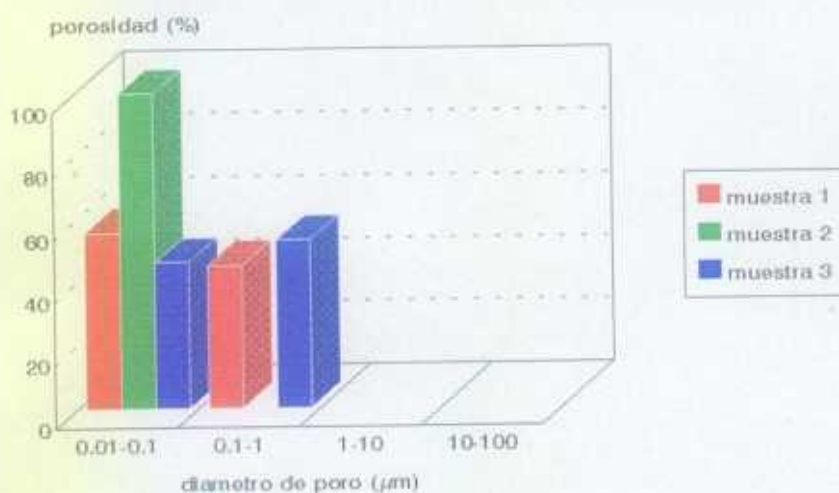


Figura III.60 Curva obtenida en el ensayo de Porosimetría realizado sobre mortero de reparación III

Mediante esta técnica no fue posible obtener resultados para las probetas de escayola. Las altas presiones a las que se someten los materiales durante el desarrollo de tales ensayos producen la rotura de los capilares en materiales poco resistentes como el anteriormente mencionado y, por tanto, los resultados obtenidos en estos casos no son fiables.

Tanto la medida de Porosidad Accesible al Agua como la de Porosimetría de Mercurio, se realizaron con muy buena precisión (± 0.1 en el caso más desfavorable), sin embargo, la heterogeneidad de los materiales hace que cada muestra dé un valor diferente de porosidad. Este hecho se pone de manifiesto claramente si se comparan las distribuciones de tamaño de poro obtenidas en un único material (figuras III.53 a III.60). Por eso, tales resultados deben considerarse sólo como un comportamiento general de cada material. En

casos específicos en los que se considera imprescindible el conocimiento de valores "exactos" de porosidad y distribuciones de tamaño de poro en el material, éste debe ser medido en la propia muestra.

Por otra parte, existen también desviaciones más o menos grandes entre los resultados de porosidad obtenidos mediante las distintas técnicas. No hay que olvidar que cada una de ellas determina bandas distintas de tamaño de poros del material (ver figura I.1) y, aunque en un cierto intervalo, estas bandas se solapan, las desviaciones observadas resultan lógicas. Finalmente, cabe recordar que la técnica de porosidad accesible al agua se ha presentado como una forma de obtener una primera aproximación a la porosidad de un material dado en %. La información aportada por la técnica de Porosimetría de Mercurio es más completa por distintas razones. Además de aportar información sobre la distribución de tamaños de poro existentes en un material, cubre una banda de tamaños bastante mayor que la primera de las técnicas aplicada. Este rango de tamaño de poro se considera suficiente para el estudio de movimientos de agua en materiales de construcción.

Del análisis de las figuras III.53 a III.60 y de los valores de porosidad presentados en la tabla III.13 se deduce que las mayores desviaciones entre los valores (en %) de porosidad accesible al agua y porosimetría de mercurio, ocurren cuando hay mayor densidad de poros en el rango comprendido entre 0.01 y 0.1 μm . La mayor desviación (ver tabla III.13) ocurre en el mortero de reparación I en el que, según los valores presentados en la figura III.58, aproximadamente el 95% del volumen total de poros está contenido en este rango.

Se observan discrepancias entre los resultados obtenidos por cada técnica que superan el margen de error con que fue determinada la medida (ver tabla III.13). La comparación de los resultados obtenidos (en %) por ambas técnicas puede ayudar a entender el tipo de porosidad en el material. Es necesario tener presente que, en el caso de Porosimetría de Mercurio, la entrada del fluido en el material se produce bajo presión, y que el agua tiene mayor capacidad de penetración en cualquier material que el mercurio. Por lo tanto, si el valor de porosidad accesible al agua es mayor que el obtenido por técnicas de porosimetría, los poros registrados entre 0.01 y 0.1 μm corresponderán a grietas en el material, donde sólo es capaz de penetrar el mercurio debido a las grandes presiones ejercidas. Sin embargo, si la porosidad accesible al agua es mayor, los poros comprendidos en este rango, pondrán de manifiesto una mayor efecto de capilaridad en el material.

De los valores de porosidad presentados en la tabla III.13, se puede observar que los

correspondientes a piedras (granito y caliza) son relativamente pequeños y, para un mismo material, los valores correspondientes a Porosimetría de Mercurio y Porosidad Accesible al Agua son próximos entre sí mientras que se obtienen mayores valores y dispersiones entre los correspondientes a morteros, lo que indica una mayor compacidad y homogeneidad de las propiedades de los primeros. Merece la pena destacar como caso más desfavorable el correspondiente al mortero de reparación III, en el cual, el valor de porosidad obtenido mediante Porosimetría de Mercurio es ocho veces mayor que el obtenido mediante Porosidad Accesible al Agua. En este caso se dan las máximas discrepancias debido posiblemente a la heterogeneidad del material. Se trata de un mortero de fraguado rápido, difícil de homogeneizar, lo que puede explicar las diferencias en su comportamiento.

La distribución de tamaño de poros se ha deducido a partir de las medidas realizadas con Porosimetría de Mercurio. Mediante esta técnica determinan, además de valores de porosidad (en %) y densidad aparente del material, curvas como la presentada en la figura III.52 que representan el logaritmo de la diferencia de intrusión de mercurio frente al diámetro de poro.

Las distribuciones de tamaño de poro obtenidas están de acuerdo con los resultados obtenidos en distintos ensayos que serán discutidos posteriormente para cada material. En análisis posteriores, se demostrará que si se atiende a la velocidad de los materiales para absorber o perder agua, se pueden considerar cuatro grupos perfectamente diferenciados:

Grupo I: Materiales con gran capacidad para absorber agua que están representados por el mortero de cal.

Grupo II: Materiales con capacidad media de absorción representados por la caliza, el ladrillo y el mortero de cemento.

Grupo III: Materiales con muy poca capacidad de absorción representados por los morteros de reparación I y II y por el granito.

Finalmente, el mortero de reparación III, adopta distintos comportamientos pudiendo incluirse dentro del grupo II ó III.

Del análisis de las distribuciones de tamaño de poro (presentadas en las figuras III.53 a III.60), se obtienen características comunes para los materiales de cada uno de los grupos antes expuestos. En los materiales muy absorbentes (grupo I), la práctica totalidad de los

poros está comprendida en el rango de diámetros entre 0.1 y $1 \mu\text{m}$ (figura III.53). En el caso más desfavorable (figura III.51, muestra 1), este rango de diámetros representa más del 80% del total.

Los materiales considerados dentro del grupo II tienen una capacidad media de absorción de agua. En las figuras III.54, III.55 y III.56 se representan las distribuciones de poros obtenidas en cada caso. En el caso de la caliza (figura III.55), la mayor cantidad de poros está comprendida entre 0.1 y $1 \mu\text{m}$. En el caso más desfavorable de los tres medidos (muestra 1 de la figura III.55) este rango de diámetros representa más del 60% del total. Prácticamente el resto de los poros tienen diámetros comprendidos entre 1 y $10 \mu\text{m}$ (salvo una pequeña cantidad comprendida entre 0.01 y $0.1 \mu\text{m}$). En el caso del mortero de cemento (figura III.56), existe una cantidad aún importante de poros en rango de diámetros comprendido entre 0.1 y $1 \mu\text{m}$ (del orden del 20% en el caso más desfavorable), si bien, la gran mayoría de ellos, tienen diámetros comprendidos entre 0.01 y $0.1 \mu\text{m}$.

En el caso del ladrillo (figura III.54) la práctica totalidad de los poros está comprendida entre 1 y $10 \mu\text{m}$ (un 90% en el caso más desfavorable), aunque existe una pequeña cantidad entre 0.1 y $1 \mu\text{m}$.

El grupo III se refiere a los materiales con menor capacidad para absorber agua. En general, tienen distribuciones de poros más heterogéneas que los anteriores (figuras III.57, III.58 y III.59). En el caso del granito (figura III.57), la mayoría de los poros (el 75% en el caso más desfavorable) tienen diámetros comprendidos entre 10 y $100 \mu\text{m}$; el resto de ellos corresponde a la banda de diámetros comprendidos entre 0.1 y $1 \mu\text{m}$.

En el caso del mortero de reparación I (figura III.58), la práctica totalidad de los poros tiene diámetros comprendidos entre 0.01 y $0.1 \mu\text{m}$. El mortero de reparación II (figura III.59) tiene una distribución de tamaños de poro mucho menos homogéneo que cualquiera de los anteriores: hasta un 60% del total corresponde a la banda de diámetro entre 0.1 y $1 \mu\text{m}$. Existe también un porcentaje importante entre 1 y $10 \mu\text{m}$ (hasta un 20%) y entre 10 y $100 \mu\text{m}$ (hasta un 10%).

Finalmente, si se estudian las muestras correspondientes al mortero de reparación III (figura III.60), presenta el comportamiento más heterogéneo de todos los materiales estudiados: mientras que en el caso de la muestra 2, la totalidad de los poros tiene diámetros comprendidos entre 0.01 y $0.1 \mu\text{m}$, en las muestra 1 y 3 existe prácticamente un 50% de ellos con diámetros comprendidos entre 0.1 y $1 \mu\text{m}$.

*** Resistencia mecánica a compresión**

Para medir la resistencia mecánica a compresión de un material, se utilizan probetas de caras planoparalelas. Se aplica una carga creciente, hasta que se produce la rotura del material. La resistencia a compresión se calcula dividiendo el valor de la carga por la superficie sobre la que se ha aplicado la fuerza y se expresa en Kp/cm^2 . Las medidas se realizaron una prensa modelo AMSLER de 20 Tn. Dicho equipo se muestra en la figura III.61. Dicho ensayo, igual que en el caso anterior, se realizó sobre tres probetas de cada material y se considera como valor de resistencia el valor medio de ellos. En la tabla III.13 se presentan los resultados obtenidos para cada material.

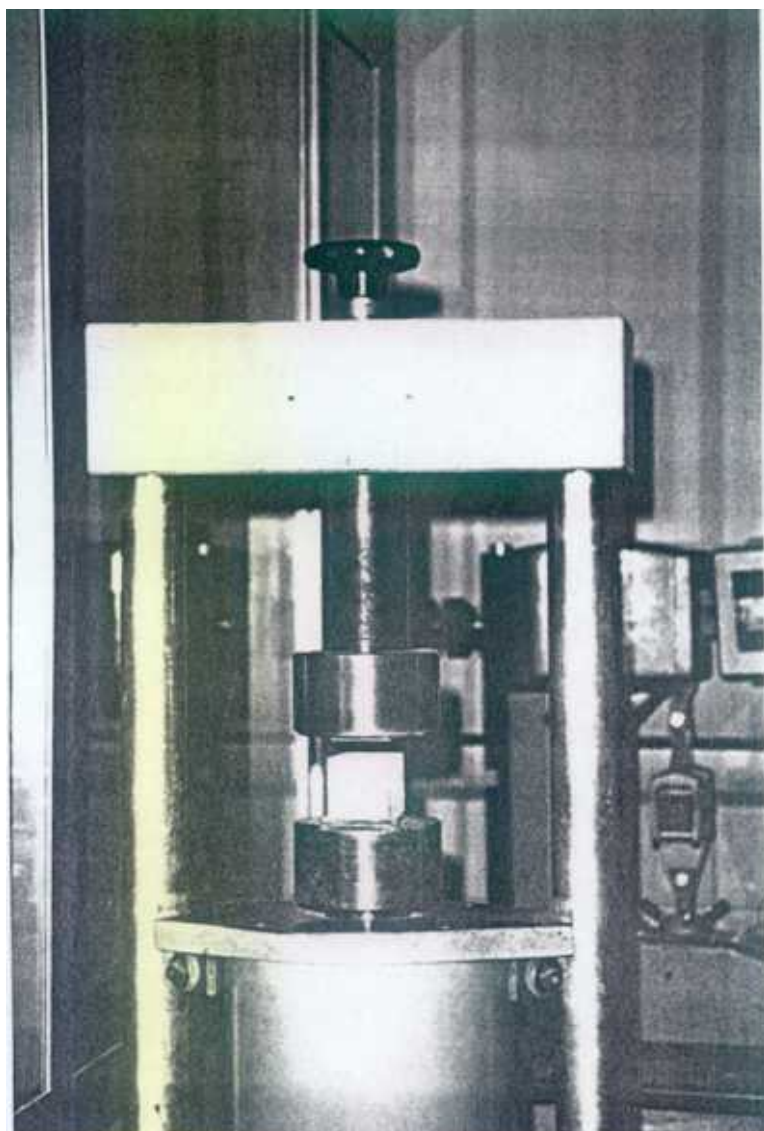


Figura III.61 Prensa utilizada en las medidas de resistencia a compresión

| | RESIST. A COMPR | POROSIDAD ACCESIBLE | | | POROSIMETRÍA DE Hg | |
|------------|-------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|--|-----------------------|
| | R (Kp/cm ²) ±0.5% | ρ_r (Kg/m ³) ±0.6 | ρ_a (Kg/m ³) ±0.6 | P_{acc} (%) ±0.2 | ρ_a (Kg/m ³) ±0.0003 | P_{Hg} (%) ±0.03 |
| GRANITO | 1622.0 | 2.6 | 2.7 | 0.7 | 2.6396 | 0.65 |
| CALIZA | 644.0 | 2.4 | 2.7 | 10.8 | 2.6839 | 11.45 |
| LADRILLO | 50.0 | 2.0 | 2.7 | 28.4 | 2.411 | 21.98 |
| ESCAYOLA | 62.2 | 1.1 | 2.1 | 50.4 | --- | --- |
| M. CAL | 50.4 | 1.8 | 2.7 | 31.3 | 2.5464 | 29.29 |
| M.CEMTO | 547.0 | 2.1 | 2.5 | 17.3 | 2.4932 | 14.65 |
| M.REP.I | 827.0 | 2.0 | 2.0 | 2.2 | 2.3605 | 16.70 |
| M.REP.II | 750.0 | 2.0 | 2.5 | 17.8 | 2.3783 | 13.22 |
| M.REP. III | 440.0 | 1.8 | 2.5 | 30.7 | 2.2644 | 24.72 |

Tabla III.13 Resultados obtenidos en la caracterización física de los materiales

Finalmente, se puede comprobar, de los resultados presentados en III.13 que se mantiene las relaciones expuestas en I.4.2 que relacionan la porosidad de un material con su resistencia mecánica. Materiales más porosos serán menos resistentes y viceversa. La distribución por grupos presentada antes atendiendo a la porosidad de los materiales se mantiene cuando se estudian las resistencias de los mismos.

III.2.2.- Modelización matemática de procesos hídricos

Los movimientos del agua en el interior de los materiales de construcción son, en general, como se ha explicado ya en la introducción (apartado I.3), procesos complicados debido, en gran parte, a la propia complejidad de los materiales. Además de cuantificar algunas de las variables físicas que más influencia pueden tener en dichos procesos, es necesario establecer un modelo matemático que explique la forma en que se mueve el agua dentro de ellos cuando se modifican tales parámetros. A este respecto se han modelizado procesos de evaporación y succión capilar considerando como variable más influyente la porosidad del material. Se ha explicado también la dificultad de cuantificar tal variable y como mediante distintos métodos de medida se pueden obtener valores distintos de porosidad. Por eso, en tales modelos se considera un valor v de porosidad (en tanto por uno) calculado a partir de los resultados obtenidos mediante los distintos métodos antes expuestos.

III.2.2.a.- Evaporación en materiales de construcción

Se considera un volumen de material homogéneo e isótropo que inicialmente está saturado de agua. Tal material tiene un volumen de poros v (en tanto por uno). Todos los poros son esféricos, con idéntico tamaño y homogéneamente distribuidos. El volumen de material será $1-v$ y su densidad, ρ . Se consideran las transferencias de calor y humedad que ocurren durante el proceso de pérdida de agua por evaporación.

La cantidad de agua perdida por el material en un proceso de evaporación vendrá dada por la diferencia entre la evaporada y la adsorbida por el material. Es decir:

$$Av \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = v \frac{\partial C}{\partial t} + \rho(1-v) \frac{\partial M}{\partial t} \quad [III.18]$$

donde:

A es una constante del material relacionada con su forma

C es la concentración de agua en los poros expresada en gcm^{-3}

M es el agua adsorbida en el material expresada en $g_{agua}Kg^{-1}_{material}$

T es la temperatura en $^{\circ}K$

t es el tiempo en seg

De igual forma, la variación de temperatura en el elemento vendrá dada por las pérdidas por radiación más las pérdidas por conducción más las pérdidas por evaporación de agua. Matemáticamente se tendrá:

$$(1-v)c_p\rho \frac{\partial T}{\partial t} = (1-v)\kappa \nabla^2 T + (1-v)c_w\rho \frac{\partial M}{\partial t} + B4\sigma T_0^4 \quad [III.19]$$

donde:

c_p es el calor específico del material en $W \text{ seg } Kg^{-1} \text{ } ^{\circ}K^{-1}$

κ es la conductividad térmica en $W \text{ cm}^{-1} \text{ } ^{\circ}K^{-1}$

c_w es el calor de evaporación del agua en $W \text{ seg } Kg^{-1}$

σ es la constante de Stefan-Boltzmann expresada en $W \text{ cm}^{-2} \text{ } ^{\circ}K^{-4}$

B es una constante de radiación

La resolución del sistema de ecuaciones obtenido implica conocer un amplio número de variables de muy difícil determinación en materiales tan poco homogéneos como los estudiados. Teniendo presente las características de estos materiales y las condiciones ambientales en las que se realizan las medidas, se han considerado una serie de

aproximaciones para la resolución del sistema que se resumen a continuación:

** La mayoría de los materiales de construcción tratados tienen muy poca capacidad para disolverse en agua a temperatura ambiente. Por lo tanto, el calor específico del agua y el del material permanecerán constantes en todo el proceso. Es decir, $c_w = \text{cte}$ y $c_p = \text{cte}$.*

** Según los resultados presentados en la tabla III.13, todos los materiales de construcción estudiados, salvo la escayola, tienen porosidades pequeñas ó medias (un 29.29% en el caso más desfavorable). Por otra parte, en condiciones normales, el agua no ocupa nunca todos los poros del material, aún suponiendo que sólo existan poros abiertos e interconectados, ya que parte del aire contenido inicialmente en el material queda también dentro de él. Con estas premisas, se puede considerar que la mayoría de los materiales de construcción tratados absorben muy pocas cantidades de agua. Por eso, se considera que no hay variaciones significativas de conductividad térmica al variar el contenido de agua en el material y, por tanto $\kappa = C^{\text{te}}$*

** Como el modelo va a ser aplicado a partes de edificios (especialmente, en muros) se puede considerar que el cuerpo es un plano infinito y $\nabla^2 T \approx \partial^2 T / \partial x^2$*

** Las variaciones de temperatura debidas a efectos de radiación son constantes en todo el proceso porque los cambios de temperatura son siempre menores de 5°K. Si suponemos un cambio de temperatura de 5°K, el error cometido es del 7.5% que es claramente inferior al cometido en la propia medida de la temperatura mediante termografía. Por lo tanto, se puede considerar $4 \cdot B \cdot \sigma \cdot T^4 = C^{\text{te}} = R$*

** En condiciones ambientales, los cambios de agua absorbida cuando la temperatura cambia es constante, así que $\partial M / \partial T = \omega = C^{\text{te}}$ (/55/, /56/)*

** Por la misma razón, los cambios de agua absorbida cuando varía la cantidad de vapor en los poros es también constante y se tendrá: $\partial M / \partial C = C^{\text{te}} = \psi$. (/55/, /56/)*

Usando las dos últimas condiciones, se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$A v \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = (v + (1 - v) \rho \psi) \frac{\partial C}{\partial t} + (1 - v) \rho \omega \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{[III.20]}$$

$$-\kappa (1 - v) \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = (1 - v) \psi \rho c_w \frac{\partial C}{\partial t} + \rho (1 - v) (\omega c_w - c_p) \frac{\partial T}{\partial t} + R \quad \text{[III.21]}$$

* Soluciones al sistema de ecuaciones

La porosidad es la variable física que más influencia tiene en los procesos estudiados. Para resolver el sistema de ecuaciones obtenido, se consideran dos casos extremos determinados por el volumen de poros contenido en el material. Se obtendrán, así dos soluciones al sistema una correspondientes a materiales muy porosos ($v \rightarrow 1$) y otra, a materiales muy poco porosos ($v \rightarrow 0$). El comportamiento de cualquier material real con una porosidad dada "v", se podrá interpretar como combinación lineal de los dos casos extremos resueltos.

1.- Para materiales muy porosos ($v \rightarrow 1$), el sistema de ecuaciones [III.20], [III.21], se transforma en:

$$A \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad [III.22]$$

2.- Si se considera un material muy poco poroso, $v \rightarrow 0$ y se obtiene:

$$\psi \frac{\partial C}{\partial t} + \omega \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad [III.23]$$

$$\rho \psi c_w \frac{\partial C}{\partial t} + (\omega c_w - c_p) \rho \frac{\partial T}{\partial t} + R = -\kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad [III.24]$$

En el caso de materiales muy porosos, el sistema de ecuaciones a resolver es:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -E \frac{\partial T}{\partial t} \quad [III.25]$$

$$-\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{R}{\kappa} + \Omega \frac{\partial C}{\partial t} + \Lambda \frac{\partial T}{\partial t} \quad [III.26]$$

donde se ha definido:

$$E = \frac{\omega}{\psi} \quad [III.27] \quad \Omega = \frac{c_w \rho \psi}{\kappa} \quad [III.28]$$

$$\Lambda = \frac{\rho(\omega c_w - c_p)}{\kappa} \quad [III.29]$$

Resolviendo ambos sistemas de ecuaciones, se obtiene:

1.- Materiales muy porosos ($v \rightarrow 1$):

$$C_1(x,t) = C_0 + \sum_{m=1}^{\infty} C_m \cos(m\pi x) \exp(-m^2 \pi^2 A t) \quad [III.30]$$

2.- Materiales muy poco porosos ($v \rightarrow 0$):

$$C_2(x,t) = M_0 - \frac{\omega}{\zeta} \sum_{m=1}^{\infty} \left(M_m \cdot \cos(m\pi x) \exp\left(-\frac{m^2 \pi^2 t}{(\Lambda - \Omega E)}\right) \right) \quad [III.31]$$

y:

$$T(x,t) = T_0 + \sum_{m=1}^{\infty} M_m \cos(m\pi x) \left(\exp\left(-\frac{m^2 \pi^2 t}{(\Lambda - \Omega E)}\right) + \frac{R}{T_m m^2 \pi^2 \kappa} \sin\left(\frac{m\pi}{2}\right) \right) \quad [III.32]$$

donde:

$$\frac{1}{\Lambda - \Omega E} = \frac{\kappa}{\rho c_p} = \frac{1}{\eta} \quad [III.33]$$

es una constante llamada difusividad térmica del material y depende de sus características intrínsecas.

Como se ha explicado antes, cualquier caso de porosidad media se considera como una combinación lineal de ambas ecuaciones. Así que se tendrá:

$$C(x,t) = v C_1(x,t) + (1-v) C_2(x,t) \quad [III.34]$$

donde v corresponde al volumen de poros del material (en %). Por lo tanto, en el comportamiento de la evolución de las curvas $C(x,t)$ de un material dado con un volumen de poros v conocido, aparecen dos componentes. El material se comportará en una fracción v como material totalmente poroso y en $(1-v)$ como material totalmente compacto.

Con objeto de obtener la evolución de $C(x,t)$ con el tiempo para un material general con un volumen de poros v , se considera:

$$C_m = \frac{M_m \omega}{\Psi} \quad [III.35]$$

donde C_m y M_m son los coeficientes de los sumatorios obtenidos en [III.30] y [III.31].

Finalmente, se considera que los primeros términos de la serie son los más representativos. Por lo tanto:

$$\begin{aligned} \Delta C(x,t) &= \cos(\pi x) \exp(\pi^2) \left(v \exp(-At) - (1-v) E \exp\left(\frac{-t}{\Lambda - \Omega E}\right) \right) = \\ &= Z(x) \left(v \exp(-At) - (1-v) \exp\left(\frac{-t}{\eta}\right) \right) \quad [III.36] \end{aligned}$$

donde $Z(x)$ es la función espacial, v el volumen de poros del material (en %) y η la difusividad térmica definida en [III.33]. La función $\Delta C(x,t)$ así definida se comparará en lo sucesivo con las pérdidas de peso obtenidas experimentalmente.

Los resultados presentados, corresponden a una primera aproximación matemática del proceso. Por eso, se han impuesto algunas condiciones muy drásticas que se deberán estudiar más detenidamente en desarrollos posteriores. Dentro de estas aproximaciones, la más importante es la relativa a la conductividad térmica del material. Aunque es bien sabido que la variación del contenido de agua en un material modifica su conductividad térmica, en el modelo aquí presentado, se ha considerado que dichas variaciones son suficientemente pequeñas como para poder ser anuladas en el estudio general del proceso. A este respecto la porosidad del material (y, por tanto, la cantidad de agua que contiene en estado de saturación) juega un papel muy importante. Como se verá a partir de los resultados experimentales obtenidos, dicha aproximación tiene validez en el caso de materiales de pequeña porosidad (los incluidos en el "grupo III" en el estudio de caracterización de materiales). Las variaciones de conductividad térmica empiezan a tener cierta importancia en el comportamiento del material cuando su porosidad alcanza valores mayores (en los llamados grupos I y II).

Se han considerado además, dos casos extremos para solucionar el sistema de ecuaciones obtenido: materiales muy porosos ($v \rightarrow 1$) y materiales muy poco porosos ($v \rightarrow 0$); cualquier caso intermedio de porosidad se puede considerar como combinación lineal de los dos obtenidos. Los coeficientes de dicha combinación dependerán del valor de porosidad v del material específico.

La validez de los citados modelos se discutirá en los puntos relativos al estudio de movimiento de agua en materiales de construcción.

III.2.2.b.- Succión capilar en materiales de construcción

Se considera un volumen de material con las mismas características que el considerado en el punto III.2.2.a. inicialmente seco y sometido a un proceso de succión capilar. Se supone además que todos los capilares son cilindros de igual diámetro r .

Partiendo de la ley de Jurin (ec.[I.1]) y considerando ángulos de contacto muy pequeños, se tendrá la cantidad de agua que entra en el material por capilaridad como:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = 2\pi r \frac{\partial T_s}{\partial t} \quad [\text{III.37}]$$

M es la masa de agua en g

t es el tiempo en seg

g es la aceleración de la gravedad en cm seg^{-2}

V_m es el volumen de material en cm^3

T_s es la tensión superficial en dinas cm^{-1}

La tensión superficial depende únicamente de la temperatura (/64/):

$$\frac{dT_s}{dt} = \Psi \frac{dT}{dt} \quad [III.38]$$

con Ψ constante. Por lo tanto, sustituyendo en [III.37], se obtiene:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = 2\pi r \Psi \frac{\partial T}{\partial t} \quad [III.39]$$

La variación del contenido de agua dentro del material vendrá dada ahora por la cantidad total de agua que entra por capilaridad menos la pérdida neta por evaporación.

Haciendo uso de la ecuación [III.18] se tendrá:

$$Av \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = 2\pi r \Psi (1 - \nu) \frac{\partial T}{\partial t} - \nu \frac{\partial C}{\partial t} - \rho (1 - \nu) \frac{\partial M}{\partial t} \quad [III.40]$$

donde:

A es una constante del material relacionada con su forma

C es la concentración de agua en los poros expresada en gcm^{-3}

M es el agua adsorbida en el material expresada en $g_{agua}Kg^{-1}_{material}$

T es la temperatura en $^{\circ}K$

t es el tiempo en seg

Ψ es la constante que relaciona la tensión superficial con la temperatura en dinas $cm^{-2} C^{-1}$

De igual forma, la variación de energía total en el elemento vendrá dada por las pérdidas por radiación más las pérdidas por conducción más las pérdidas por evaporación de agua. Matemáticamente se obtiene de nuevo la ecuación [III.19].

Considerando las mismas aproximaciones expuestas en el apartado III.2.2.a. se llega al sistema de ecuaciones:

$$\nu A \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = (1 - \nu)(2\pi r \Psi - \omega \rho) \frac{\partial T}{\partial t} - (\nu + (1 - \nu)\rho \zeta) \frac{\partial C}{\partial t} \quad [III.41]$$

$$-(1 - \nu)\kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 4\sigma B T_0^4 + \zeta(1 - \nu)c_w \rho \frac{\partial C}{\partial t} + (1 - \nu)\rho(\omega c_w - c_p) \frac{\partial T}{\partial t} \quad [III.42]$$

***Soluciones al sistema de ecuaciones**

Considerando, igual que en III.2.2.a. los dos casos extremos de porosidad, se tendrá:

1.- materiales muy poco porosos ($v \rightarrow 0$):

$$0 = (2\pi r\Psi - \omega\rho) \frac{\partial T}{\partial t} - \rho\zeta \frac{\partial C}{\partial t} \quad [\text{III.43}]$$

$$-\kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 4\sigma B T_0^4 + \zeta c_w \rho \frac{\partial C}{\partial t} + \rho(\omega c_w - c_p) \frac{\partial T}{\partial t} \quad [\text{III.44}]$$

2.- materiales muy porosos ($v \rightarrow 1$):

$$A \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = -\frac{\partial C}{\partial t} \quad [\text{III.45}]$$

Para materiales con muy pequeña porosidad se obtiene de [III.43] y [III.44]:

$$-\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \Lambda \frac{\partial T}{\partial t} + \Omega \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{R}{\kappa} \quad [\text{III.46}]$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -E \frac{\partial T}{\partial t} \quad [\text{III.47}]$$

donde se ha definido:

$$E = \frac{\omega\rho - 2\pi r\Psi}{\rho\zeta} \quad [\text{III.48}]$$

$$\Omega = \frac{c_w \zeta \rho}{\kappa} \quad [\text{III.49}]$$

$$\Lambda = \frac{\rho(\omega c_w - c_p)}{\kappa} \quad [\text{III.50}]$$

Formalmente, se obtienen sistemas de ecuaciones iguales a los correspondientes a un proceso de evaporación. Si los parámetros E, Λ y Ω correspondientes a un proceso de evaporación (ecs. [III.27], [III.28] y [III.29]) se comparan con las correspondientes a un proceso de succión capilar (ecs. [III.48], [III.49] y [III.50]) se observa que las únicas variaciones entre ambos ocurren en el término que relaciona las variaciones del contenido de agua con las variaciones en la temperatura de superficie del material (E). Este paralelismo entre ambos procesos es fácilmente explicable ya que cualquier proceso de succión capilar se puede considerar, pasado un cierto periodo inicial, como un proceso de evaporación que se está modificando de alguna forma por la entrada continua de agua en el material.

Para resolver el sistema de ecuaciones, se imponen como condiciones de contorno que el material inicialmente está completamente seco.

Las soluciones, en el caso de material con pequeña porosidad, coinciden formalmente con [III.31] y [III.32], pero, en este caso:

$$\frac{1}{\Lambda - \Omega E} = \frac{\kappa}{c_p \rho - 2\pi r \Psi c_w} \quad \text{[III.51]}$$

Por lo tanto, la variación de temperatura superficial en un proceso de succión capilar está modificada, respecto a un proceso de evaporación en el mismo material y con las mismas condiciones, por un término que depende solamente de la cantidad de agua que penetra en el cuerpo.

Para el caso de materiales muy porosos, la solución, imponiendo las mismas condiciones de contorno que en el caso anterior, es:

$$C_2(x,t) = M_0 + \sum_{m=1}^{\infty} N_m \cosh(m^2 \pi^2 x) [\exp(m^2 \pi^2 A t) - 1] \quad \text{[III.52]}$$

Para el caso de materiales con porosidad extremadamente grande, la solución espacial en un proceso de succión capilar se modifica respecto al caso de evaporación. Por una parte, se modifica la evolución espacial del contenido de agua. Además, la evolución de la temperatura está desplazada respecto al caso de evaporación. La solución más general, correspondiente a un material de porosidad media, vendrá dada, como en el caso de evaporación por la combinación lineal de ambas soluciones y coincidirá formalmente con la ecuación [III.34].

III.2.3.- Verificación experimental de los modelos

El estudio del movimiento del agua en el interior del sistema poroso de los materiales de construcción se realizó usando Termografía Infrarroja y siguiendo las líneas de actuación que se establecieron en el punto III.1.3. y que se pueden resumir de la siguiente forma:

- 1.- Los ensayos se realizan en una cámara donde la temperatura ambiente y la humedad relativa permanecen constantes.
- 2.- La cámara se mantiene en una posición fija y a una distancia de aproximadamente 0.5 m del objeto, para evitar fenómenos de atenuación atmosférica.
- 3.- La cámara se mantiene siempre perpendicular al objeto, para evitar pérdidas de radiación. Además, las medidas se toman siempre en puntos del centro de la superficie.
- 4.- Las probetas se mantienen dentro de una caja negra para evitar fenómenos de radiación externa no controlada.

Los resultados obtenidos en los modelos matemáticos antes presentados, se verificaron mediante la realización de ensayos de succión capilar y evaporación con agua a 20°C en distintos materiales de construcción, todos de igual forma y tamaño y características conocidas. En la figura III.62 se muestra la disposición del ensayo

Se ha explicado también (apartados I.3 y I.4) como distintos parámetros intrínsecos o externos al material pueden afectarle de forma drástica, y modificar el movimiento del agua en su interior. A este respecto, es muy importante considerar la presencia de sales. La existencia de sales en el material puede deberse a muy distintas circunstancias. Su presencia puede alterar de forma significativa un proceso hídrico por alteraciones en el interior del material: reacciones químicas, precipitación (y, por tanto disminución de la porosidad del material), disolución parcial del material (y, por tanto, aumento de su porosidad), etc. A este respecto, en la presente investigación, se han considerado las siguientes disoluciones a estudiar: ClNa , Na_2SO_4 , Na_3PO_4 , $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ y NaNO_3 todas saturadas en condiciones normales de presión y temperatura.

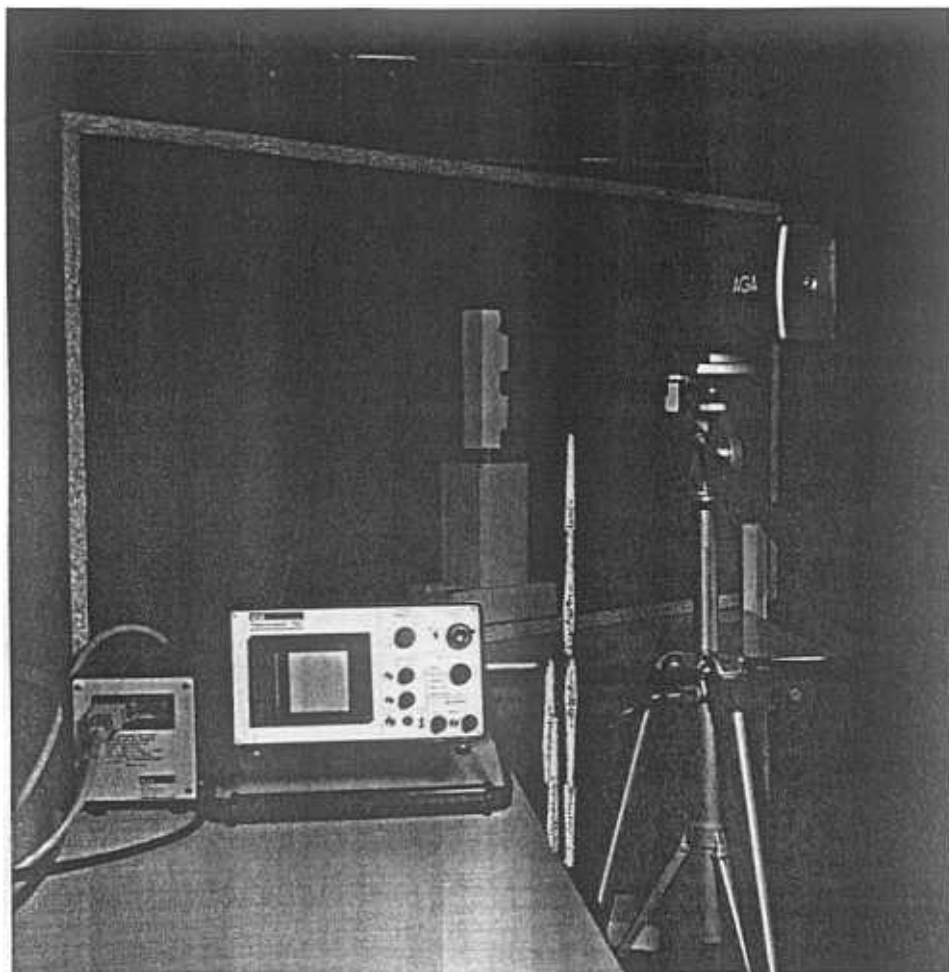


Figura III.62 Disposición de los ensayos de Termografía

El objeto de estos ensayos es valorar en que medida la termografía infrarroja puede ser capaz de establecer la presencia de sales en un material dado y cómo se modifican los parámetros determinados mediante los modelos matemáticos antes expuestos. En los estudios desarrollados, se considera como curvas patrón las obtenidas con agua pura y se estudian las desviaciones ocurridas por la presencia de sales.

Finalmente, se realizaron ensayos de evaporación en distintos materiales usando agua destilada a 40 °C con el fin de justificar la aproximación realizada en el modelo referida a la variaciones de radiación emitida por el cuerpo.

III.2.3.a.- Variación de la emisividad del material

Como se ha señalado en el punto III.2.3.b, las variaciones de la emisividad están íntimamente relacionadas con el contenido de agua del material. Sin embargo, dado que los valores de emisividad para materiales de construcción son, en general, altos, existen pequeñas diferencias entre los valores para el material seco y saturado y, por tanto, el estudio de su evolución en cualquier proceso relacionado con la variación del contenido de agua del material no tiene demasiado sentido. Los valores de emisividad medidos solo se han utilizado para establecer cualitativamente la cantidad de agua contenida en el material. En la tabla III.14 se presentan los valores de emisividad para cada uno de los materiales estudiados en dos casos extremos: cuando están totalmente secos y cuando están saturados de agua.

| MATERIAL | $\varepsilon (\pm 0.02)$ | |
|---------------------------|--------------------------|------|
| | SATURADO | SECO |
| granito | 0.84 | 0.71 |
| caliza | 0.79 | 0.70 |
| ladrillo | 0.92 | 0.75 |
| mortero de cal | 0.94 | 0.78 |
| mortero de cemento | 0.81 | 0.70 |
| escayola | 0.83 | 0.70 |
| mortero de reparación I | 0.86 | 0.77 |
| mortero de reparación II | 0.92 | 0.75 |
| mortero de reparación III | 0.98 | 0.69 |

Tabla III.14 Valores medidos de emisividad en los distintos materiales estudiados

Finalmente, recordar que los parámetros aquí presentados, son válidos únicamente para los materiales específicos en los que se han realizado las medidas, como se ha explicado en distintas ocasiones. En medidas "in-situ" se seleccionan las zonas más seca y más mojada del área que se estudia y se mide la emisividad en ellas.

III.2.3.b.- Procesos de evaporación

Los ensayos se realizaron sobre los materiales cuya caracterización se describió en los puntos anteriores (caliza, granito, mortero de cal, mortero de cemento y morteros de reparación I, II y III). Siempre se utilizaron probetas prismáticas de 4X4X16 cm. Las muestras se secaron en una estufa a 100°C durante las 48 horas previas al ensayo (salvo la escayola que se mantuvo a 40°C para evitar fenómenos de deshidratación). De esta forma, se eliminaba todo el agua que hubiera podido entrar en el material procedente de la atmósfera. Cuando el material alcanzaba la temperatura ambiente, se mantenía totalmente sumergido en la disolución durante otras 48 horas. Posteriormente, se sacaba de la disolución y se limpiaba su superficie con un trapo húmedo. Así, se eliminaba el agua superficial que pudiera perturbar la medida pero se evitaba la absorción de agua procedente del interior del material.

Las probetas se colocaban en posición vertical dentro de una caja negra y enfrentadas a la termocámara como se indicó en el punto III.1.3. Se tomaban medidas de radiación normal emitida y peso hasta que el material alcanzaba el equilibrio. Los intervalos de medida se establecieron en cada material en función de su velocidad de evaporación (íntimamente relacionada con su porosidad).

Mediante ensayos termográficos previos se concluyó que el efecto de la gravedad sobre el agua contenida en el material no influía en el proceso de evaporación (al menos para las dimensiones de los materiales usados): Las variaciones de radiación emitida por el cuerpo entre los puntos extremos de su superficie (1cm y 15cm) quedaban dentro del margen de error de la medida como se indica en la figura III.63.

En esta figura se representa la evolución de la temperatura superficial en medidas realizadas sobre escayola. Este material es el más poroso de todos los utilizados (ver tabla III.13). Por lo tanto, corresponde al caso más desfavorable de todos los posibles (mínima velocidad de evaporación).

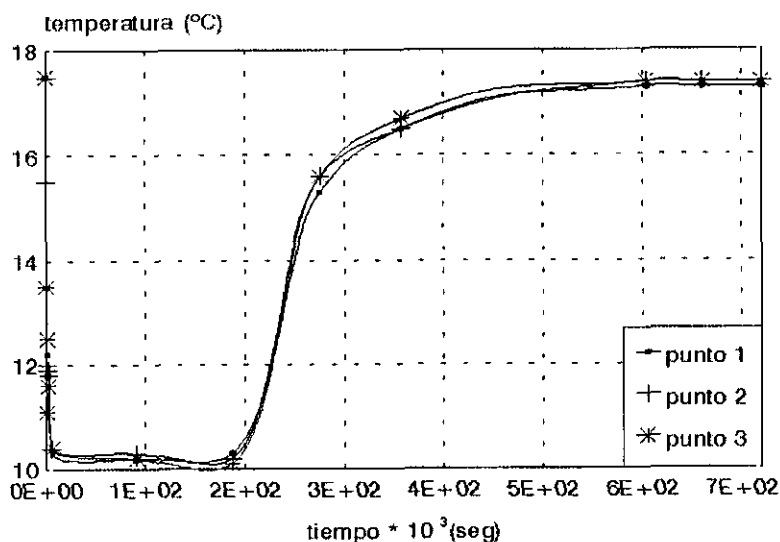


Figura III.63 Temperatura superficial medida en distintos puntos de la superficie de una probeta de escayola

Debido a esto, en este tipo de ensayos, solo se consideró un punto de medida situado a la mitad de la altura del material por ser ésta la zona donde menores perturbaciones se producen (apartado III.1.3).

En la figura anterior se observa que existe un proceso inicial, aproximadamente hasta los 200 seg) en el que se produce un enfriamiento muy rápido del material. Posteriormente, hay un período de equilibrio (hasta los 300 seg) y, a partir de este momento, la temperatura tiende a ascender hasta alcanzar el valor de equilibrio estable cuando ya está seca. Este comportamiento ocurrirá, de forma más o menos pronunciada, en todos los materiales estudiados.

De los valores de radiación medidos se obtuvieron los valores de temperatura superficial y emisividad del material usando las técnicas de separación de variables explicadas en el punto III.2.3.a.

Tanto los valores experimentales de temperatura superficial del material como de pérdida de peso del mismo (en % respecto al peso de la probeta seca) se ajustaron mediante un programa informático adecuado a una serie de exponenciales como las obtenidas en el modelo teórico desarrollado (ecs. [III.32] y [III.36]). En general se obtiene una buena aproximación ($r^2 = .99$) mediante una combinación lineal de dos exponenciales. Las curvas obtenidas en cada caso se presentan en las figuras III.64 y III.65. En la primera de ellas se representan los materiales de mayor porosidad que tienen evoluciones lentas en procesos de evaporación; en la segunda, las curvas correspondientes a materiales de muy poca porosidad

con evoluciones muy rápidas en este tipo de procesos. En la tabla III.15 se presentan los coeficientes de ajuste de las curvas de evolución de temperatura superficial obtenidos a partir de los valores experimentales, así como el coeficiente de regresión obtenido para cada caso. En la tabla III.16 se presentan los mismos valores para los ensayos referidos a pérdida de peso. Las figuras III.66 y III.67 muestran la evolución de dichos resultados. El criterio para representar las distintas curvas, es el mismo que en el caso de temperaturas superficiales.

*** Evaporación con agua destilada a 20°C**

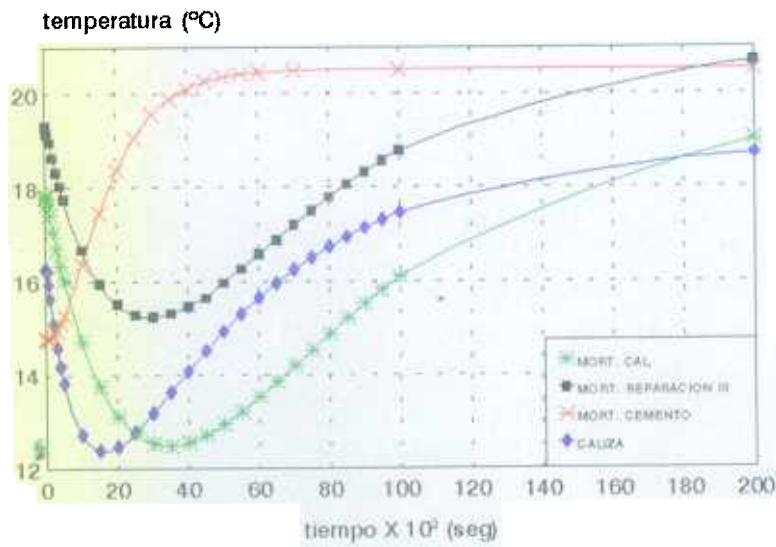
ANÁLISIS DE TEMPERATURAS

Según el modelo experimental expuesto en III.2.2.a., los datos experimentales se ajustan a funciones del tipo:

$$T = T_0 + A \exp\left(\frac{-t}{B}\right) + C \exp\left(\frac{-t}{D}\right) \quad [\text{III.53}]$$

| | A (°C) | B (seg) | C (°C) | D (seg) | T ₀ (°C) | r ² |
|-------------------|--------|----------|---------|----------|---------------------|----------------|
| M. CAL | 8.63 | 9439.47 | -11.28 | 4867.10 | 18.91 | .9989 |
| CALIZA | 93.69 | 34674.50 | -95.38 | 41674.70 | 19.52 | .9986 |
| M. CEMENTO | 167.85 | 9007.44 | -172.60 | 9335.56 | 20.52 | .9979 |
| M. REPARACIÓN I | 861.11 | 515.41 | -864.20 | 521.37 | 20.96 | .9927 |
| M. REPARACIÓN II | 224.68 | 390.67 | -226.68 | 403.48 | 20.43 | .9963 |
| M. REPARACIÓN III | 198.06 | 32015.70 | -199.63 | 34309.60 | 19.90 | .9972 |
| GRANITO | 261.43 | 2063.32 | -262.21 | 2125.19 | 18.89 | .9981 |

Tabla III.15 Coeficientes obtenidos a partir de los ensayos de variación de temperatura realizados con agua destilada.



para materiales de porosidad media

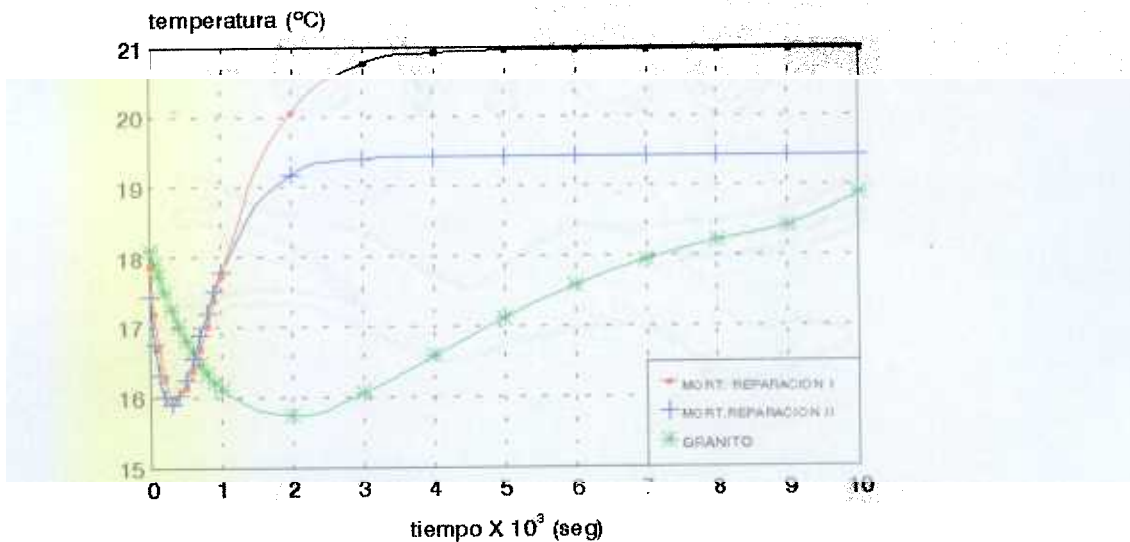


Figura III.65 Curvas de variación de temperatura en procesos de evaporación con agua destilada para materiales de porosidad baja

ANÁLISIS DE PESOS

Se considera la pérdida de peso del material en % respecto al peso de la probeta seca (después de sacar de la estufa y enfriarse). La ecuación de ajuste es:

$$P = P_0 + E \exp\left(\frac{-t}{F}\right) + G \exp\left(\frac{-t}{H}\right) \quad [III.54]$$

Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes tablas y figuras:

| | E (%) | F (seg) | G (%) | H (seg) | P ₀ (%) | r ² |
|------------------|---------|----------|---------|--------------------|--------------------|----------------|
| M. CAL | 73.01 | 88204.60 | 29.17 | 17301.70 | 0 | .9921 |
| CALIZA | 47.20 | 47294.40 | 56.71 | 47528.30 | 0 | .9963 |
| M.CEMENTO | 2449.72 | 72.16 | 2344.91 | 74.46 | 3.65 | .9975 |
| M.REPARACIÓN I | 65.83 | 2.66 | 34.23 | 28.13 | 0 | .9994 |
| M.REPARACIÓN II | 30.65 | 5.62 | 32.26 | 1067.16 | 37.08 | .9940 |
| M.REPARACIÓN III | 64.06 | 2796.57 | 33.65 | 643.91 | 0 | .9989 |
| GRANITO | 98.01 | 696.85 | 1.31 | 2 10 ¹⁸ | 0.95 | .9975 |

Tabla III.16 Coeficientes obtenidos a partir de los ensayos de variación de peso realizados con agua destilada.

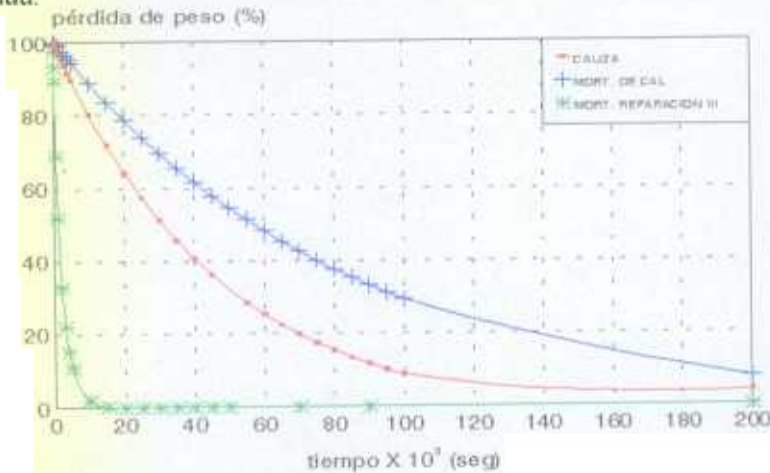


Figura III.66 Curvas de pérdida de peso en procesos de evaporación con agua destilada para materiales de porosidad media

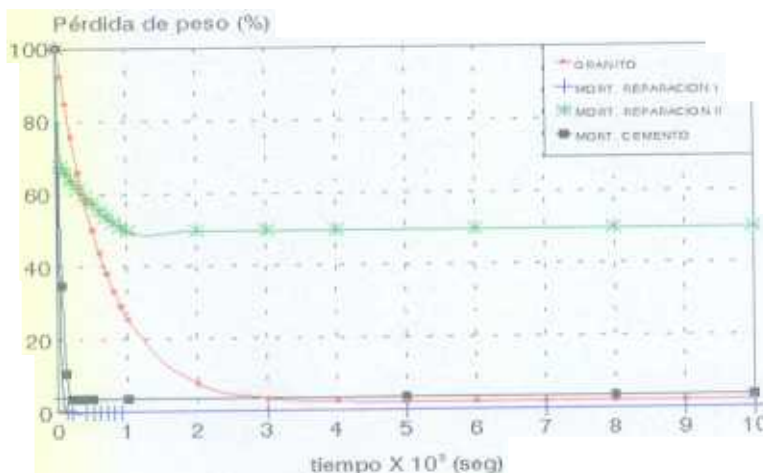


Figura III.67 Curvas de pérdida de peso en procesos de evaporación con agua destilada para materiales de baja porosidad

En las tablas III.15 y III.16 se han presentados los coeficientes de ajuste de los puntos medidos al modelo matemático antes presentado. En general, los coeficientes de las funciones exponenciales (denominados B y D para las curvas de temperatura y F y H para las de pérdida de peso), son más grandes para los materiales más porosos (tabla III.13). Esto significa que el proceso de evaporación en este tipo de materiales se ralentiza respecto a los casos de porosidades muy pequeñas. Este criterio se mantiene de forma más clara en el caso de temperaturas superficiales, mientras que las medidas de pérdida de peso parecen desviarse de esta norma general.

* Evaporación con agua a 40 °C

Los procesos con agua destilada a 40 °C se realizaron siguiendo el mismo proceso explicado en los ensayos equivalentes realizados con disoluciones a 20 °C.

El objetivo de tales ensayos era la justificación de la restricción impuesta en los modelos antes explicados (radiación emitida constante), y, por eso, sólo se realizaron con agua pura. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en dichos ensayos ajustados a los mismos modelos expuestos en III.2.3.a y III.2.3.b.

Los ensayos con caliza y mortero de reparación II no se pudieron realizar ya que tales probetas se deshacían al aumentar la temperatura del agua. De igual forma, no se obtuvieron resultados válidos en el caso de ensayos de capilaridad con ninguno de los materiales, posiblemente debido a las perturbaciones producidas por el ambiente.

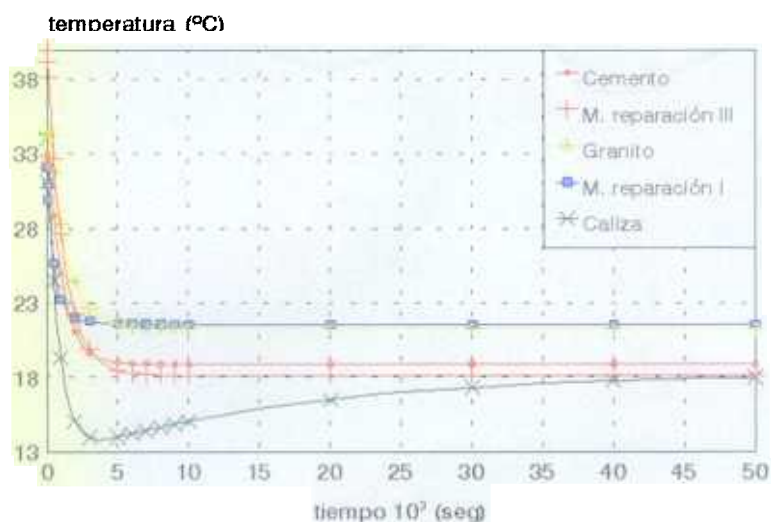


Figura III.68 Curvas de temperatura de evaporación obtenidos en los ensayos con agua a 40 °C

| | A(°C) | B (seg) | C (°C) | D (seg) | T ₀ (°C) | r ² |
|-----------|-------|-------------------|--------|---------|---------------------|----------------|
| M.CNTO | -3.15 | 238.56 | 17.31 | 971.71 | 19.90 | .9984 |
| CALIZA | -3.40 | -10 ¹⁹ | 22.17 | 1186.61 | 18.12 | .9972 |
| GRANITO | -2.96 | 176.09 | 15.92 | 1222.60 | 21.33 | .9982 |
| M.CAL | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- |
| M. R. I | 0.84 | 2079.25 | 9.73 | 478.19 | 21.57 | .9999 |
| M. R. II | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- |
| M. R. III | -5.91 | 16981.90 | 21.58 | 843.04 | 18.32 | .9971 |

Tabla III.17 Coeficientes de temperatura obtenidos en los ensayos de evaporación con agua a 40 °C

| | E (%) | F (seg) | G (%) | H (seg) | P ₀ (%) | r ² |
|-----------|----------|---------|---------|---------|--------------------|----------------|
| M.CNTO | -3394.32 | 1427.09 | 3500.64 | 1400.29 | 2.77 | .9992 |
| CALIZA | 47.50 | 257.55 | 36.95 | 6520.44 | 16.06 | .9984 |
| GRANITO | -2936.63 | 1127.86 | 3021.67 | 1114.33 | 17.72 | .9960 |
| M.CAL | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- |
| M. R. I | -1729.15 | 527.89 | 1828.37 | 517.56 | 1.72 | .9978 |
| M. R. II | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- |
| M. R. III | -1827.91 | 6098.77 | 1934.51 | 5969.11 | 0 | .9935 |

Tabla III.18 Coeficientes de pérdida de peso obtenidos en los ensayos de evaporación con agua a 40°C

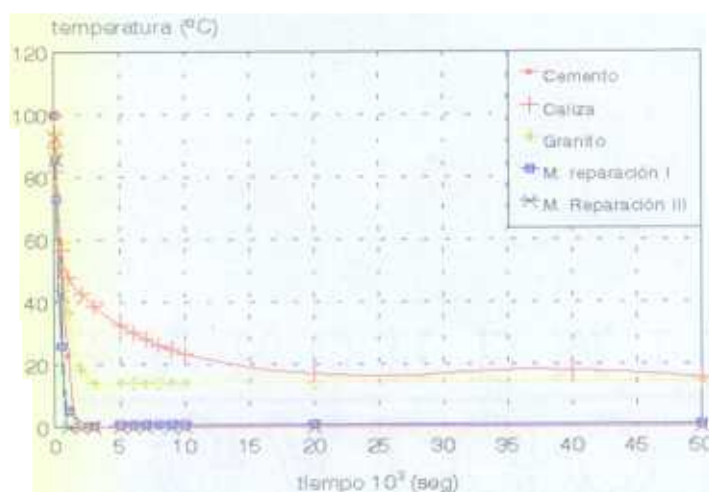


Figura III.69 Curvas de pérdida de peso obtenidas en los ensayos de evaporación con agua a 40 °C

En las curvas correspondientes a la variación de temperatura superficial, se pueden observar dos tipos de comportamiento distintos. Los materiales con capacidad de absorción mediana o grande pasan por un mínimo antes de alcanzar el equilibrio, mientras que en materiales con pequeña capacidad de absorción, las curvas tienen un comportamiento similar a una caída exponencial. En el primer caso, el agua queda retenida en el material el tiempo suficiente como para que pueda enfriarse y aproximarse al valor mínimo registrado en el caso de evaporación con agua a 20 °C. En el segundo, el proceso es demasiado rápido y el agua no permanece en el material el tiempo suficiente para que esto ocurra. En el caso de la caliza y el mortero de cemento, la recuperación después de alcanzar el mínimo es muy lenta y la temperatura del material no se equilibra en el período de tiempo que dura el ensayo.

Las curvas de pérdida de peso tienen un comportamiento similar al presentado en el caso de evaporación con agua a 20 °C, aunque tiene caídas más bruscas (el agua evapora más rápidamente cuanto mayor es su temperatura). Además, la cantidad neta de agua que penetra en el material en este caso es menor: Un aumento de temperatura del agua impide la entrada de agua en el material.

* Procesos con disoluciones salinas

En las figuras III.70 a III.76 se presentan los termogramas correspondientes a los ensayos de evaporación con disoluciones salinas realizados con probetas de escayola.

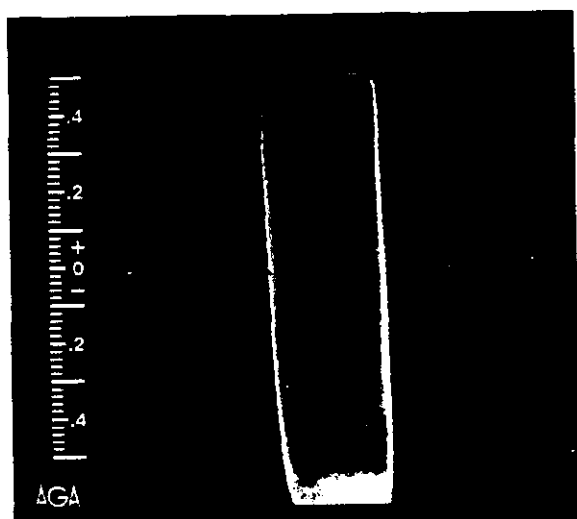


Figura III.70 Termograma correspondiente al ensayo sin filtro y con agua destilada durante el primer día de evaporación

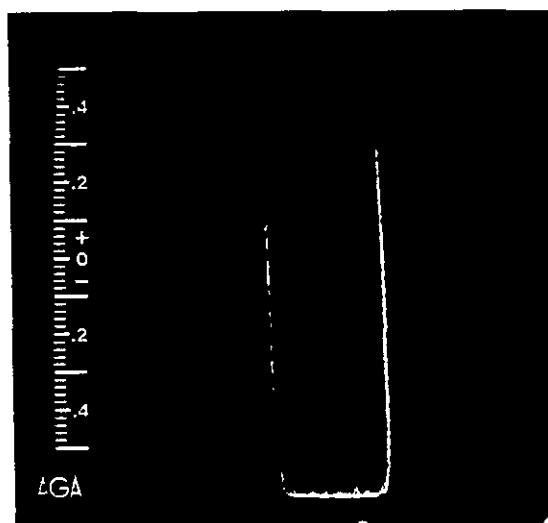


Figura III.71 Termograma correspondiente al ensayo sin filtro y con disolución de NaCl durante el primer día de evaporación.

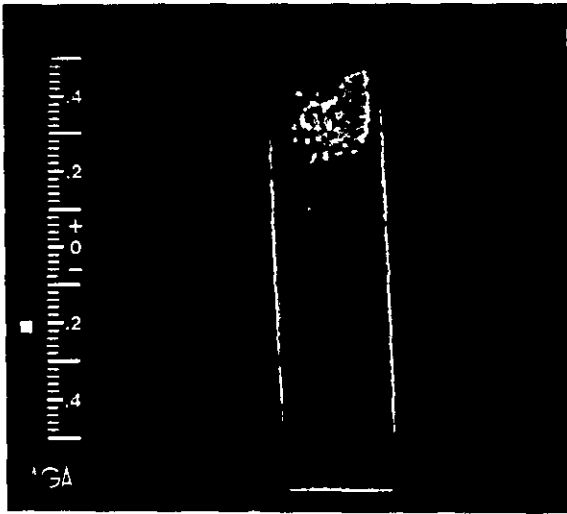


Figura III.72 Termograma correspondiente al ensayo sin filtro y con una disolución de Na_3PO_4 durante el primer día de evaporación

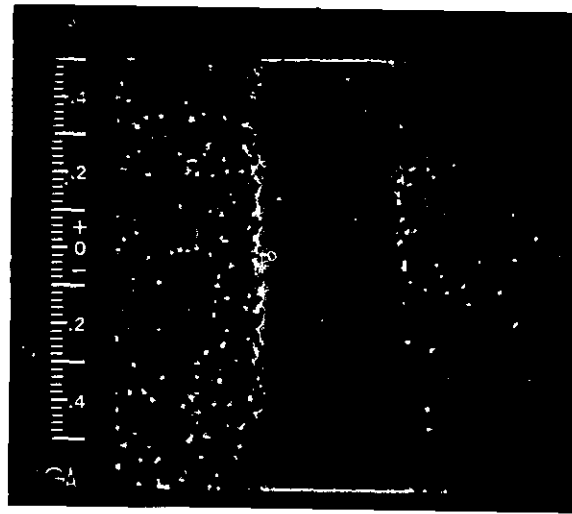


Figura III.73 Termograma correspondiente al ensayo con filtro de agua y agua destilada durante el primer día de evaporación

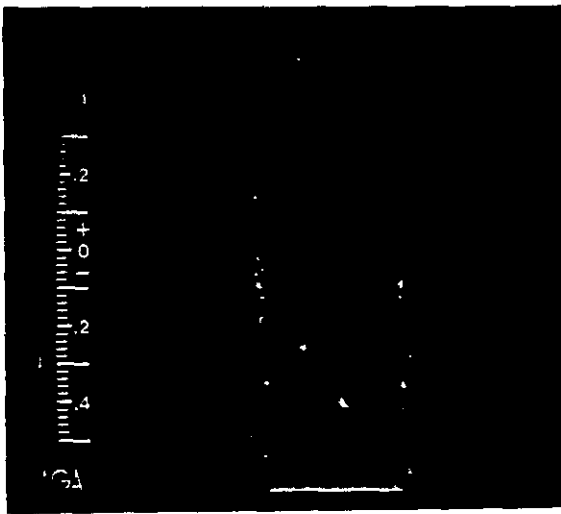


Figura II.74 Termograma correspondiente al ensayo con filtro de agua y una disolución de NaCl durante el primer día de evaporación

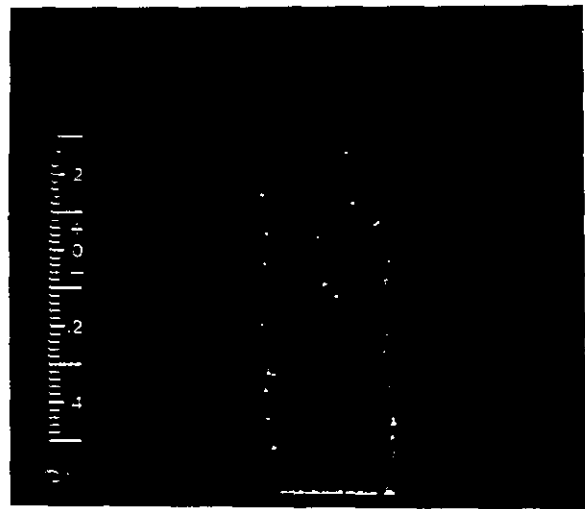


Figura III.75 Termograma correspondiente al filtro de agua y una disolución de Na_3PO_4 durante el primer día de evaporación

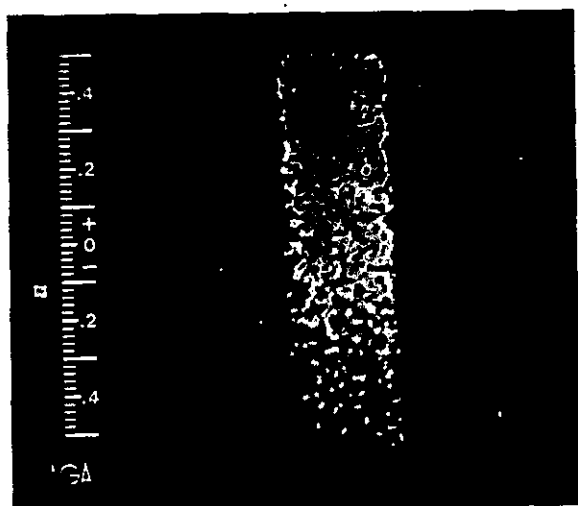


Figura III.76 Termograma correspondiente al ensayo con agua destilada y filtro de CO_2 durante el primer día de evaporación

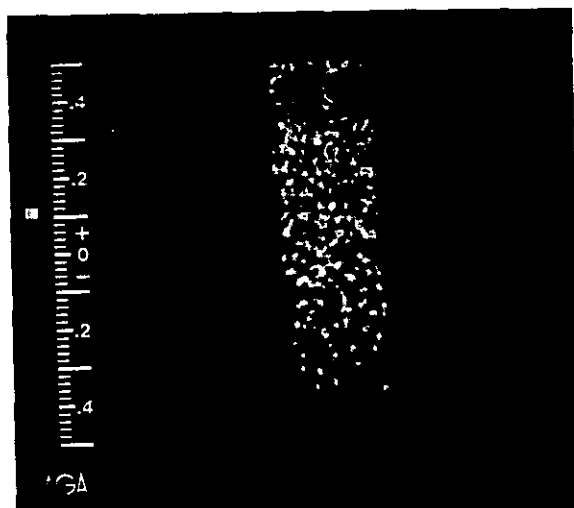


Figura III.77 Termograma correspondiente al ensayo con filtro de CO_2 y una disolución de NaCl durante el primer día de evaporación

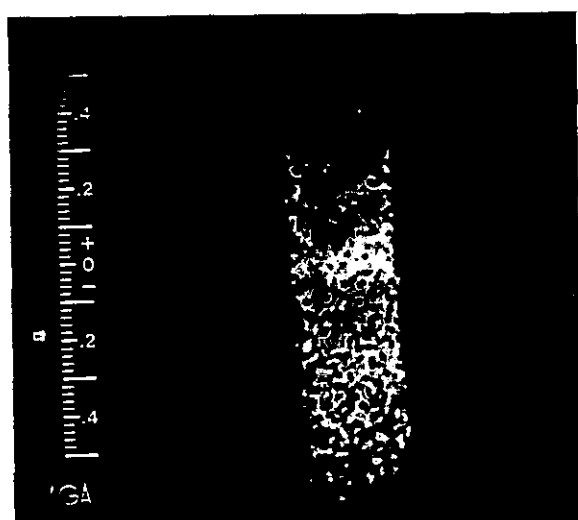


Figura III.78 Termograma correspondiente al ensayo con filtro de CO_2 y una disolución de Na_3PO_4 durante el primer día de evaporación.



Figura III.79 Termograma correspondiente al ensayo sin filtro y con agua destilada durante el tercer día de evaporación

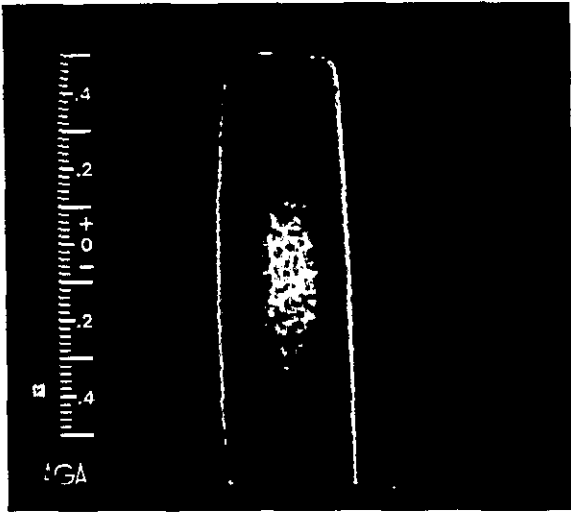


Figura III.80 Termograma correspondiente al ensayo sin filtro y con una disolución de NaCl durante el tercer día de evaporación

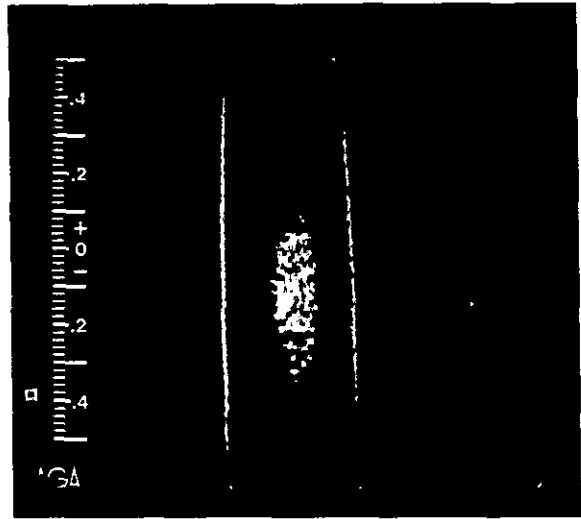


Figura III.81 Termograma correspondiente al ensayo sin filtro y disolución de Na₃PO₄ durante el tercer día de evaporación

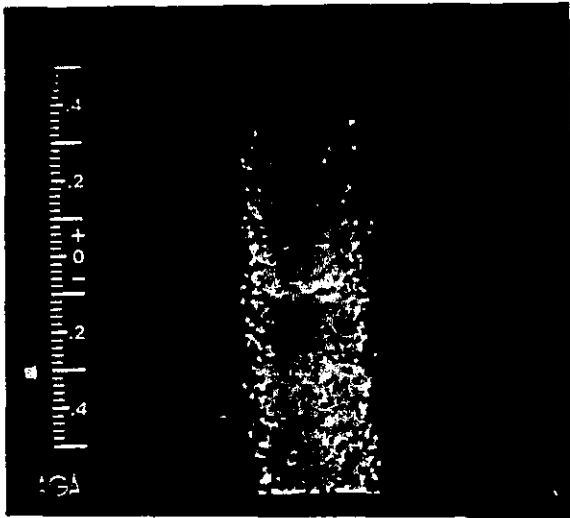


Figura III.82 Termograma correspondiente al ensayo con filtro de agua y agua destilada durante el tercer día de evaporación

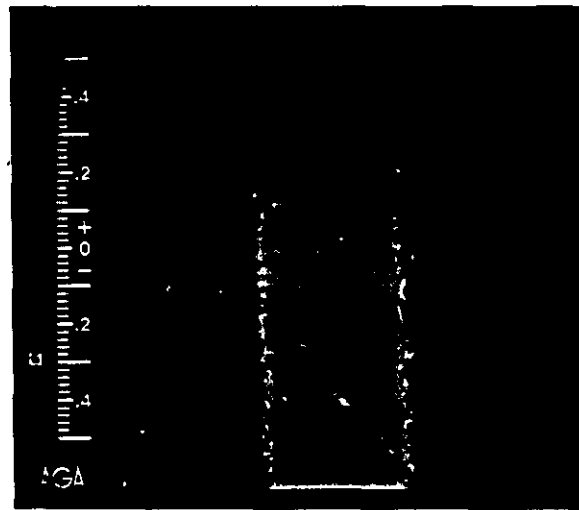


Figura III.83 Termograma correspondiente al ensayo con filtro de agua y una disolución de NaCl durante el tercer día de evaporación

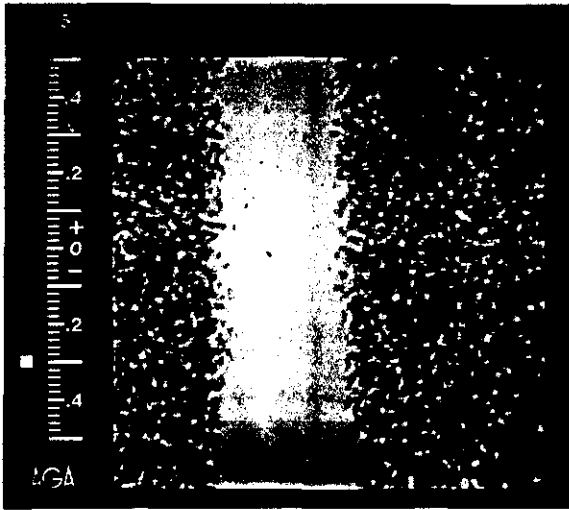


Figura III.84 Termograma correspondiente al ensayo con filtro de agua y una disolución de Na_3PO_4 durante el tercer día de evaporación

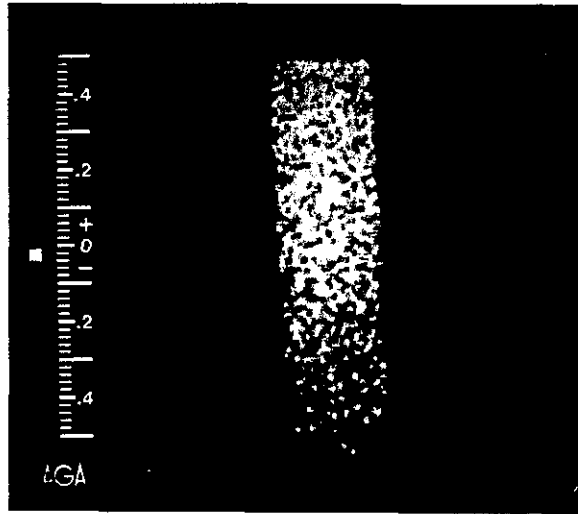


Figura III.85 Termograma correspondiente al ensayo con filtro de CO_2 y agua destilada durante el tercer día de evaporación



Figura III.86 Termograma correspondiente al ensayo realizado con filtro de CO_2 y disolución de NaCl durante el tercer día de evaporación

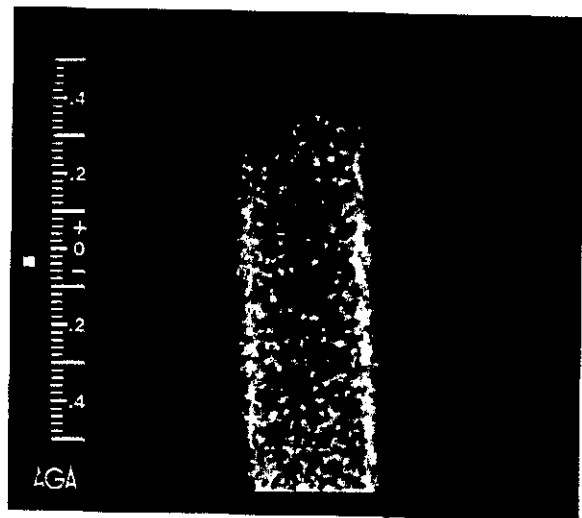


Figura III.87 Termograma correspondiente al ensayo con filtro de CO_2 y una disolución de Na_3PO_4 durante el tercer día de evaporación.

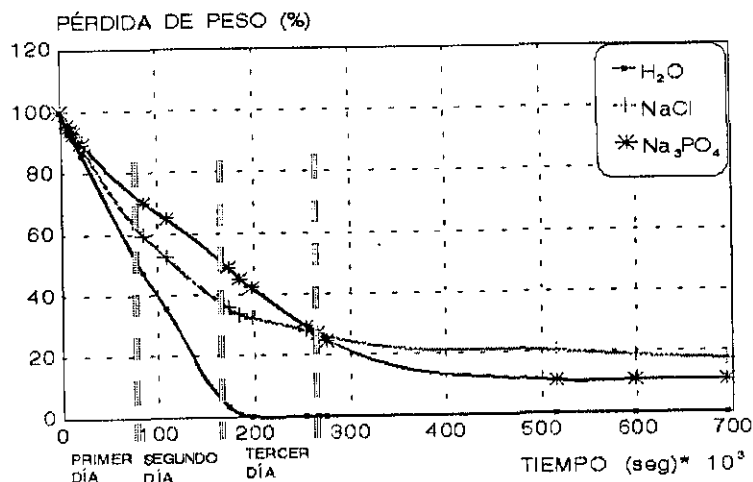


Figura III.88 Curvas de pérdida de peso en los procesos de evaporación

Posteriormente, se realizaron ensayos de succión capilar con disoluciones salinas en los distintos materiales estudiados. La disposición de los ensayos fue la misma explicada antes (figura III.62). En las figuras y tablas posteriores se presentan los resultados obtenidos después de ajustar los resultados de los procesos de evaporación con disoluciones salinas en los distintos materiales estudiados. Se utilizaron en todos los casos disoluciones saturadas en condiciones ambientales normales.

| | A (°C) | B (seg) | C (°C) | D (seg) | T ₀ (°C) | r ² |
|---|--------|---------|---------|---------|---------------------|----------------|
| Na ₃ PO ₄ | 3.87 | 1261.03 | -4.64 | 10037.2 | 18.23 | .9988 |
| Na ₂ SO ₄ | 22.97 | 11722.6 | -25.06 | 20026.3 | 18.01 | .9998 |
| NaNO ₃ | 485.91 | 28993.0 | -486.67 | 29521.5 | 17.08 | .9972 |
| Na ₂ C ₂ O ₄ | 379.24 | 24232.2 | -382.41 | 25515.8 | 19.05 | .9974 |
| NaCl | 121.47 | 34919 | -122.30 | 36654.7 | 18.38 | .9999 |

Tabla III.19 Coeficientes de las curvas obtenidas en los ensayos realizados con mortero de cal

| | A (°C) | B (seg) | C (°C) | D (seg) | T ₀ (°C) | r ² |
|---|--------|----------|---------|----------|---------------------|----------------|
| Na ₃ PO ₄ | 4.45 | 1352.43 | -5.39 | 29799.10 | 18.50 | .9901 |
| Na ₂ SO ₄ | 34.65 | 11142.90 | -36.81 | 15389.20 | 18.38 | .9997 |
| NaNO ₃ | 209.19 | 16808.60 | -210.32 | 17628.20 | 17.68 | .9996 |
| Na ₂ C ₂ O ₄ | 9.54 | 39647.30 | -14.01 | 65560.20 | 20.57 | .9999 |
| NaCl | 13.65 | 12852.10 | -14.74 | 48106.90 | 20.12 | .9992 |

Tabla III.20 Coeficientes de las curvas obtenidas en los ensayos realizados con caliza

| | A (°C) | B (seg) | C (°C) | D (seg) | T ₀ (°C) | r ² |
|---|--------|---------|---------|---------|---------------------|----------------|
| Na ₃ PO ₄ | 60.88 | 1427.5 | -63.48 | 1576.81 | 18.83 | .9995 |
| Na ₂ SO ₄ | 336.51 | 676.99 | -338.76 | 685.85 | 17.99 | .9981 |
| NaNO ₃ | 201.62 | 419.56 | -203.14 | 426.97 | 18.64 | .9997 |
| Na ₂ C ₂ O ₄ | 127.97 | 889.20 | -129.68 | 955.89 | 20.61 | .9993 |
| NaCl | 3.01 | 523.06 | -4.60 | 1098.89 | 19.10 | .9998 |

Tabla III.21 Coeficientes de las curvas obtenidas en los ensayos realizados con granito

| | A (°C) | B (seg) | C (°C) | D (seg) | T ₀ (°C) | r ² |
|---|--------|---------|---------|---------|---------------------|----------------|
| Na ₃ PO ₄ | 47.20 | 770.84 | -48.38 | 859.20 | 17.59 | .9995 |
| Na ₂ SO ₄ | 210.92 | 1848.56 | -212.76 | 1911.75 | 17.81 | .9981 |
| NaNO ₃ | 1.24 | 684.88 | -1.41 | 17545.1 | 17.08 | .9997 |
| Na ₂ C ₂ O ₄ | 2.44 | 1798.72 | -4.16 | 9290.60 | 19.40 | .9993 |
| NaCl | 5.30 | 1031.34 | -6.01 | 1975.70 | 18.71 | .9998 |

Tabla III.22 Coeficientes de las curvas obtenidas en los ensayos realizados con mortero de cemento

| | A (°C) | B (seg) | C (°C) | D (seg) | T ₀ (°C) | r ² |
|---|--------|---------|---------|---------|---------------------|----------------|
| Na ₃ PO ₄ | 89.54 | 2619.66 | -89.87 | 2743.7 | 18.75 | .9985 |
| Na ₂ SO ₄ | 87.10 | 7654.59 | -92.24 | 7654.59 | 17.76 | .9962 |
| NaNO ₃ | 18.03 | 1939.13 | -17.57 | 2507.82 | 18.54 | .9995 |
| Na ₂ C ₂ O ₄ | 255.44 | 738.44 | -254.79 | 758.94 | 18.79 | .9971 |
| NaCl | 320.11 | 2365.98 | -320.85 | 2409.22 | 20.50 | .9973 |

Tabla III.23 Coeficientes de las curvas obtenidas en los ensayos realizados con mortero de reparación

I

| | A (°C) | B (seg) | C (°C) | D (seg) | T ₀ (°C) | r ² |
|---|---------|---------|----------|----------|---------------------|----------------|
| Na ₃ PO ₄ | 1350.51 | 3199.76 | -1351.18 | 3211.46 | 19.09 | .9904 |
| Na ₂ SO ₄ | 1357.00 | 3687.16 | -1358.05 | 3695.67 | 17.30 | .9979 |
| NaNO ₃ | 1356.76 | 2315.43 | -1356.71 | 2320.91 | 18.43 | .9962 |
| Na ₂ C ₂ O ₄ | 1352.68 | 889.82 | -1352.02 | - 892.91 | 18.55 | .9996 |
| NaCl | 1937.15 | 1069.9 | -1939.91 | 1073.45 | 19.20 | .9987 |

Tabla III.24 Coeficientes de las curvas obtenidas en los ensayos realizados con mortero de reparación I

| | A (°C) | B (seg) | C (°C) | D (seg) | T ₀ (°C) | r ² |
|---|--------|---------|---------|---------|---------------------|----------------|
| Na ₃ PO ₄ | 4.54 | 2935.98 | -5.56 | 29992.6 | 18.14 | .9998 |
| Na ₂ SO ₄ | 2.76 | 706.10 | -3.01 | 32815 | 17.15 | .9944 |
| NaNO ₃ | 258.79 | 17490 | -259.98 | 18293.3 | 17.89 | .9957 |
| Na ₂ C ₂ O ₄ | 264.68 | 24704.3 | -268.45 | 26343.8 | 20.24 | .9993 |
| NaCl | 122.80 | 23087.9 | -123.75 | 26537.5 | 19.47 | .9993 |

Tabla III.25 Coeficientes de las curvas obtenidas en los ensayos realizados con mortero de reparación III

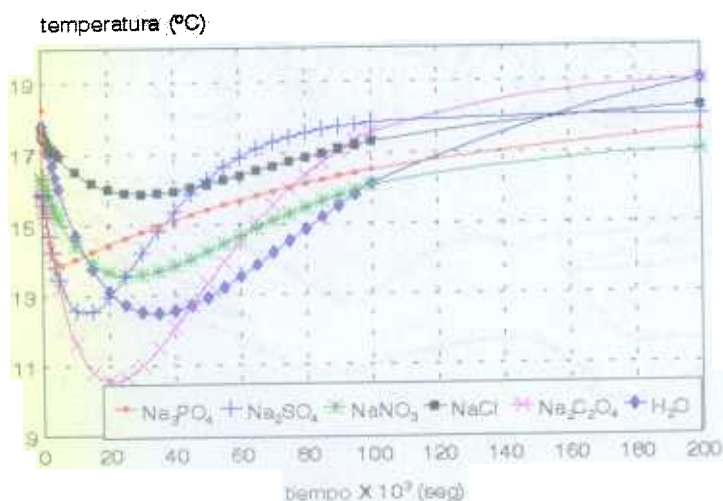


Figura III.89 Evolución de la temperatura con el tiempo en los ensayos realizados con mortero de cal

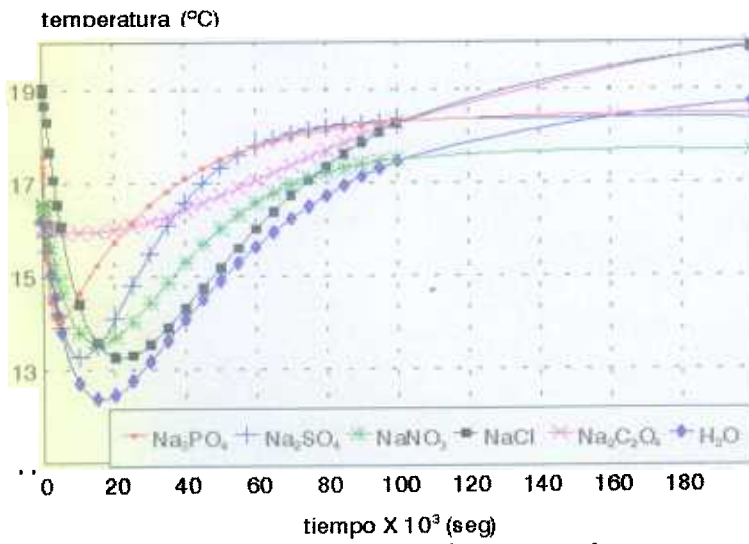


Figura III.90 Evolución de la temperatura con el tiempo en los ensayos realizados con caliza

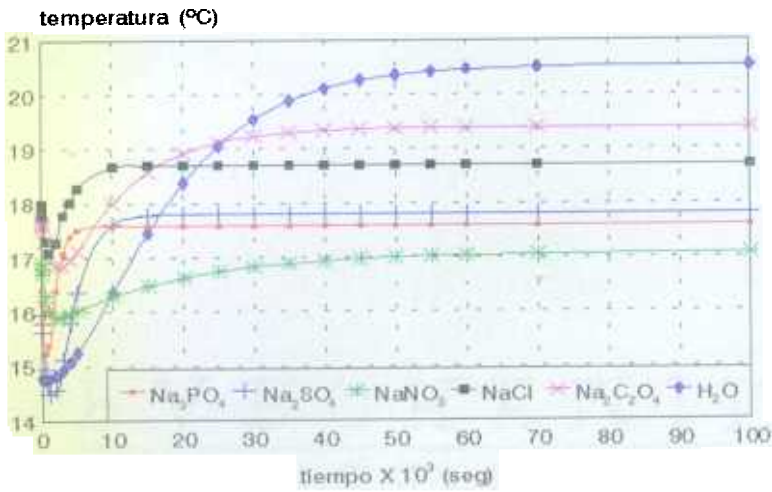


Figura III.91 Evolución de la temperatura con el tiempo en los ensayos realizados con mortero de cemento

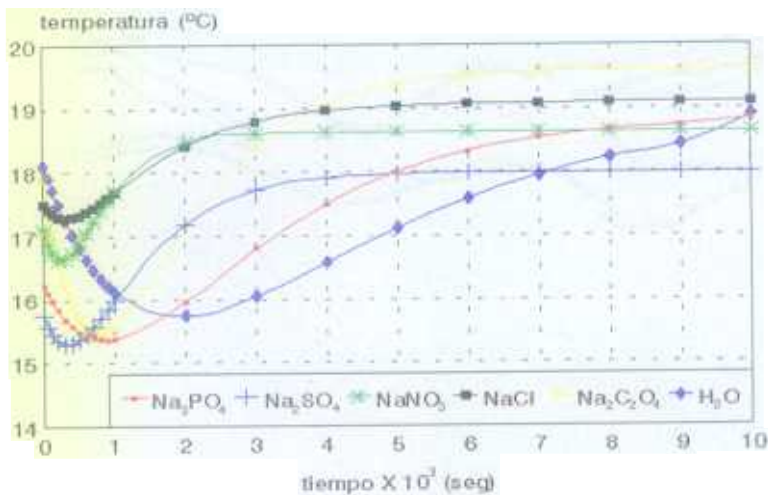


Figura III.92 Evolución de la temperatura con el tiempo en los ensayos realizados con granito

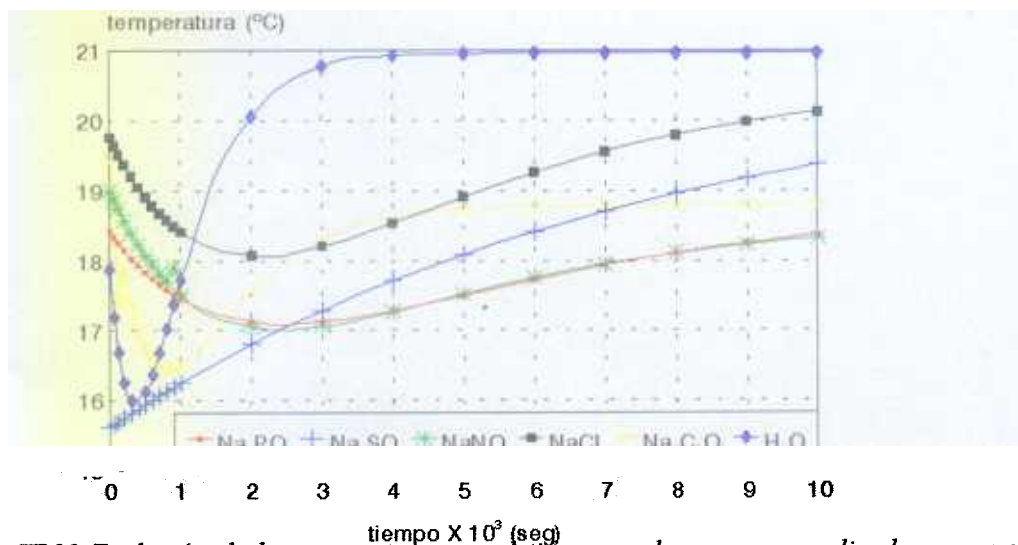


Figura III.93 Evolución de la temperatura con el tiempo en los ensayos realizados con mortero de reparación I

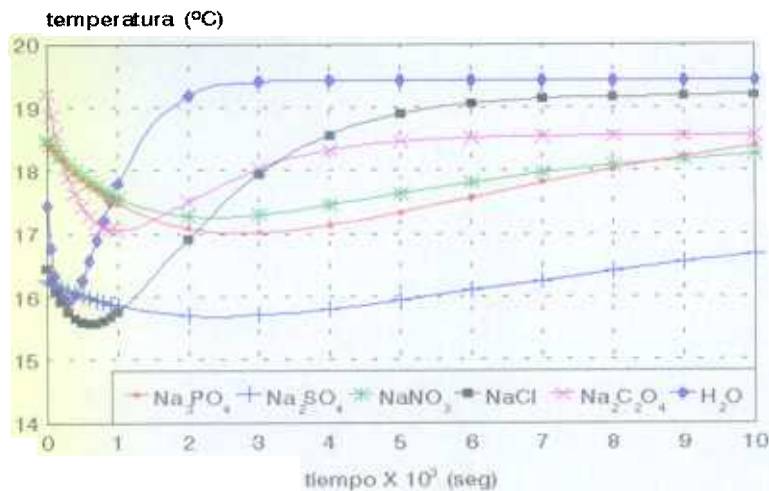


Figura III.94 Evolución de la temperatura con el tiempo en los ensayos realizados con mortero de reparación II

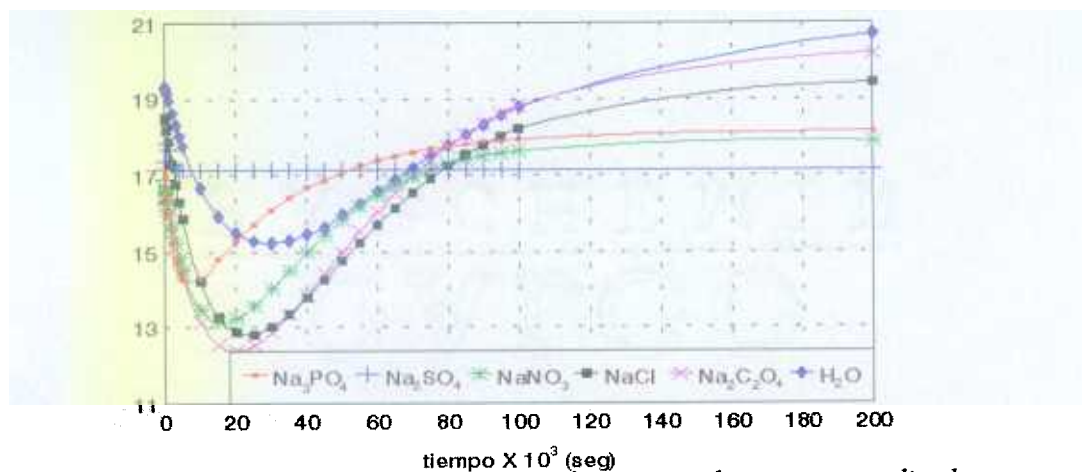


Figura III.95 Evolución de la temperatura con el tiempo en los ensayos realizados con mortero de reparación III

| | E (%) | F (seg) | G (%) | H (seg) | P _o (%) | r ² |
|---|-------|----------|-------|-----------|--------------------|----------------|
| Na ₃ PO ₄ | 24.65 | 49017.10 | 62.46 | 49011.20 | 4.55 | .9988 |
| Na ₂ SO ₄ | 12.93 | 47294.40 | 56.71 | 47528.30 | 10 ⁻⁹ | .9985 |
| NaNO ₃ | 44.45 | 50558.10 | 41.27 | 146330.00 | 9.63 | .9976 |
| Na ₂ C ₂ O ₄ | 25.50 | 10270.10 | 70.06 | 141917.00 | 4.44 | .9999 |
| NaCl | 60.00 | 76118.80 | 27.29 | 24883.30 | 10.42 | .9990 |

Tabla III.26 Coeficientes de las curvas obtenidas en los ensayos realizados con caliza

| | E (%) | F (seg) | G (%) | H (seg) | P _o (%) | r ² |
|---|-------|-----------|-------|-----------|--------------------|----------------|
| Na ₃ PO ₄ | 98.04 | 113400.00 | 2.14 | 27.92 | 0.26 | .9941 |
| Na ₂ SO ₄ | 65.90 | 95925.50 | 31.92 | 108358.00 | 2 10 ⁻⁸ | .9954 |
| NaNO ₃ | 37.17 | 156225 | 52.07 | 156236 | 11.62 | .9989 |
| Na ₂ C ₂ O ₄ | 20.71 | 519609.00 | 80.29 | 89523.40 | 3 10 ⁻⁷ | .9994 |
| NaCl | 79.82 | 129773.00 | 8.78 | 7312.40 | 11.64 | .9998 |

Tabla III.27 Coeficientes de las curvas obtenidas en los ensayos realizados con mortero de cal

| | E(%) | F (seg) | G (%) | H (seg) | P _o (%) | r ² |
|---|-------|---------|-------|---------|--------------------|----------------|
| Na ₃ PO ₄ | 15.76 | 41.86 | 46.70 | 326.58 | 37.38 | .9991 |
| Na ₂ SO ₄ | 3.13 | 5931.41 | 6.52 | 433.96 | 90.23 | .9915 |
| NaNO ₃ | 62.31 | 220.66 | 22.05 | 6086.92 | 15.44 | .9906 |
| Na ₂ C ₂ O ₄ | 7.95 | 3653.45 | 23.66 | 114.06 | 70.50 | .9948 |
| NaCl | 49.04 | 2681.50 | 32.53 | 166.23 | 12.09 | .9945 |

Tabla III.28 Coeficientes de las curvas obtenidas en los ensayos realizados con granito

| | E (%) | F (seg) | G (%) | H(seg) | P ₀ (%) | r ² |
|---|-------|----------|-------|-----------|--------------------|----------------|
| Na ₃ PO ₄ | 56.61 | 71342.80 | 4.17 | 964.68 | 38.85 | .9999 |
| Na ₂ SO ₄ | 6.40 | 670.15 | 19.08 | 399885.00 | 74.14 | .9964 |
| NaNO ₃ | 47.31 | 1529.28 | 8.91 | 36.51 | 40.84 | .9968 |
| Na ₂ C ₂ O ₄ | 8.02 | 231.53 | 47.97 | 35721.80 | 43.95 | .9999 |
| NaCl | 8.99 | 507.55 | 39.18 | 63839.00 | 51.84 | .9997 |

Tabla III.29 Coeficientes de las curvas obtenidas en los ensayos realizados con mortero de cemento

| | E (%) | F (seg) | G (%) | H (seg) | P ₀ (%) | r ² |
|---|-------|---------|-------|-----------|--------------------|----------------|
| Na ₃ PO ₄ | 16.54 | 506.05 | 6.49 | 29066.70 | 77.05 | .9993 |
| Na ₂ SO ₄ | 23.37 | 4396.24 | 25.08 | 391975.00 | 48.37 | .9947 |
| NaNO ₃ | 38.61 | 586.47 | 23.60 | 18169.30 | 37.20 | .9910 |
| Na ₂ C ₂ O ₄ | 66.82 | 140.21 | 32.17 | 2215.86 | 0.93 | .9941 |
| NaCl | 37.04 | 258.90 | 18.71 | 24979.70 | 44.35 | .9912 |

Tabla III.30 Coeficientes de las curvas obtenidas en los ensayos realizados con mortero de reparación

I

| | E (%) | F (seg) | G (%) | H (seg) | p ₀ (%) | r ² |
|---|-------|---------|-------|-------------------|--------------------|----------------|
| Na ₃ PO ₄ | 12.83 | 328.90 | 22.88 | 78117.40 | 63.94 | .9955 |
| Na ₂ SO ₄ | 10.56 | 1049.34 | 70.39 | 1 10 ⁶ | 17.59 | .9939 |
| NaNO ₃ | 15.42 | 211.01 | 19.79 | 29451.70 | 64.71 | .9965 |
| Na ₂ C ₂ O ₄ | 47.59 | 378.62 | 27.60 | 18581.80 | 24.65 | .9988 |
| NaCl | 7.49 | 331.20 | 20.93 | 57774.70 | 71.65 | .9996 |

Tabla III.31 Coeficientes de las curvas obtenidas en los ensayos realizados con mortero de reparación

II

| | E (%) | F (seg) | G (%) | H (seg) | P ₀ (°C) | r ² |
|---|-------|-----------|-------|-------------------|---------------------|----------------|
| Na ₃ PO ₄ | 24.28 | 74628.50 | 46.82 | 74622.80 | 27.44 | .9973 |
| Na ₂ SO ₄ | 77.01 | 180229 | 4.06 | 12172.00 | 18.62 | .9998 |
| NaNO ₃ | 63.43 | 100214.00 | 36.03 | 2 10 ⁶ | 10 ⁶ | .9994 |
| Na ₂ C ₂ O ₄ | 33.14 | 33330.20 | 47.02 | 119182.00 | 18.98 | .9997 |
| NaCl | 31.85 | 5450000 | 67.45 | 76575.3 | .00068 | .9997 |

Tabla III.32 Coeficientes de las curvas obtenidas en los ensayos realizados con mortero de reparación III

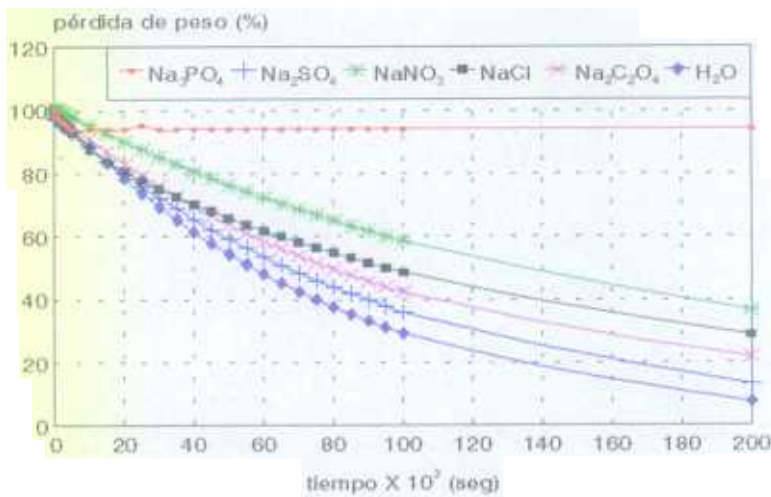


Figura III.96 Evolución del peso con el tiempo en los ensayos realizados con mortero de cal

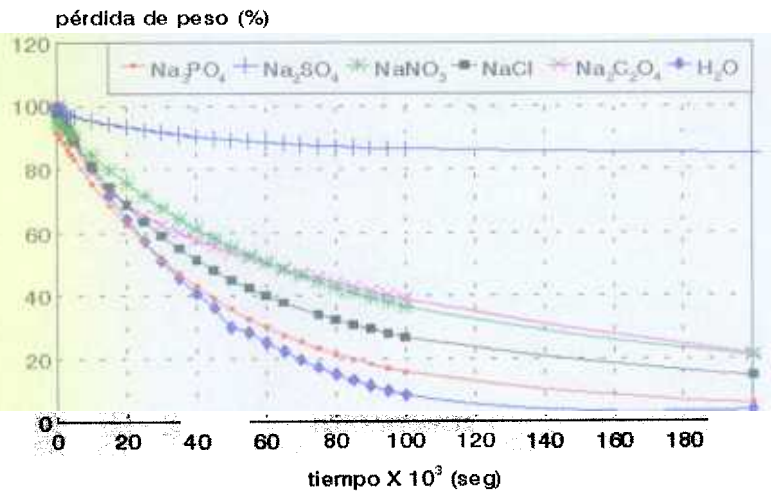


Figura III.97 Evolución del peso con el tiempo en los ensayos realizados con caliza

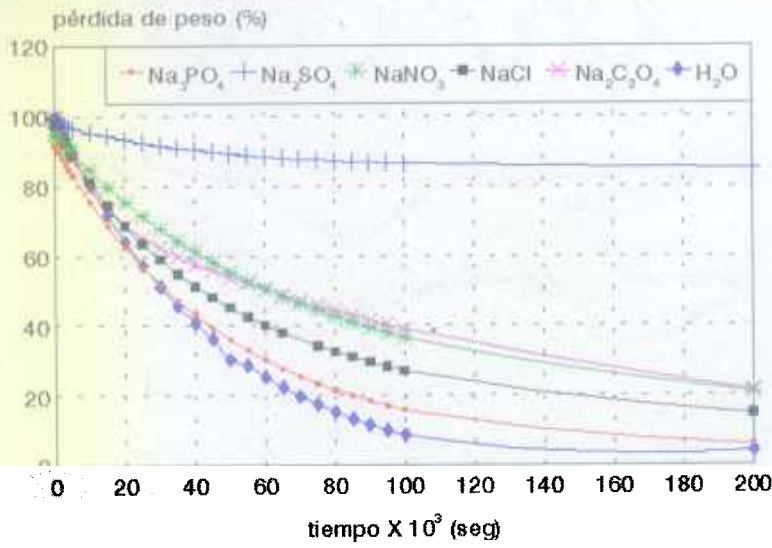


Figura III.98 Evolución del peso con el tiempo en los ensayos realizados con mortero de cemento

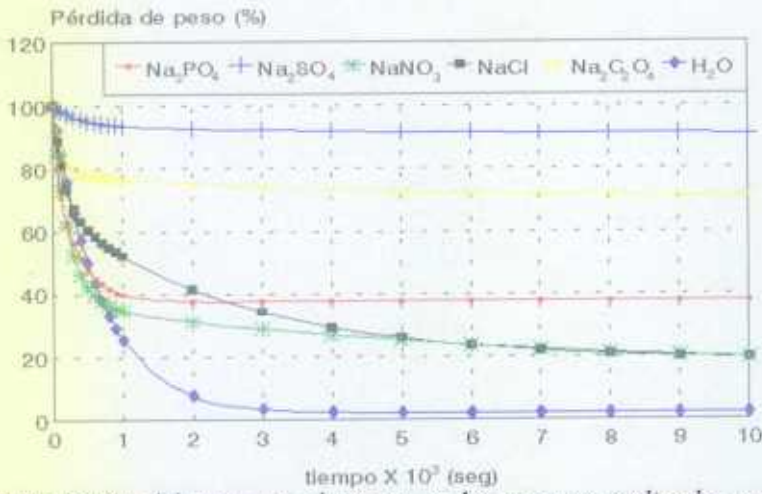


Figura III.99 Evolución del peso con el tiempo en los ensayos realizados con granito

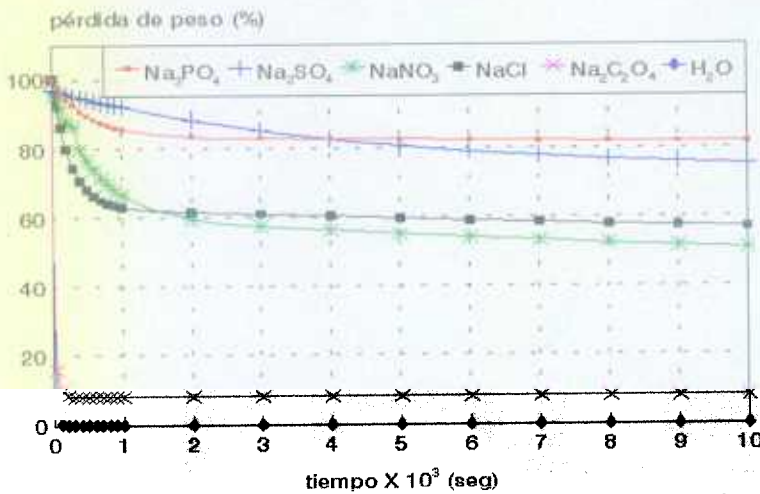


Figura III.100 Evolución del peso con el tiempo en los ensayos realizados con mortero de reparación I

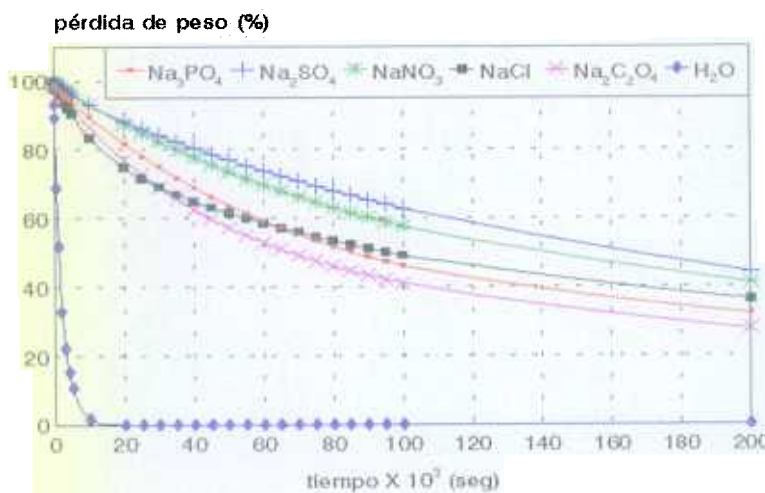
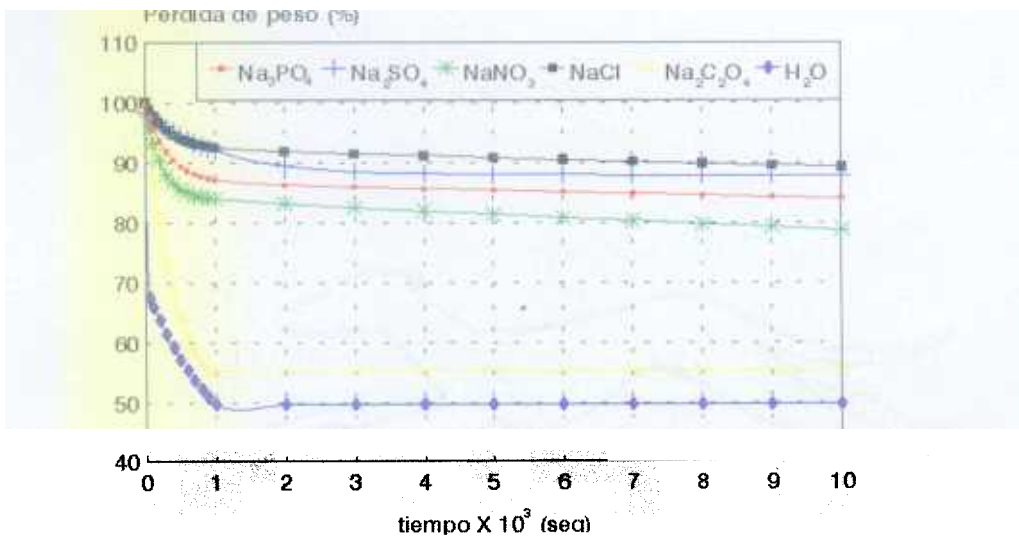


Figura III.102 Evolución del peso con el tiempo en los ensayos realizados con mortero de reparación III

III.2.3.c.- Procesos de capilaridad

* Succión capilar con agua destilada a 20 °C

La preparación de los ensayos fue similar a la ya explicada para el caso de procesos de evaporación. Se usaron los mismos materiales y disoluciones antes expuestos. Tanto el intervalo como el periodo de medida se estableció para cada material en función de la capacidad del mismo para absorber agua (y, por tanto, en función de su porosidad).

Se consideraron tres puntos de la superficie del material a estudiar en cada caso, situados respectivamente a 1, 5 y 15 cm de altura. Tales puntos se nombrarán en los gráficos correspondientes a estos ensayos como punto 1, 2 y 3 respectivamente. A partir de los resultados de radiación emitida obtenidos, se determinaron curvas de variación de temperatura y emisividad con el tiempo (una para cada combinación material/disolución y cada uno de los puntos de su superficie). La obtención de estos valores a partir de los resultados de radiación emitida se realizó siguiendo un proceso de separación de variables como el explicado en el punto III.2.3.a.

EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA CON EL TIEMPO

La ecuación teórica obtenida para este tipo de procesos es formalmente igual a la presentada en [III.53]. Los valores experimentales de temperatura superficial se ajustaron a una combinación lineal de funciones exponenciales. Las curvas ajustadas al modelo obtenido se muestran en las figuras III.103 a III.105. En la tabla III.33 se muestran los parámetros experimentales obtenidos. Cada uno de los ensayos se realizó con una muestra diferente y siempre se mantuvo otra muestra igual seca que se usó para cuantificar las posibles perturbaciones introducidas por la atmósfera.

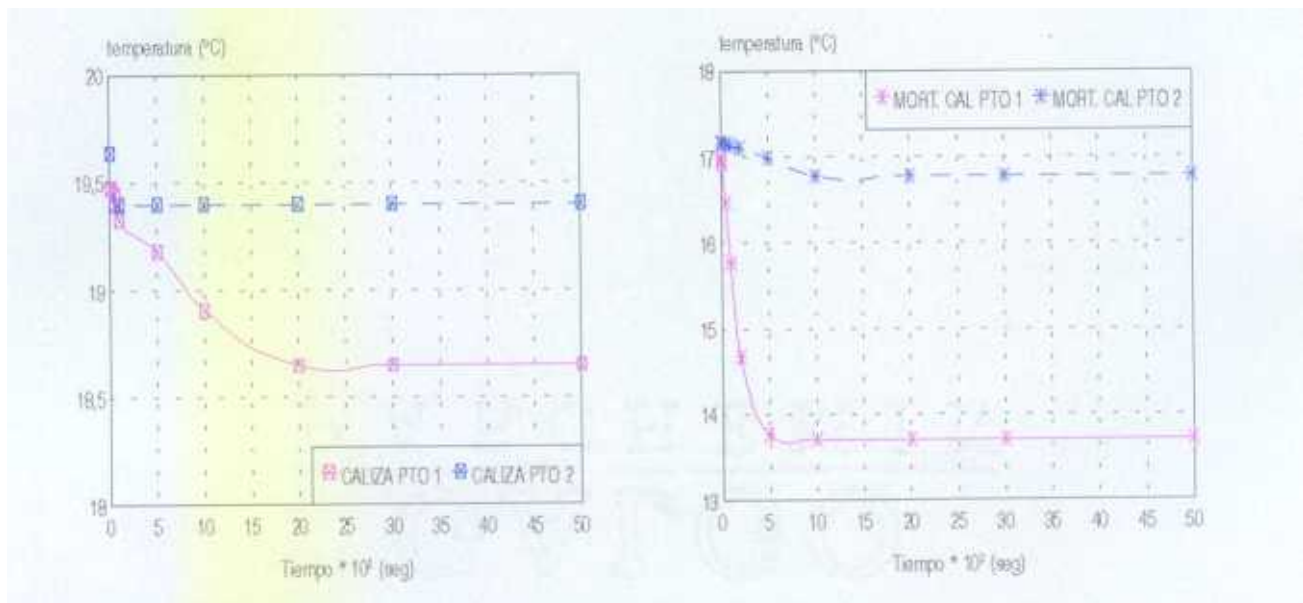


Figura III.103 Curvas de temperatura superficial correspondientes a mortero de cal y caliza

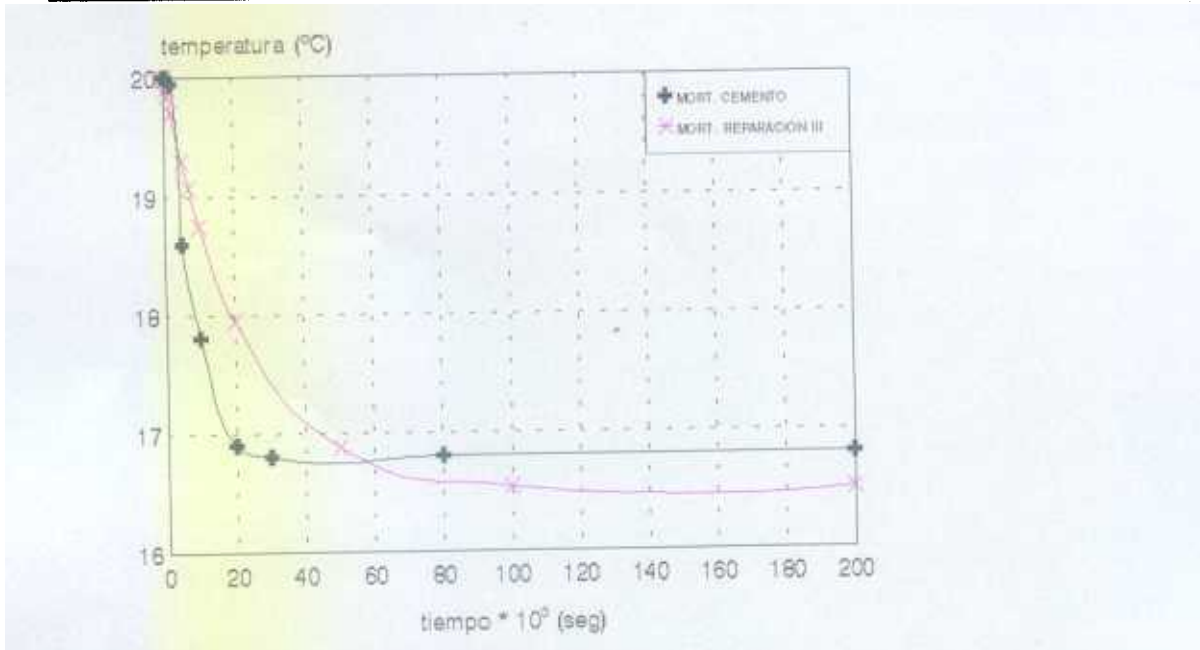


Figura III.104 Curvas de temperatura superficial correspondientes al mortero de cemento y mortero de reparación III

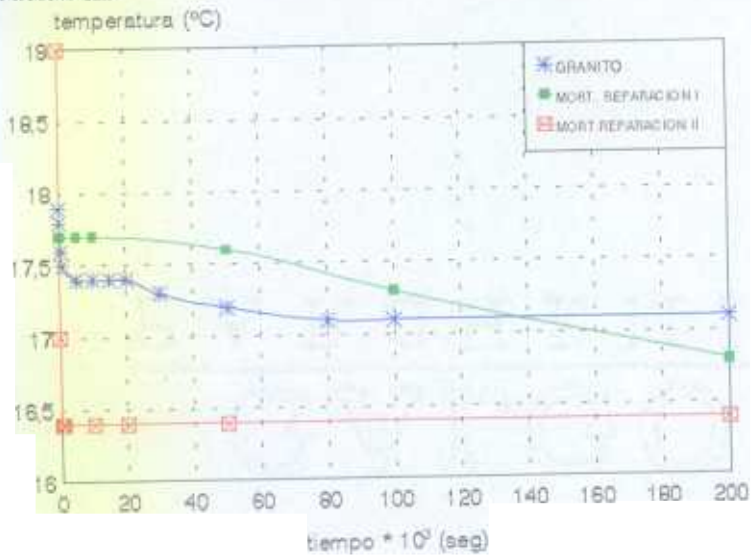


Figura III.105 Curvas de temperatura superficial correspondientes a los morteros de reparación I y II y al granito

En el caso de materiales de porosidad pequeña, no se obtuvieron variaciones significativas de temperatura superficial en puntos localizados a 5 cm de altura. Las pequeñas variaciones registradas en esta zona se debían a cambio de temperatura por efectos de conducción dentro del material: la parte más baja (mojada) enfriaba la parte superior. Por eso, no se registraban variaciones de emisividad respecto al caso de material seco. En los casos correspondientes a la caliza y al mortero de cal, sí se produce un ascenso real del agua hasta dichas alturas (hay cambio de emisividad).

| | A (°C) | B (seg) | C (°C) | D (seg) | T ₀ (°C) | r ² |
|---------------------|---------|--------------------|--------|-----------|---------------------|----------------|
| M. CAL PTO 1 | -23.57 | 810.58 | 26.83 | 908.14 | 13.71 | .9993 |
| M. CAL PTO 2 | -.09 | 3248.45 | 3.18 | 61378.80 | 14.07 | .9969 |
| CALIZA PTO 1 | -45.02 | 203371.00 | 50.02 | 203371.00 | 14.80 | .9980 |
| CALIZA PTO 2 | -.27 | 3 10 ¹⁹ | 4.46 | 1457.98 | 15.05 | .9990 |
| M.CEMENTO PTO 1 | .03 | 18949.00 | 1.56 | 1503.60 | 15.81 | .9978 |
| M.CEMENTO PTO 2 | — | — | — | — | — | — |
| M.REP. I PTO 1 | -299.48 | 27798.10 | 300.34 | 27950.00 | 16.78 | .9987 |
| M.REP. I PTO 2 | — | — | — | — | — | — |
| M.REP. II PTO 1 | -67.66 | 23688.70 | 67.86 | 23769.20 | 18.80 | .9991 |
| M.REP. II PTO 2 | — | — | — | — | — | — |
| M.REP. III PTO 1 | 3.50 | 22537.6 | — | — | 19.50 | .9952 |
| M.REP. III PTO 2 | — | — | — | — | — | — |
| GRANITO PTO 1 | .46 | 40.14 | 1.45 | 3351.20 | 15.98 | .9995 |
| GRANITO PTO 2 | — | — | — | — | — | — |

Tabla III.33 Coeficientes de ajuste de las curvas de temperatura de evaporación en procesos de capilaridad con agua destilada a 20 °C

Los coeficientes de las exponenciales correspondientes al punto más bajo mantienen valores muy próximos cuando los materiales tienen porosidades grandes o medias, mientras que la desviación entre ambos va aumentando a medida que la porosidad del material disminuye.

En los materiales con mayor capacidad de absorción (mortero de cal y caliza) el agua llega a alcanzar la zona a 5 cm de altura (en el periodo de tiempo en el que se realiza la medida). Se registran variaciones de temperatura superficial producidas por el ascenso de

agua a esta zona (hay un cambio de emisividad), pero estas variaciones son menores que en el punto más bajo. Por eso, las curvas de temperatura superficial correspondientes al punto 2 tienen amplitudes menores que las correspondientes al punto 1 (se produce un descenso menor de temperatura) y coeficientes mayores en las exponenciales (el proceso es más lento).

*** Ensayos de capilaridad horizontal**

Los ensayos de capilaridad horizontal inicialmente seco se realizaron únicamente sobre placas de escayola de 25 X 25 X 1 cm por ser éste el material en el que más fácilmente se deberían poner de manifiesto tales fenómenos según lo obtenido en el punto III.2.1.b.

En el desarrollo de tales ensayos, se consideraron tres placas de escayola inicialmente secas (secadas en estufa a 40°C) y en equilibrio térmico con la atmósfera. Una de estas placas (denominada en los ensayos como placa A) se mantuvo sumergida en agua destilada durante 48 horas. Una vez transcurrido este período de tiempo, se secó su superficie con un paño húmedo y se colocó en posición vertical, detrás de la placa B (inicialmente seca) y en contacto con ella. La placa C se mantuvo siempre seca y se utilizó como referencia al objeto de cuantificar los posibles cambios producidos por la propia atmósfera. Todas las placas se colocaron en posición vertical dentro de la caja negra, y enfrentadas a la termocámara. Se realizaron medidas de radiación emitida y variación de peso a lo largo del tiempo hasta que la placa B alcanzó el equilibrio. A partir de estos valores, se obtuvieron las evoluciones de temperatura superficial y emisividad siguiendo el proceso explicado en III.2.2. En la figura III.106 se presenta un esquema de la disposición del ensayo. Los resultados obtenidos se presentan en las figuras III.107 y III.108.

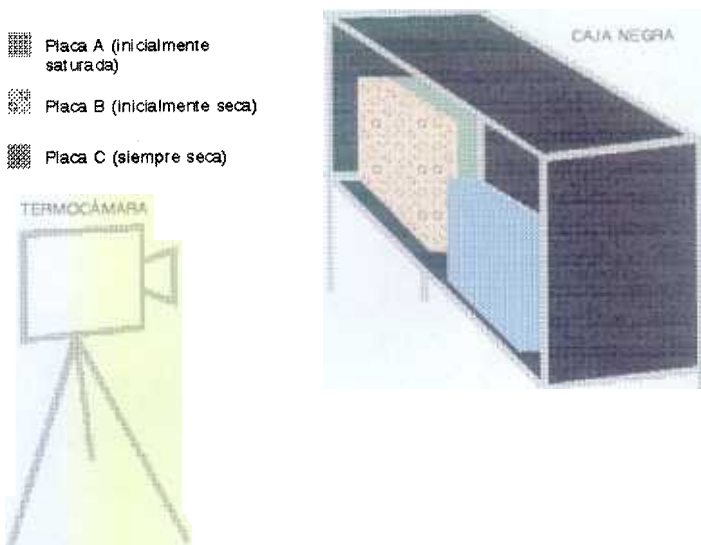


Figura III.106 Esquema de la disposición del ensayo

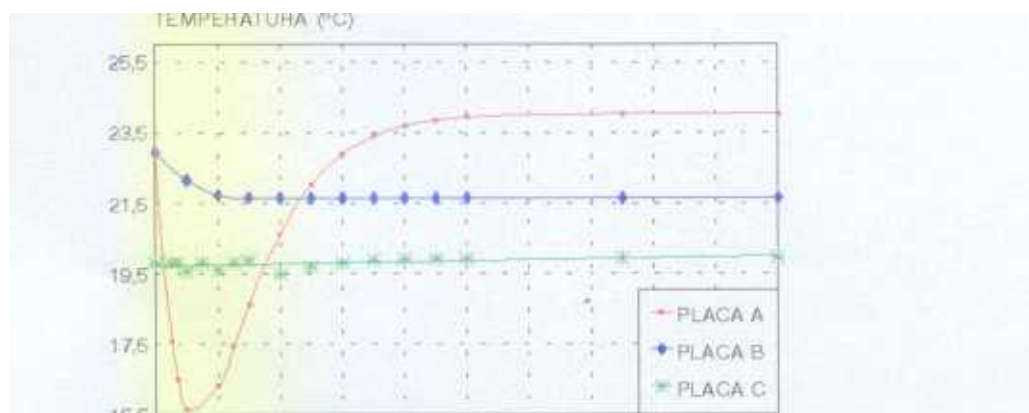


Figura III.107 Evolución de la temperatura superficial en las placas de escayola

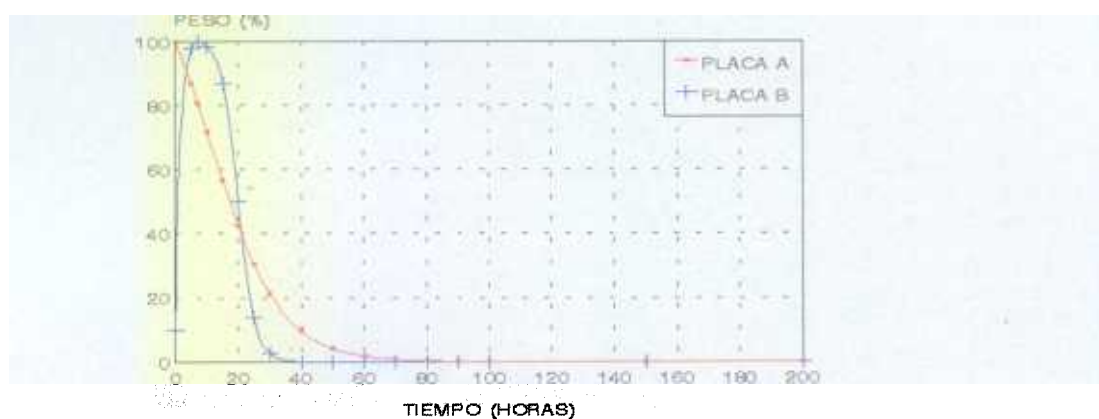


Figura III.108 Evolución del peso (en %) en las placas de escayola

En las curvas de variación de temperatura superficial se observa que la placa C no sufre cambios reales (la variación de temperatura queda dentro del margen de error de la termocámara usada). Por lo tanto, se puede considerar que la atmósfera no está influyendo en las variaciones producidas en las otras placas.

La placa A presenta un comportamiento similar al presentado en las figuras III.64 y III.65, por lo tanto, en esta placa sólo se está produciendo un proceso de pérdida de agua. Sin embargo, en la placa B, la temperatura solamente decrece sin llegar a recuperarse en todo el tiempo que dura el ensayo. Su comportamiento es similar al obtenido en los ensayos correspondientes a succión capilar.

En la figura III.108 se presentan las variaciones de peso (en %) sufridas por cada una de las muestras ensayadas. La placa A presenta un comportamiento similar al obtenido en procesos de evaporación presentado en las figuras III.66 y III.67. En la placa B se produce

primero un aumento de peso (porque está absorbiendo agua de la placa A) una vez que el material a absorbido una cantidad suficiente el proceso de evaporación es más importante que el de absorción y se empiezan a registrar pérdidas de peso en el material.

*** Procesos con disoluciones salinas**

En las figuras III.109 a III.117 se presentan los termogramas correspondientes a procesos de succión capilar con distintas disoluciones salinas. Todos los ensayos presentados en estas figuras se realizaron con probetas de escayola. Las medidas se realizaron usando Termografía Infrarroja Selectiva.

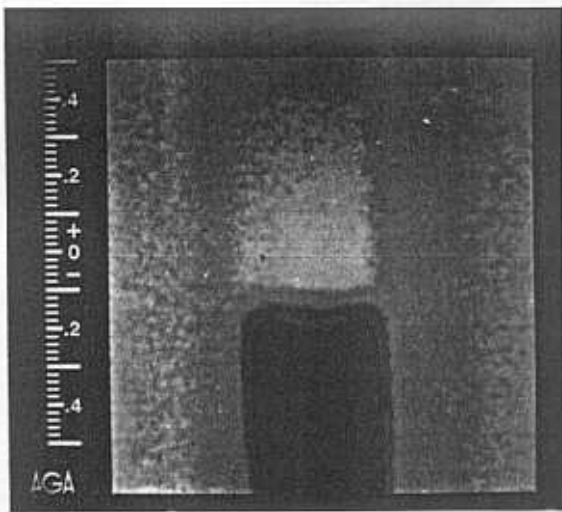


Figura III.109 Termograma correspondiente al ensayo sin filtro y con agua destilada

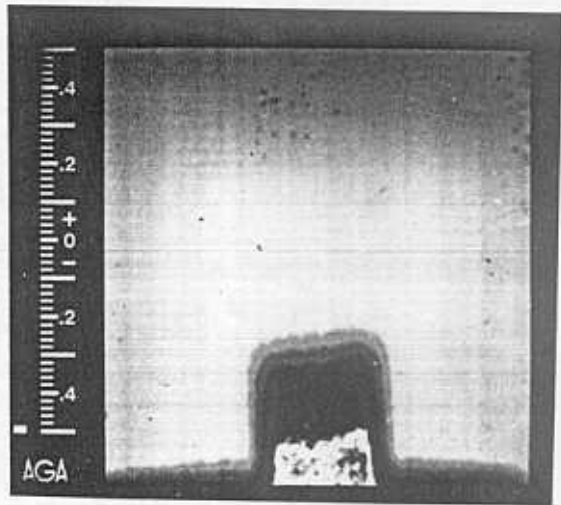


Figura III.110 Termograma correspondiente al ensayo sin filtro y con disolución de NaCl

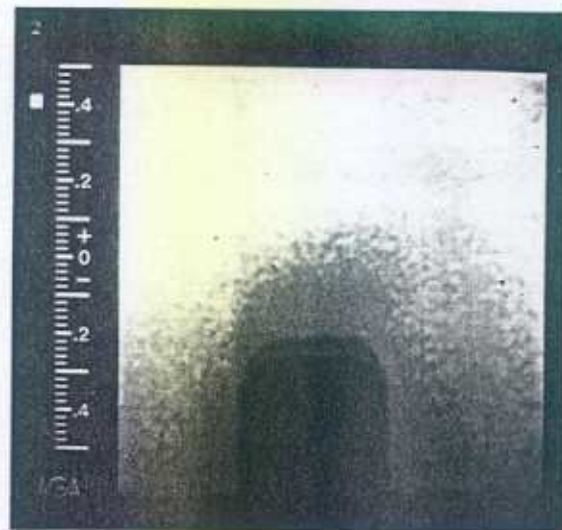


Figura III.111 Termograma correspondiente al ensayo sin filtro y con disolución de Na_3PO_4

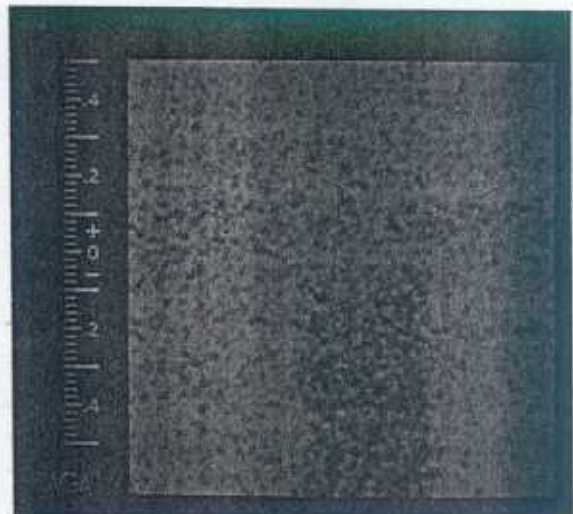


Figura III.112 Termograma correspondiente al ensayo con filtro de agua y agua destilada

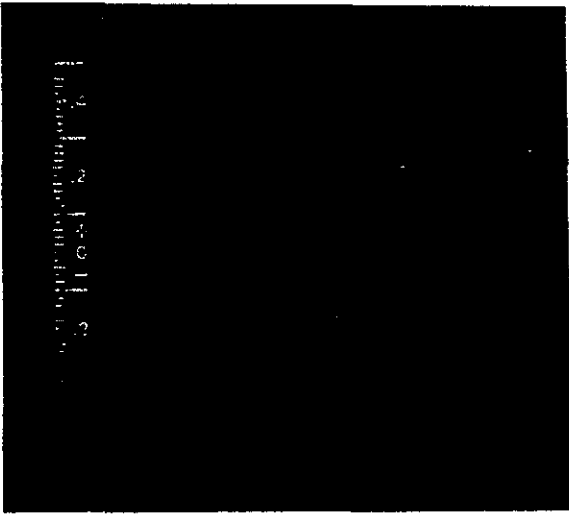


Figura III.113 Termograma correspondiente al ensayo con filtro de H_2O y disolución de $NaCl$

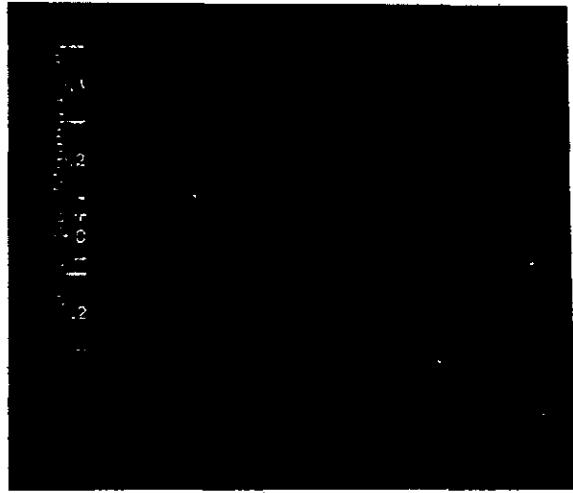


Figura III.114 Termograma correspondiente al ensayo realizado con filtro de H_2O y una disolución de Na_3PO_4

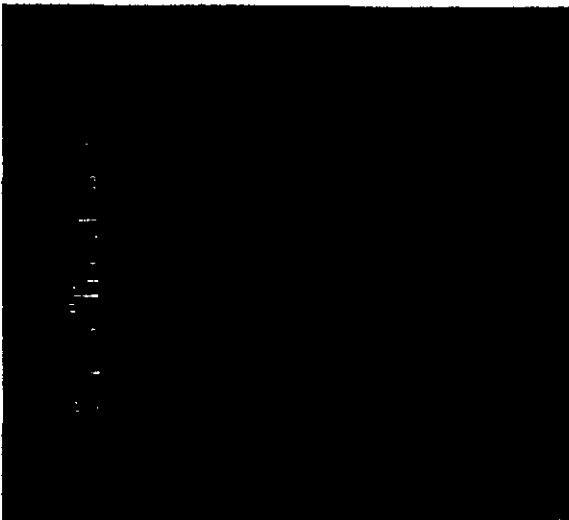


Figura III.115 Termograma correspondiente al ensayo con filtro de CO_2 y agua destilada

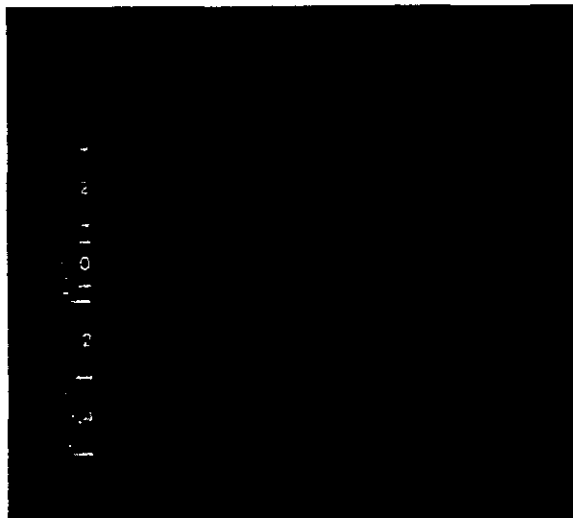


Figura III.116 Termograma correspondiente al ensayo con filtro de CO_2 y disolución de $NaCl$

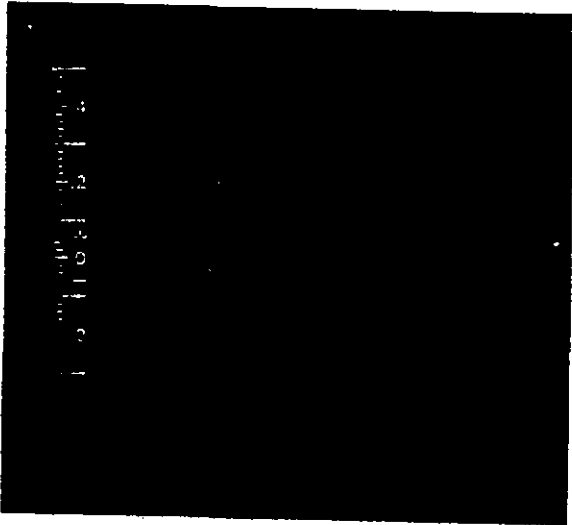


Figura III.117 Termograma correspondiente al filtro de CO_2 y una disolución de Na_3PO_4

Los ensayos de succión capilar con disoluciones salinas se realizaron con todos los materiales estudiados. En las figuras III.118 a III.124 se presentan las curvas de evolución de la temperatura superficial obtenida en los distintos materiales estudiados. Igual que en casos anteriores, las curvas corresponden al ajuste de los valores experimentales al modelo matemático obtenido. En las tablas III.34 a III.44 se presentan los coeficientes obtenidos.

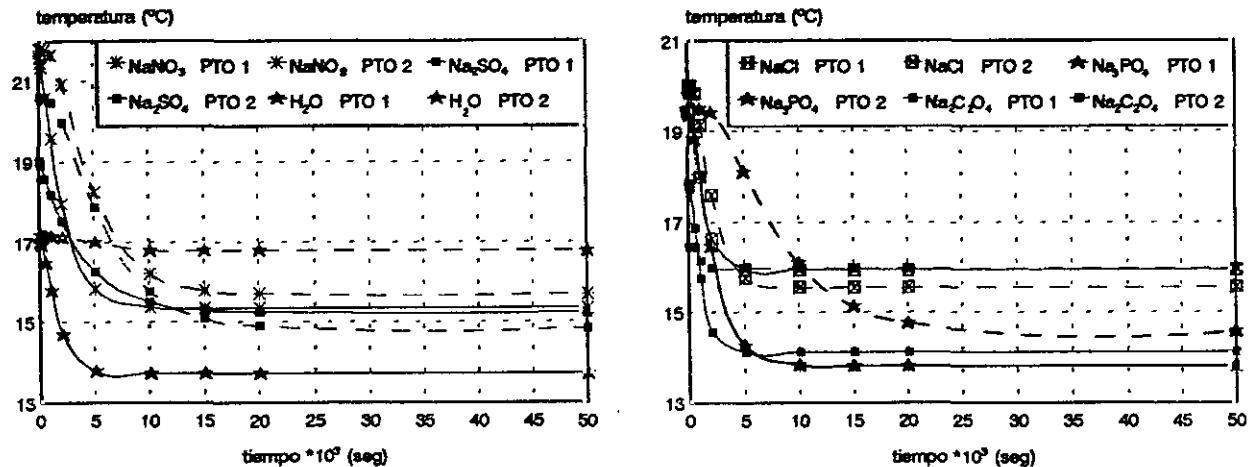


Figura III.118 Evolución de la temperatura en los procesos de capilaridad en mortero de cal

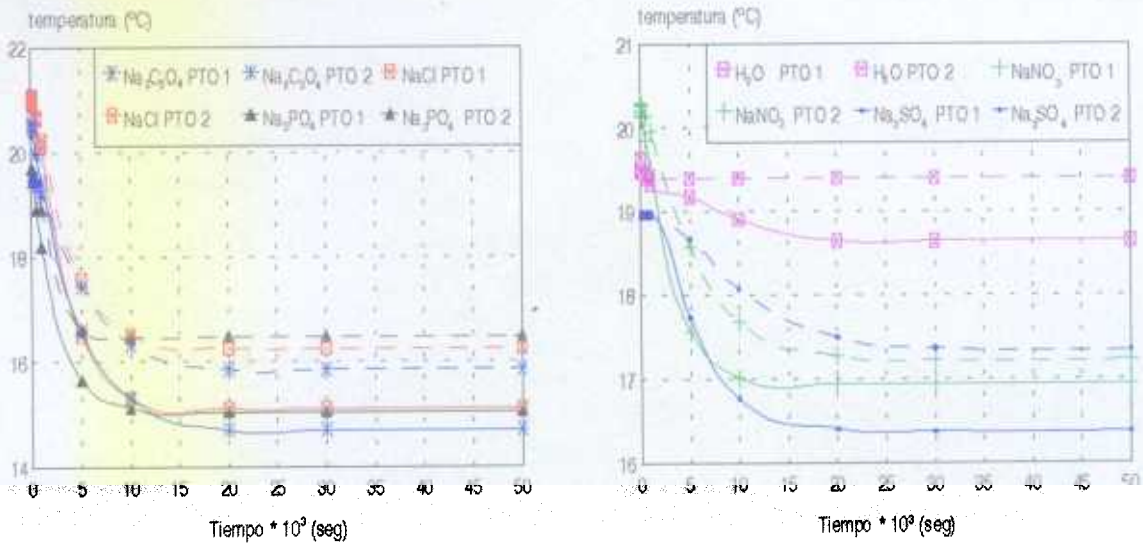


Figura III.119 Evolución de la temperatura en los procesos de capilaridad en caliza

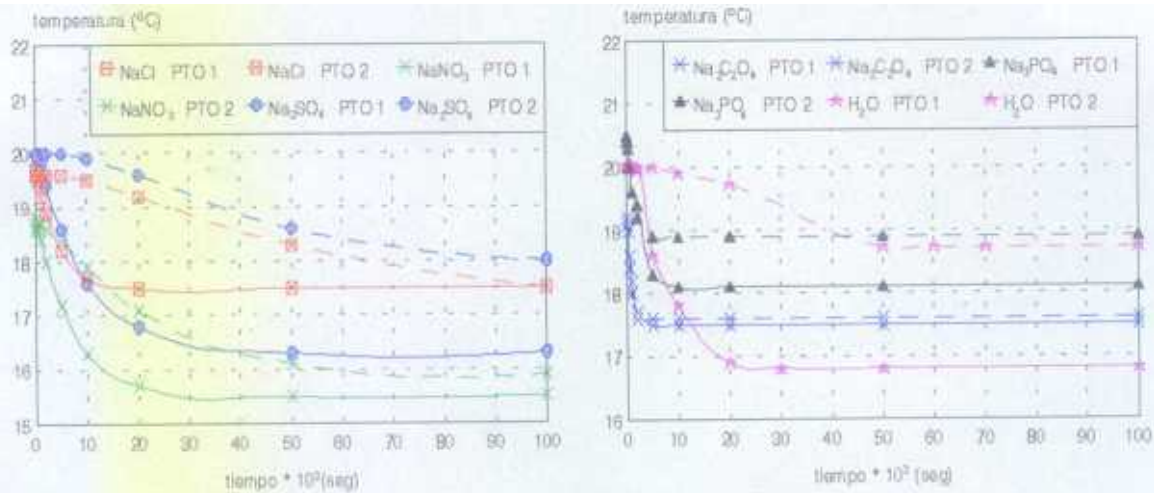


Figura III.120 Evolución de la temperatura en procesos de capilaridad en mortero de cemento

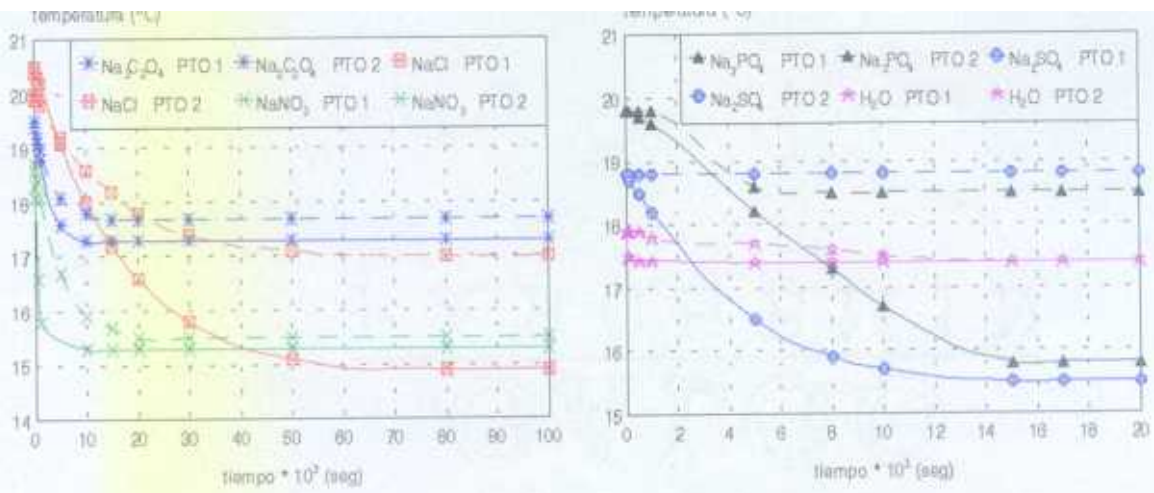


Figura III.121 Evolución de la temperatura en procesos de capilaridad en granito

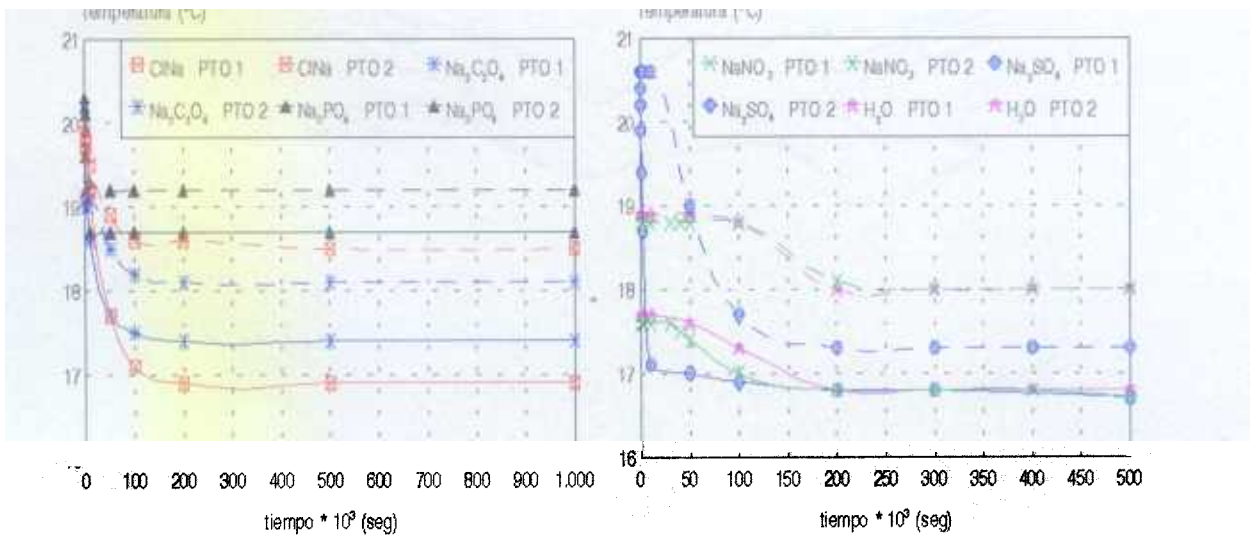


Figura III.122 Evolución de la temperatura en procesos de capilaridad en mortero de reparación I

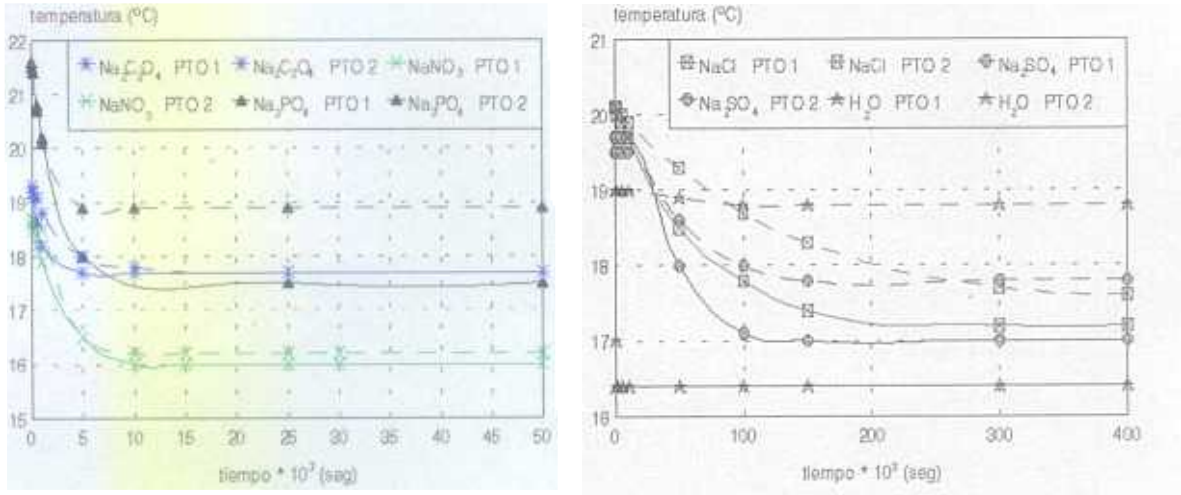


Figura III.123 Evolución de la temperatura en procesos de capilaridad en mortero de reparación II

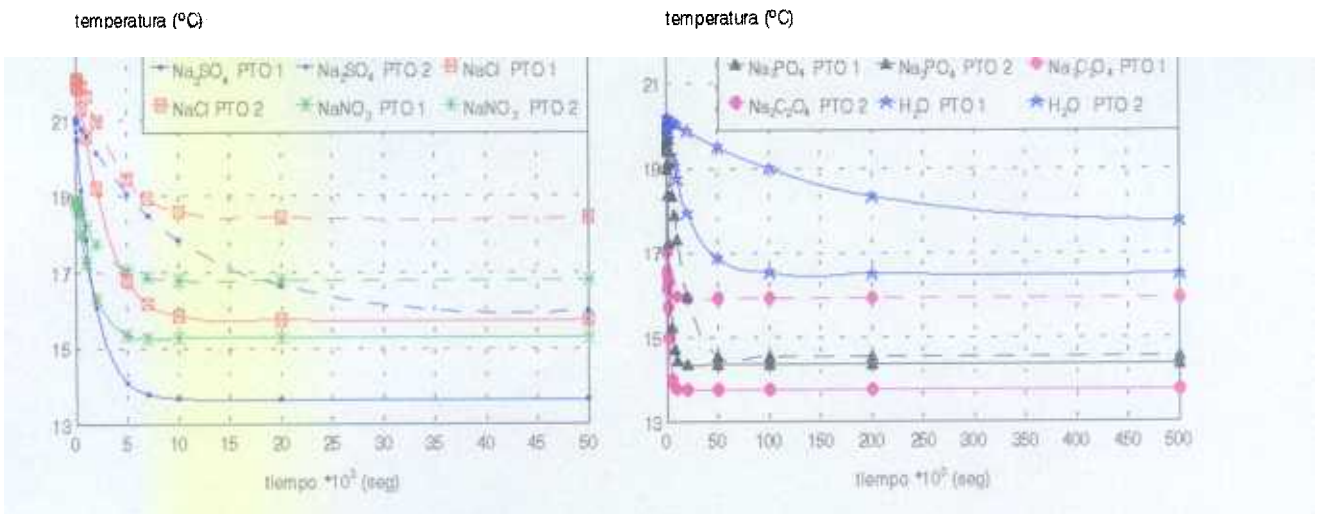


Figura III.124 Evolución de la temperatura en procesos de capilaridad en mortero de reparación III

| | A (°C) | B (seg) | C (°C) | D (seg) | T ₀ (°C) | r ² |
|---|---------|---------|--------|---------|---------------------|----------------|
| NaCl | -200.89 | 1885.43 | 206.79 | 1929.37 | 15.16 | .9988 |
| NaNO ₃ | -7.15 | 1665.36 | 10.41 | 2117 | 16.94 | .9999 |
| Na ₂ C ₂ O ₄ | -.98 | 869.21 | 5.96 | 4354.56 | 14.71 | .9998 |
| Na ₃ PO ₄ | -7.98 | 991.70 | 12.39 | 1424.81 | 15.18 | .9992 |
| Na ₂ SO ₄ | -2.36 | 1205.74 | 4.99 | 3626.70 | 16.37 | .9999 |

Tabla III.34 Resultados obtenidos en los ensayos realizados con caliza. Punto 1

| | A (°C) | B (seg) | C (°C) | D (seg) | T ₀ (°C) | r ² |
|---|--------|---------|--------|---------|---------------------|----------------|
| NaCl | -25.48 | 2110.75 | 30.16 | 2375.60 | 16.32 | .9986 |
| NaNO ₃ | -2.01 | 2205.79 | 0.09 | 4235.94 | 17.22 | .9999 |
| Na ₂ C ₂ O ₄ | -3.13 | 2007.54 | 6.77 | 3859.88 | 15.85 | .9999 |
| Na ₃ PO ₄ | -54.22 | 953.21 | 57.42 | 1015.05 | 16.48 | .9998 |
| Na ₂ SO ₄ | -47.19 | 4568.92 | 48.82 | 4776.61 | 17.34 | .9977 |

Tabla III.35 Resultados obtenidos en los ensayos realizados con caliza. Punto 2

| | A (°C) | B (seg) | C (°C) | D (seg) | T ₀ (°C) | r ² |
|---|--------|----------|---------|----------|---------------------|----------------|
| NaCl | 61.79 | 17650.70 | -56.11 | 17650.80 | 14.80 | .9997 |
| NaNO ₃ | 38.29 | 511.47 | -34.90 | 511.42 | 15.32 | .9992 |
| Na ₂ C ₂ O ₄ | 37.78 | 6767.97 | -35.58 | 3865.41 | 17.30 | .9999 |
| Na ₃ PO ₄ | 389.88 | 8865.95 | -387.10 | 8903.48 | 17.06 | .9917 |
| Na ₂ SO ₄ | 48.09 | 3489.92 | -44.79 | 2382.31 | 15.50 | .9999 |

Tabla III.36 Resultados obtenidos en los ensayos realizados con granito. Punto 1

| | A (°C) | B (seg) | C (°C) | D (seg) | T ₀ (°C) | r ² |
|---|---------|---------|--------|---------|---------------------|----------------|
| NaCl | -307.13 | 637.68 | 311.18 | 645.35 | 15.93 | .9995 |
| NaNO ₃ | -123.31 | 1340.21 | 129.55 | 1378.06 | 15.34 | .9996 |
| Na ₂ C ₂ O ₄ | -302.54 | 557.28 | 306.31 | 563.41 | 12.09 | .9990 |
| Na ₃ PO ₄ | -344.16 | 1251.70 | 349.81 | 1268.53 | 13.81 | .9996 |
| Na ₂ SO ₄ | -180.58 | 3128.35 | 184.36 | 3142.71 | 15.22 | .9999 |

Tabla III.37 Resultados obtenidos en los ensayos realizados con mortero de cal. Punto 1

| | A (°C) | B (seg) | C (°C) | D (seg) | T ₀ (°C) | r ² |
|---|---------|---------|--------|---------|---------------------|----------------|
| NaCl | -805.13 | 845.72 | 809.08 | 851.45 | 15.93 | .9986 |
| NaNO ₃ | -461.45 | 2307.74 | 467.41 | 2344.81 | 15.69 | .9978 |
| Na ₂ C ₂ O ₄ | -533.20 | 776.78 | 535.31 | 781.39 | 14.00 | .9909 |
| Na ₃ PO ₄ | -609.85 | 2736.97 | 616.70 | 2766.29 | 12.66 | .9989 |
| Na ₂ SO ₄ | -356.12 | 2902.19 | 361.82 | 2954.92 | 14.83 | .9982 |

Tabla III.38 Resultados obtenidos en los ensayos realizados mortero de cal. Punto 2

| | A (°C) | B (seg) | C (°C) | D (seg) | T ₀ (°C) | r ² |
|---|--------|--------------------|--------|---------|---------------------|----------------|
| NaCl | -7.79 | 4127.05 | 9.96 | 4127.13 | 17.52 | .9981 |
| NaNO ₃ | -56.61 | 5397.72 | 59.89 | 5492.42 | 15.50 | .9999 |
| Na ₂ C ₂ O ₄ | .003 | -5 10 ⁷ | 1.70 | 841.14 | 17.50 | .9999 |
| Na ₃ PO ₄ | -12.53 | 2725.51 | 14.93 | 2618.27 | 18.10 | .9999 |
| Na ₂ SO ₄ | -0.19 | 420.15 | 3.87 | 9260.10 | 16.31 | .9999 |

Tabla III.39 Resultados obtenidos en los ensayos realizados con mortero de cemento. Punto 1

| | A (°C) | B (seg) | C (°C) | D (seg) | T ₀ (°C) | r ² |
|---|---------|----------|--------|--------------------|---------------------|----------------|
| NaCl | -107.83 | 22696.70 | 110.06 | 23247.20 | 17.36 | .9987 |
| NaNO ₃ | -95.59 | 12239.20 | 98.47 | 12501.10 | 15.90 | .9999 |
| Na ₂ C ₂ O ₄ | 1.50 | 893.42 | 0.10 | 3 10 ¹⁹ | 17.60 | .9999 |
| Na ₃ PO ₄ | -13.08 | 1361.06 | 14.68 | 1343.02 | 18.9 | .9999 |
| Na ₂ SO ₄ | -1.74 | 11070.70 | 3.90 | 30555.60 | 17.83 | .9990 |

Tabla III.40 Resultados obtenidos en los ensayos realizados con mortero de cemento. Punto 2

| | A (°C) | B (seg) | C (°C) | D (seg) | T ₀ (°C) | r ² |
|---|--------|---------------------|--------|-----------|---------------------|----------------|
| NaCl | -0.09 | -7 10 ²³ | 3.04 | 39267.90 | 16.87 | .9979 |
| NaNO ₃ | 1.29 | 22.21 | 1.51 | 3978.49 | 15.80 | .9999 |
| Na ₂ C ₂ O ₄ | -6.37 | 26436.70 | 8.05 | 26436.70 | 17.43 | .9996 |
| Na ₃ PO ₄ | .41 | 10 ²⁶ | 1.60 | 1588.68 | 18.71 | .9999 |
| Na ₂ SO ₄ | 3.50 | 2645.64 | 0.51 | 278548.00 | 16.61 | .9986 |

Tabla III.41 Resultados obtenidos en los ensayos realizados con mortero de reparación I. Punto 1

| | A (°C) | B (seg) | C (°C) | D (seg) | T ₀ (°C) | r ² |
|---|---------|--------------------|--------|-----------|---------------------|----------------|
| NaCl | 0.20 | 6 10 ²² | 2.89 | 273636.70 | 17.06 | .9921 |
| NaNO ₃ | -43.40 | 4540.29 | 46.03 | 4439.87 | 15.99 | .9996 |
| Na ₂ C ₂ O ₄ | 1.06 | 865.64 | — | — | 17.70 | .9999 |
| Na ₃ PO ₄ | -66.26 | 3079.95 | 70.35 | 3032.01 | 17.50 | .9999 |
| Na ₂ SO ₄ | -229.63 | 19037.50 | 232.08 | 19386.90 | 16.98 | .9987 |

Tabla III.42 Resultados obtenidos en los ensayos realizados con mortero de reparación II. Punto 1

| | A (°C) | B (seg) | C (°C) | D (seg) | T ₀ (°C) | r ² |
|---|---------|---------------------|--------|---------|---------------------|----------------|
| NaCl | -104.74 | 1760.68 | 110.98 | 1825.04 | 15.75 | .9997 |
| NaNO ₃ | -168.19 | 2548.76 | 171.72 | 2521.22 | 15.37 | .9999 |
| Na ₂ C ₂ O ₄ | -195.85 | 1366.28 | 198.68 | 1378.04 | 13.76 | .9998 |
| Na ₃ PO ₄ | -5.41 | 1415.87 | 10.66 | 2151.54 | 14.36 | .9999 |
| Na ₂ SO ₄ | -.01 | -3 10 ²² | 7.31 | 1827.77 | 13.66 | .9964 |

Tabla III.43 Resultados obtenidos en los ensayos realizados con mortero de reparación III. Punto 1

| | A (°C) | B (seg) | C (°C) | D (seg) | T ₀ (°C) | r ² |
|---|---------|------------------|--------|----------|---------------------|----------------|
| NaCl | -575.64 | 1678.31 | 579.26 | 1689.51 | 18.43 | .9906 |
| NaNO ₃ | -209.56 | 3605.12 | 211.65 | 3590.71 | 16.82 | .9994 |
| Na ₂ C ₂ O ₄ | -22.65 | 1638.88 | 19.79 | 1903.46 | 15.93 | .9982 |
| Na ₃ PO ₄ | -65.58 | 22371.40 | 70.95 | 21860.80 | 14.36 | .9988 |
| Na ₂ SO ₄ | -0.02 | 10 ¹⁸ | 5.10 | 10240.10 | 15.96 | .9918 |

Tabla III.44 Resultados obtenidos en los ensayos realizados con mortero de reparación III. Punto 2

En las figuras correspondientes a procesos de capilaridad y evaporación con disoluciones salinas se observa cómo la presencia de cualquier sal modifica los procesos de respecto al caso del agua pura. En el caso de medidas "in-situ" esta variación será aún más significativa ya que, en general, no existirá una única sal disuelta sino que el agua contenida en el material incluirá, generalmente, iones de muy diversa procedencia: arrastrados por el propio agua, disueltos por ella (procedentes del material que se estudia), etc. Como más adelante se explicará, las modificaciones en el comportamiento obtenido dependen tanto de las características de la disolución (temperatura, concentración, solubilidad, etc) como de la naturaleza del propio material (capacidad para ser disuelto por la disolución, capacidad para reaccionar, etc). Las curvas presentadas se utilizarán como patrón de comportamiento de los materiales estudiados cuando se someten a procesos en los que no interviene el agua pura.

III.3.- Aplicación de la Termografía Infrarroja a la detección de humedades en Monumentos

El objetivo final en el desarrollo del presente trabajo de tesis consiste en la aplicación de la Termografía Infrarroja al estudio de humedades en Monumentos del Patrimonio. En los experimentos presentados hasta este momento, se pueden establecer dos grupos claramente diferenciados si se considera la forma en la que se estimó la necesidad de realizarlos. Una parte de ellos se juzgó necesaria desde que se establecieron las líneas generales del presente trabajo. En este grupo se puede incluir la casi totalidad de los resultados relacionados con los materiales que se han presentado en el apartado III.2 y algunos de los ensayos referentes a la técnica (presentados en el apartado III.1) como la puesta a punto del equipo de Termografía ó la evaluación de los factores que pueden perturbar las medidas termográficas.

Por otra parte, otra porción importante del trabajo surgió a partir de las necesidades que se observaban a medida que la técnica se aplicaba en Monumentos. En este grupo de experimentos, se incluyen la llamada Termografía Infrarroja Selectiva y el uso de fuentes controladas de radiación externa. En ambos casos, se trata esencialmente de desarrollar modificaciones relacionadas con la propia técnica de trabajo, aunque los ensayos previos destinados a caracterizar la técnica y a determinar su validez se realizaran en el laboratorio.

En el presente apartado se presentan las medidas realizadas directamente en edificios.

III.3.1.- Termografía Infrarroja Clásica

El objeto fundamental de todos los ensayos presentados a continuación era el estudio del movimiento de agua en los distintos Monumentos presentados. Lo primero a investigar, en todos los casos, en saber si realmente el material estaba mojado. Una vez solventado esto, era necesario conocer el origen del agua y el tipo de movimiento para solventar el problema.

III.3.1.a.- Medidas realizadas en la Catedral de Toledo

*** El Claustro**

En la figura III.125 se muestra la zona que se estudió en el Claustro de la Catedral de Toledo. En ella se pueden observar manchas que se podrían atribuir inicialmente a un proceso de succión capilar.

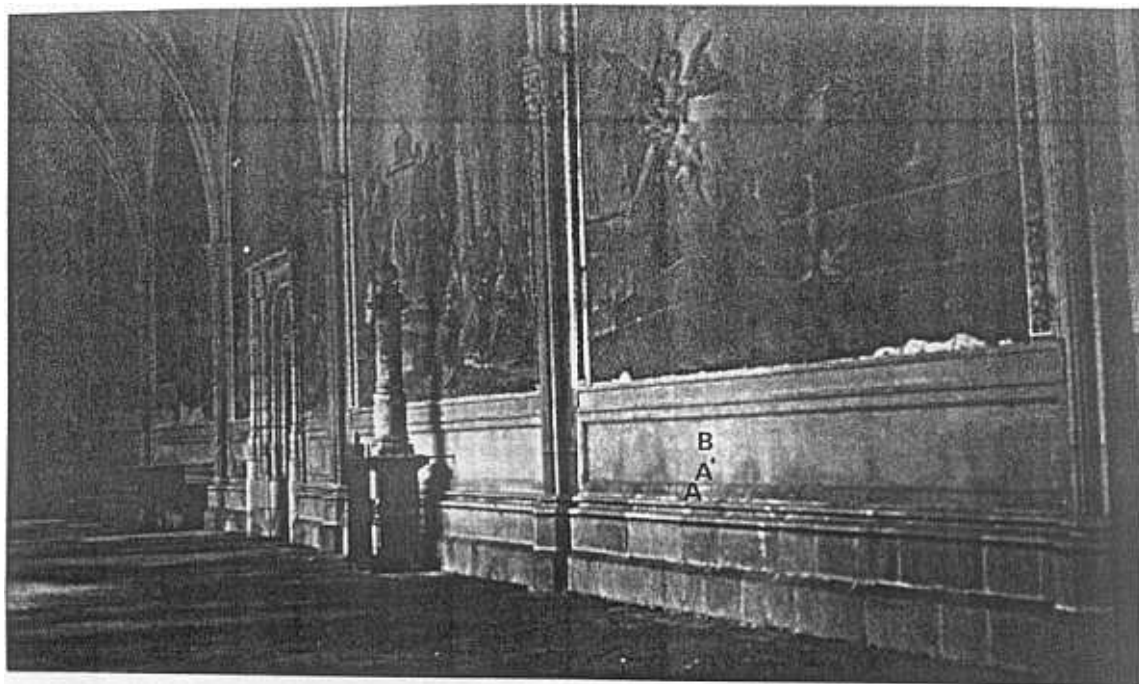


Figura III.125 Zona del Claustro de la Catedral de Toledo estudiado mediante Termografía Infrarroja. Observar las partes húmedas en la parte inferior de los frescos

En la figura III.126 se presenta un termograma correspondiente a la zona estudiada (que corresponde con los frescos de la parte derecha del Claustro). En él se han marcado tres puntos denominados A, A' y B que corresponden con las zonas en las que se realizaron las medidas cuantitativas. Como referencia de emisividad se usó cinta aislante negra de emisividad conocida y colocada en contacto térmico con el material ya que se trataba de un granito pulido y no demasiado mojado que permitía un buen contacto con la referencia.

Los resultados obtenidos en cada punto se presentan en la tabla III.45. Estos datos se obtuvieron con una temperatura ambiente de 18 °C y una humedad relativa del 38.4%.

Los resultados presentados en la figura III.126, podrían sugerir que se trata de un problema de succión capilar ya que las isotermas se aproximan más a las correspondientes a la zona seca a medida que aumenta la altura del punto en el que se mide. Los resultados mostrados en la tabla III.45 ponen de manifiesto el mismo carácter. El punto A (que corresponde con la menor altura de la superficie) presenta la mínima temperatura y la máxima emisividad. En el punto A' existe todavía una temperatura menor que la de la zona seca (representada por el punto B) pero no existe variación de emisividad. Esto significa que en la zona representada por el punto A existe realmente agua, mientras que en la zona con isotermas como la correspondiente al punto A' sólo hay un enfriamiento debido a la evaporación que se produce en A.

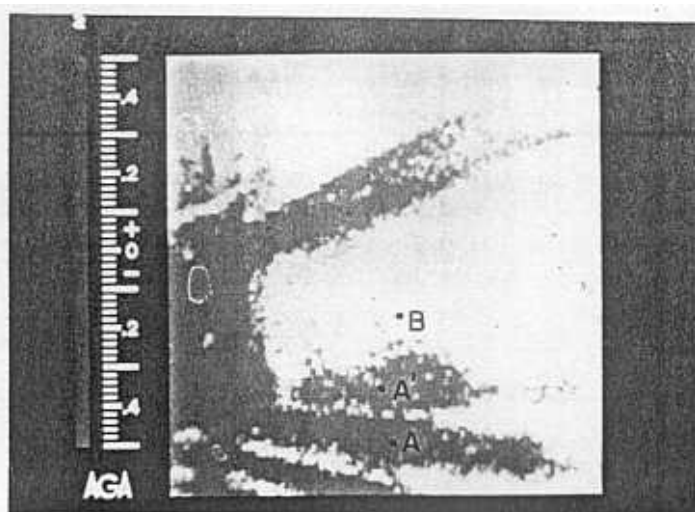


Figura III.126 Termograma correspondiente al Claustro de la Catedral de Toledo

| | PUNTO A | PUNTO A' | PUNTO B |
|------------|---------|----------|---------|
| T_s (°C) | 9.4 | 9.9 | 10.3 |
| ϵ | 0.76 | 0.70 | 0.70 |

Tabla III.45 Resultados obtenidos en el Claustro de la Catedral de Toledo

*** La Capilla Mozárabe**

Los siguientes estudios realizados en la Catedral de Toledo estaban dirigidos al análisis de la Capilla Mozárabe. Aparentemente se trataba de una zona con grandes daños producidos por la humedad como se puede observar en la figura III.127.

Inicialmente, se realizó un barrido de todos los muros de la Capilla. A pesar del aparente deterioro mostrado en la figura III.127, sólo se encontró una zona en la que se detectaban variaciones en las isotermas mediante Termografía en la zona mostrada en la figura III.128. En la figura III.129 se presenta el termograma correspondiente a la misma zona.

En la tabla III.46 se muestran los datos ambientales tanto del exterior como del interior de la Capilla el día que se realizó la toma de datos

En esta zona no se realizaron medidas cuantitativas debido a su difícil accesibilidad. Por otra parte, se trataba de una mancha de forma muy localizada situada a una altura en

torno a los 6 m (aproximadamente, sobre el escudo azul que aparece en la figura III.128). Por lo tanto, si realmente se trataba de un defecto producido por la humedad sería debido a una penetración de agua desde el exterior.

| | |
|--------------------------------------|------|
| <i>Temperatura exterior (°C)</i> | 12.2 |
| <i>Humedad relativa exterior (%)</i> | 64.0 |
| <i>Temperatura interior (°C)</i> | 11.5 |
| <i>Humedad relativa interior (%)</i> | 42.3 |

Tabla III.46 Datos ambientales durante el estudio termográfico en la Capilla Mozárabe

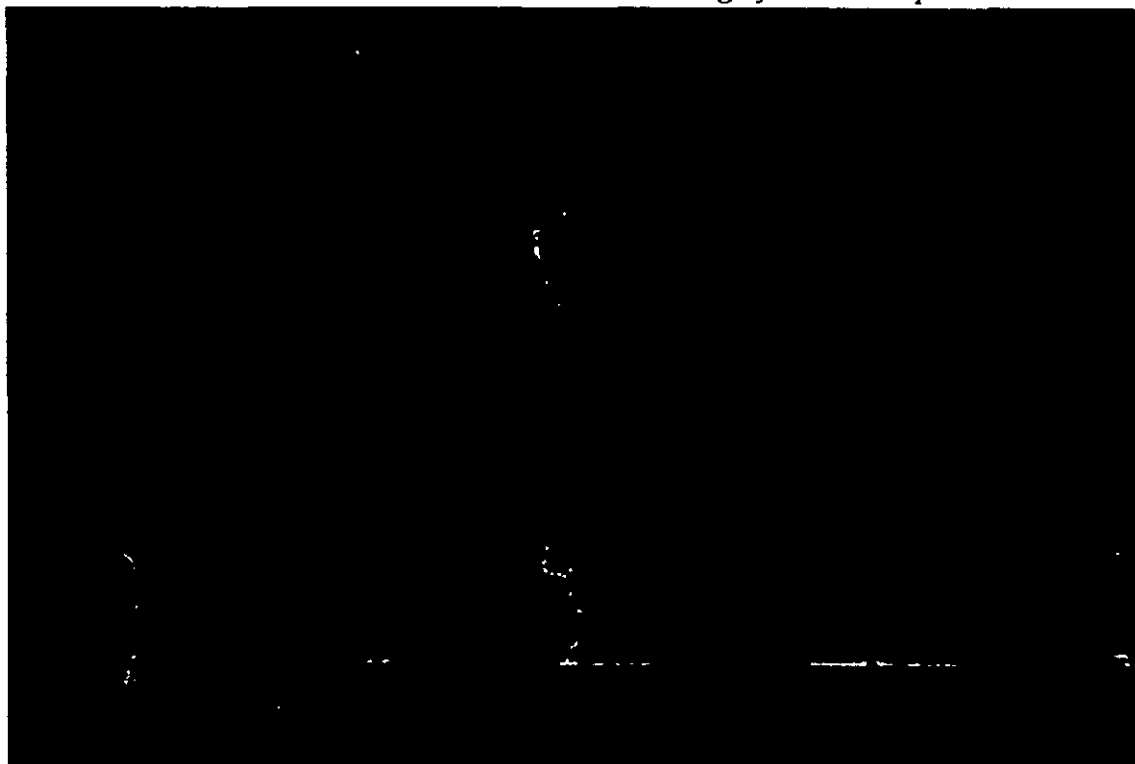


Figura III.127 Zona de aparentes desperfectos en uno de los muros de la Capilla Mozárabe en la Catedral de Toledo.

Las medidas realizadas en días posteriores para estudiar la evolución sufrida por humedad no mostraron variaciones de radiación en la zona.

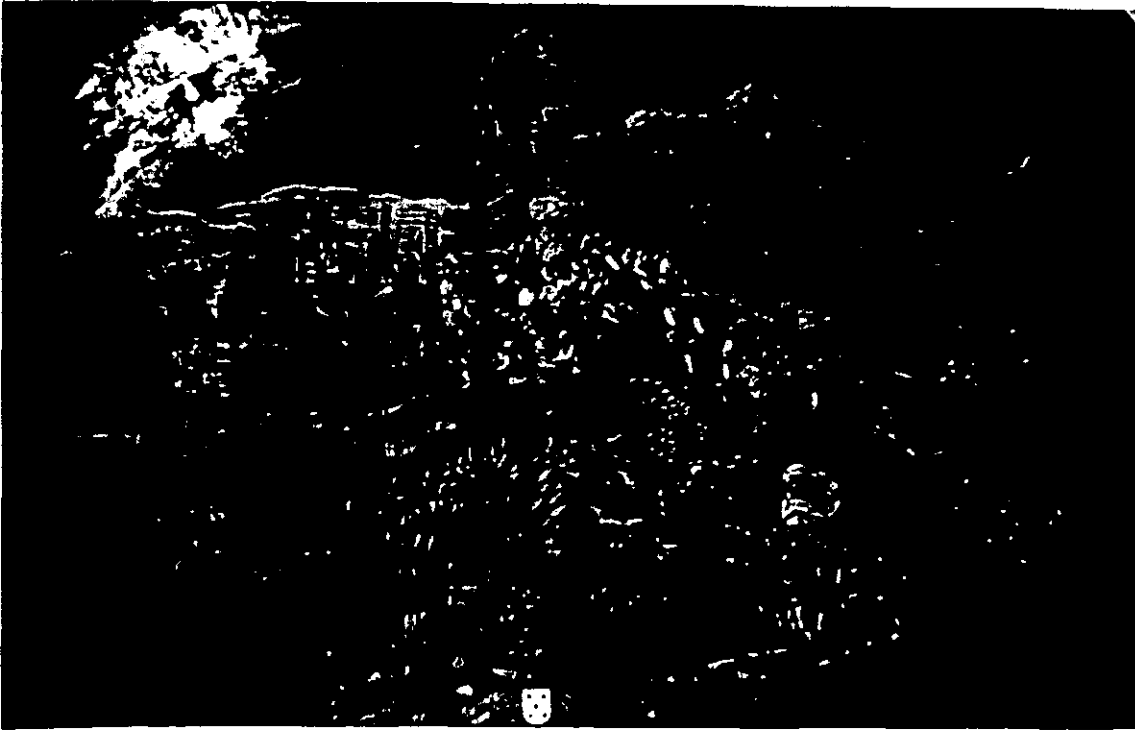


Figura III.128 Zona de la Capilla Mozárabe donde se detectaron posibles deterioros



Figura III.129 Termograma correspondiente a los frescos de la Capilla Mozárabe

III.3.1.b.- Medidas realizadas en las dependencias del IETCC

Las medidas presentadas a continuación corresponden a una zona dañada por la rotura de una cañería en el IETCC. En este caso, se conocía el origen del agua. Las medidas se realizaron con objeto de evaluar la capacidad de detección de la técnica. A continuación se presentan varios ejemplos que ilustran distintas conclusiones obtenidas a partir de estas medidas.

En la figura III.130 se muestra la zona en la que se realizó el estudio; en la III.131, las zonas dañadas por la humedad

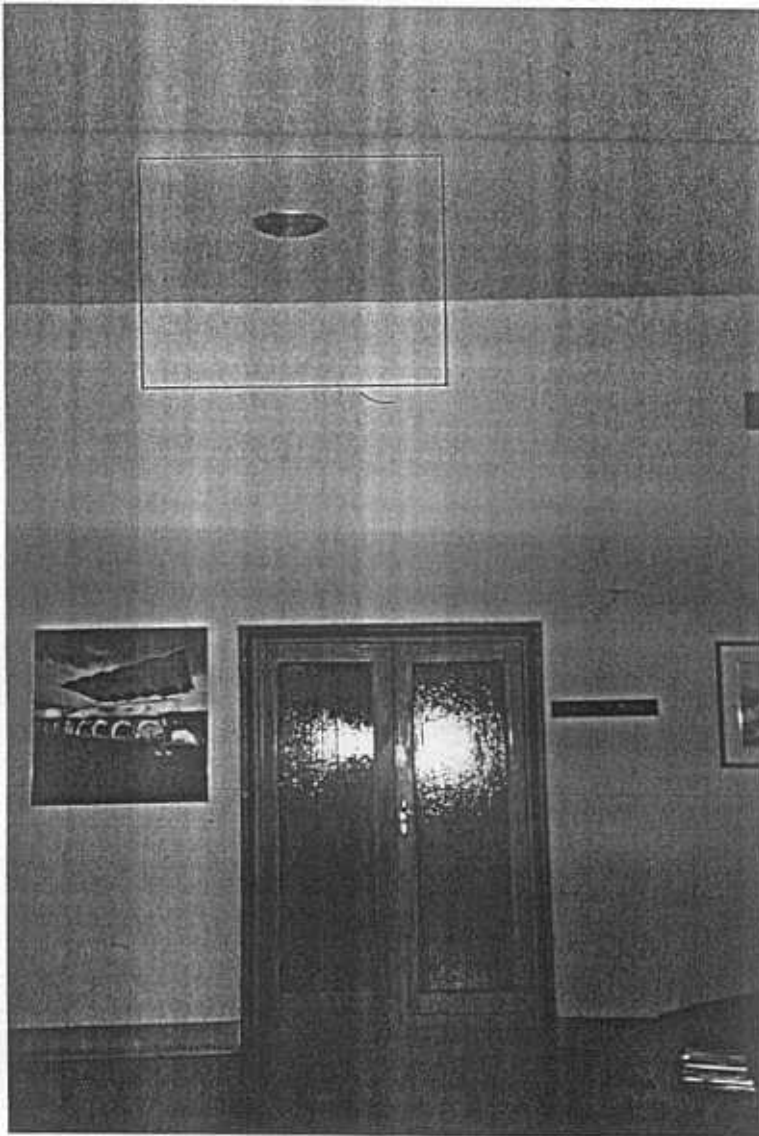


Figura III.130 Zona en la que se realizó el estudio termográfico. La zona marcada corresponde a la zona en que los daños eran observables

En la tabla III.47 se presentan las características atmosféricas durante la realización de los ensayos.

| | |
|----------------------------------|-------------|
| <i>Temperatura ambiente (°C)</i> | <i>23.0</i> |
| <i>Humedad relativa (%)</i> | <i>24.0</i> |

Tabla III.47 Datos atmosféricos en el IETCC durante la realización del estudio termográfico

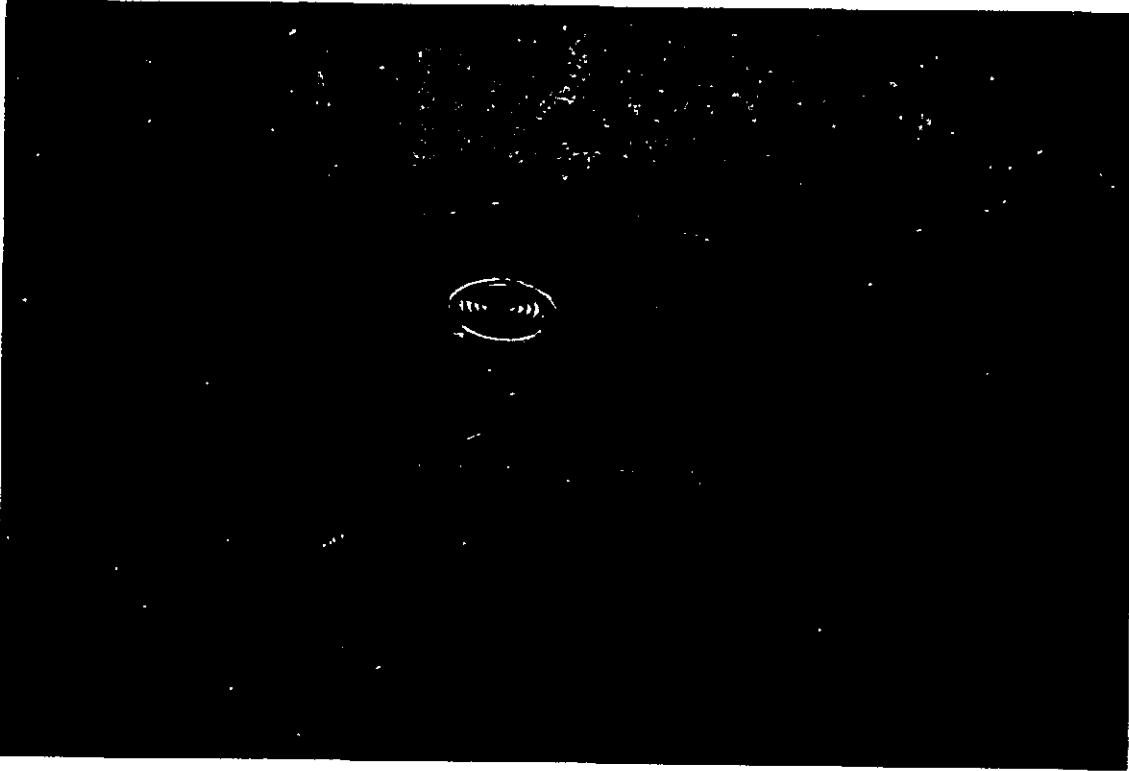


Figura III.131 Zona dañada por la humedad en el IET

*** Un ejemplo de atenuación atmosférica**

Las medidas que se presentan a continuación ponen de manifiesto la atenuación de la señal emitida por la superficie cuando la distancia entre cámara y objeto es demasiado grande.

Las medidas se realizaron en la zona mostrada en la figura III.131 colocando la cámara a 7 y 10 m respectivamente de ella. Las figuras III.132 y III.133 muestran los termogramas correspondientes a cada una de las zonas.

Se realizaron medidas cuantitativas. Se tomó como referencia cinta aislante negra de emisividad conocida. Los resultados obtenidos en cada zona se muestran en la tabla III.48 Cada una de las zonas (numeradas como 1, 2, 3, 4 y 5) corresponden a las mostradas en los termogramas anteriores.

En los resultados anteriores se observan variaciones importantes, sobre todo en la temperatura superficial, cuando varía la distancia cámara/objeto (y ésta es suficientemente grande). Sin embargo, el gradiente de variación de las medidas se mantiene en ambos casos.

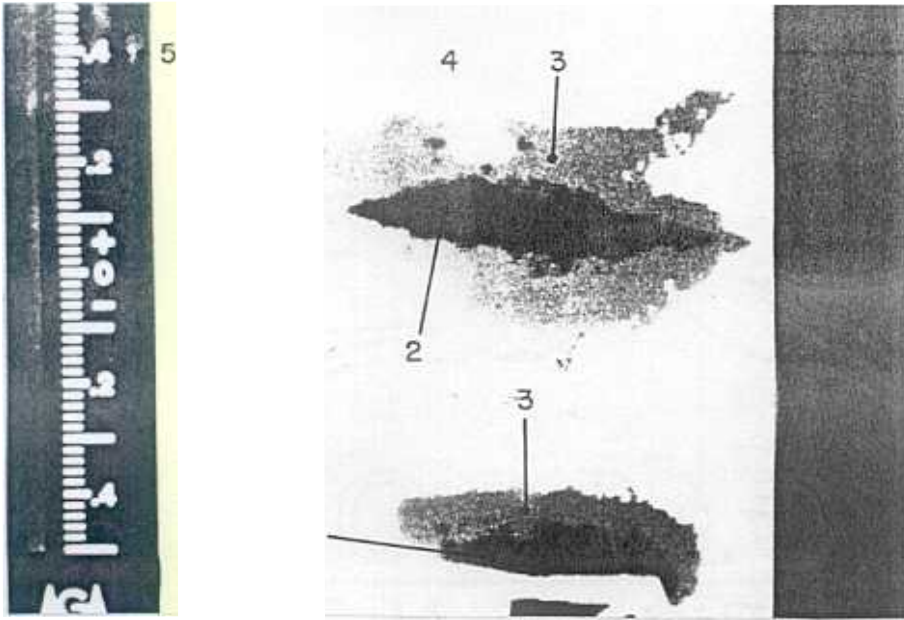


Figura III.132 Termogramas en modo normal y escala de grises tomados a una distancia de 7 m

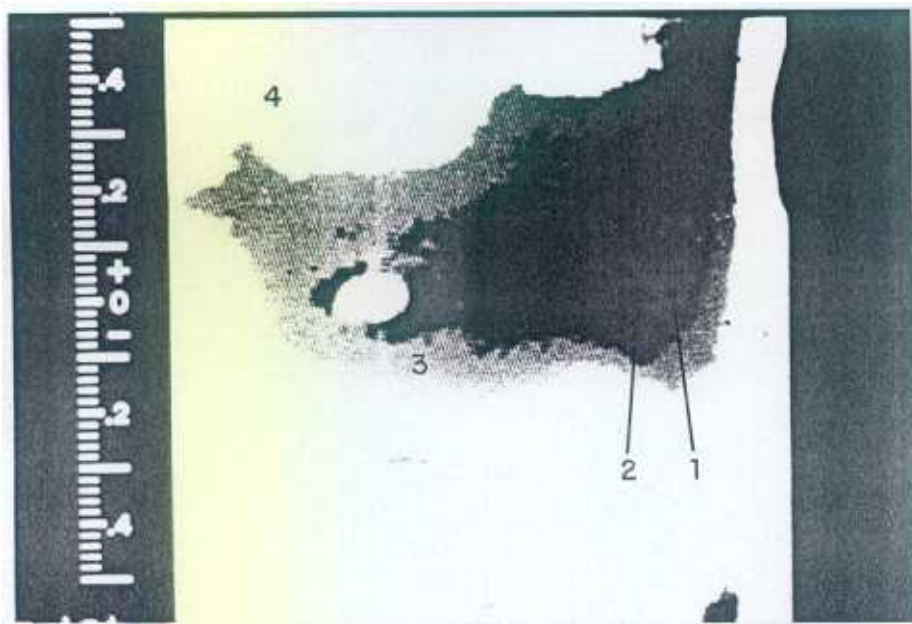


Figura III.133 Termogramas en modo normal y escala de grises de la misma zona a una distancia de 10 m

Esto significa que cuando la distancia entre cámara y objeto es muy grande, la evolución obtenida para las temperaturas (tanto en superficie como a lo largo del tiempo) es válida si se mantiene constante la distancia entre cámara y objeto, pero no lo es el valor puntual de temperatura obtenido en cada caso.

| | ZONA 1 | ZONA 2 | ZONA 3 | ZONA 4 | ZONA 5 |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| T_s (°C) (d = 7 m) | 13.8 | 15.5 | 15.4 | 16.0 | --- |
| T_s (°C) (d = 10 m) | 12.9 | 13.4 | 13.8 | 15.2 | 15.6 |
| ϵ (d = 7 m) | 0.74 | 0.74 | 0.74 | 0.70 | 0.70 |
| ϵ (d = 10 m) | 0.74 | 0.74 | 0.72 | 0.70 | --- |

Tabla III.48 Resultados obtenidos mediante Termografía Infrarroja

III.3.2.- Termografía Infrarroja Selectiva

III.3.2.a.- Medidas en la iglesia de Vilar de Donas en Lugo

En algunos casos, cuando las condiciones ambientales eran muy extremas, el uso de la Termografía Infrarroja resultaba insuficiente para la detección de humedades. Este es el caso de las medidas realizadas en la iglesia de Vilar de Donas en la provincia de Lugo.

Las condiciones ambientales tanto en el interior como en el exterior de dicha iglesia se presentan en la tabla III.49.

En las figuras III.134 y III.135, se muestra el interior de la iglesia estudiada y la zona donde se realizaron las medidas termográficas. Según se muestra en la tabla anterior, se trataba de una zona de altos contenidos de humedad y bajas temperaturas ambientales. En estas condiciones, la señal procedente de la superficie del muro que se deseaba estudiar sufría una atenuación muy importante, de tal forma que prácticamente no se recibía señal en la termocámara.

| | |
|-------------------------------|------|
| Temperatura exterior (°C) | 12.5 |
| Humedad relativa exterior (%) | 70.0 |
| Temperatura interior (°C) | 11.5 |
| Humedad relativa interior (%) | 80.0 |

Tabla III.49 Datos ambientales en la iglesia de Vilar de Donas de Lugo

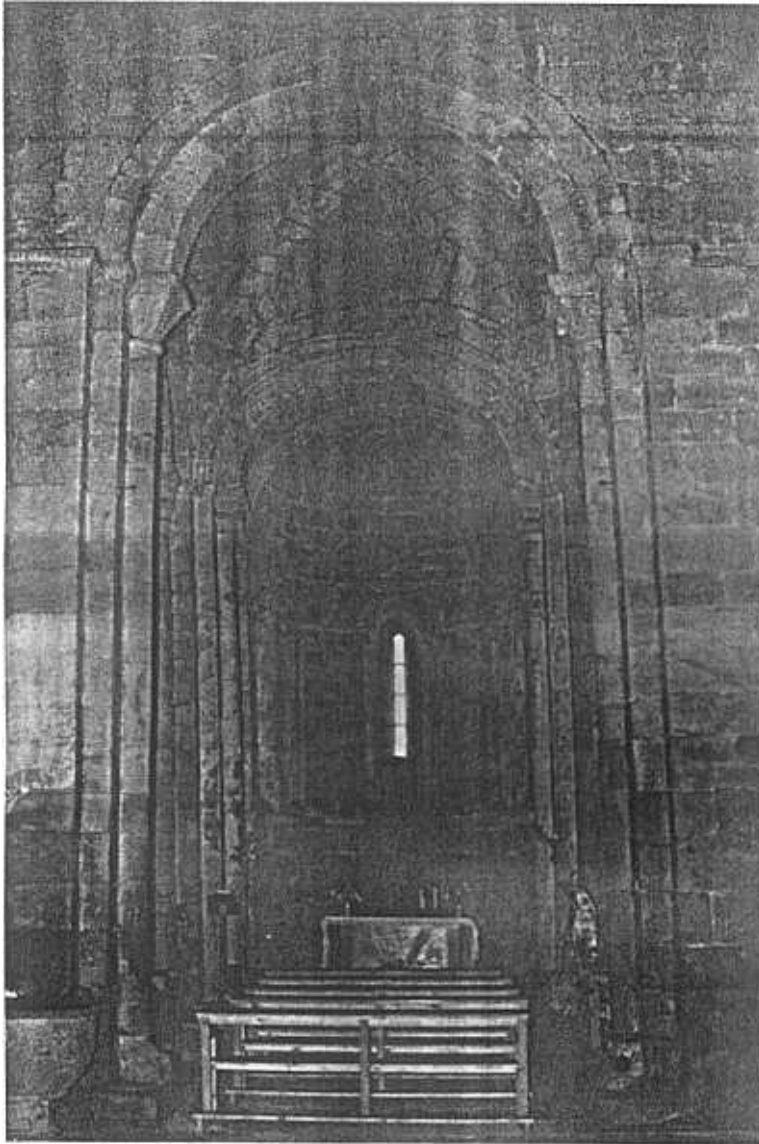


Figura III.134 Interior de la iglesia de Vilar de Donas. La zona donde se realizaron las medidas termográficas es la marcada en la fotografía

En tales condiciones, el uso de filtros interferenciales resultó de gran utilidad, permitiendo la detección de áreas de humedad imposibles de localizar mediante termografía convencional. Los termogramas correspondientes al estudio realizado se muestran en las figuras III .136 y III.137.

Los ensayos se realizaron en el pie de una de las columnas de granito (mostrada en la figura III.135). Las medidas realizadas mediante Termografía Infrarroja clásica no aportaron ningún dato sobre el estado del material. Aparentemente, según los resultados obtenidos mediante esta técnica, no había humedad en las paredes: Se obtenían zonas totalmente homogéneas, sin ninguna variación en la radiación emitida.



Figura III.135 Zona en la que realizaron las medidas termográficas en la iglesia de Vilar de Donas en Lugo

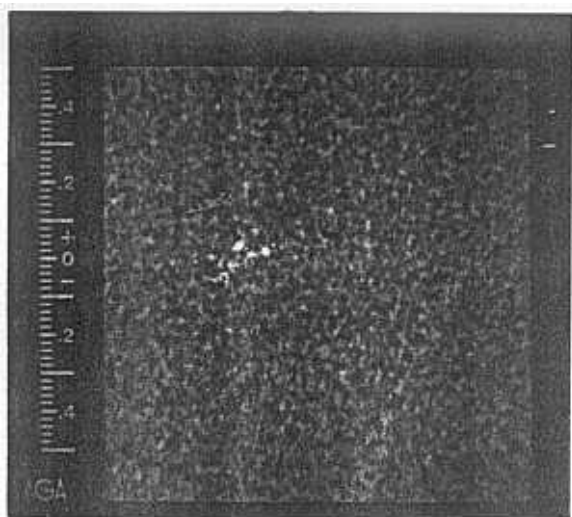


Figura III.136 Termograma tomado usando el filtro de agua.

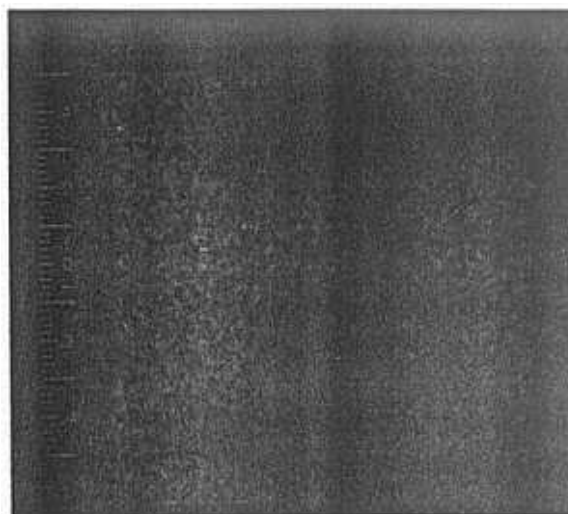


Figura III.137 Termograma de la misma zona anterior tomado usando el filtro de CO₂

Sin embargo, los termogramas tomados usando filtros interferenciales mostrados en las figuras III.136 y III.137, muestran la existencia de zonas húmedas en el material. En la figura III.136, correspondiente al filtro de agua, se observan zonas de distinta radiación, mientras que en la figura III.137, correspondiente a la misma zona pero tomada usando el filtro de CO₂, aparece una única isoterma. Por lo tanto, el filtro de agua detecta la presencia de humedad en el material. Se demuestra con esto la validez de la Termografía Infrarroja

Selectiva para la detección de agua en elementos de edificios en los que hay condiciones atmosféricas muy extremas. En este caso, sólo se realizaron medidas cualitativas ya que el único objetivo que se perseguía era determinar si, realmente, había humedad en los muros de la iglesia.

Finalmente, merece la pena destacar que en el caso de la iglesia de Vilar de Donas en Lugo (figura III.134), no fue posible el uso de fuentes externas, ya que su uso favorecía la emisión de las moléculas de agua presentes en la atmósfera (recordar los altos contenidos de humedad existentes). El aumento de emisión registrado en este caso, se podía haber debido a la emisión del agua atmosférica, no a la existente en el material. Esto se puso de manifiesto cuando se observó cómo la señal recogida era mayor cuanto mayor era la distancia entre cámara y objeto.

III.3.3.- Radiación externa controlada

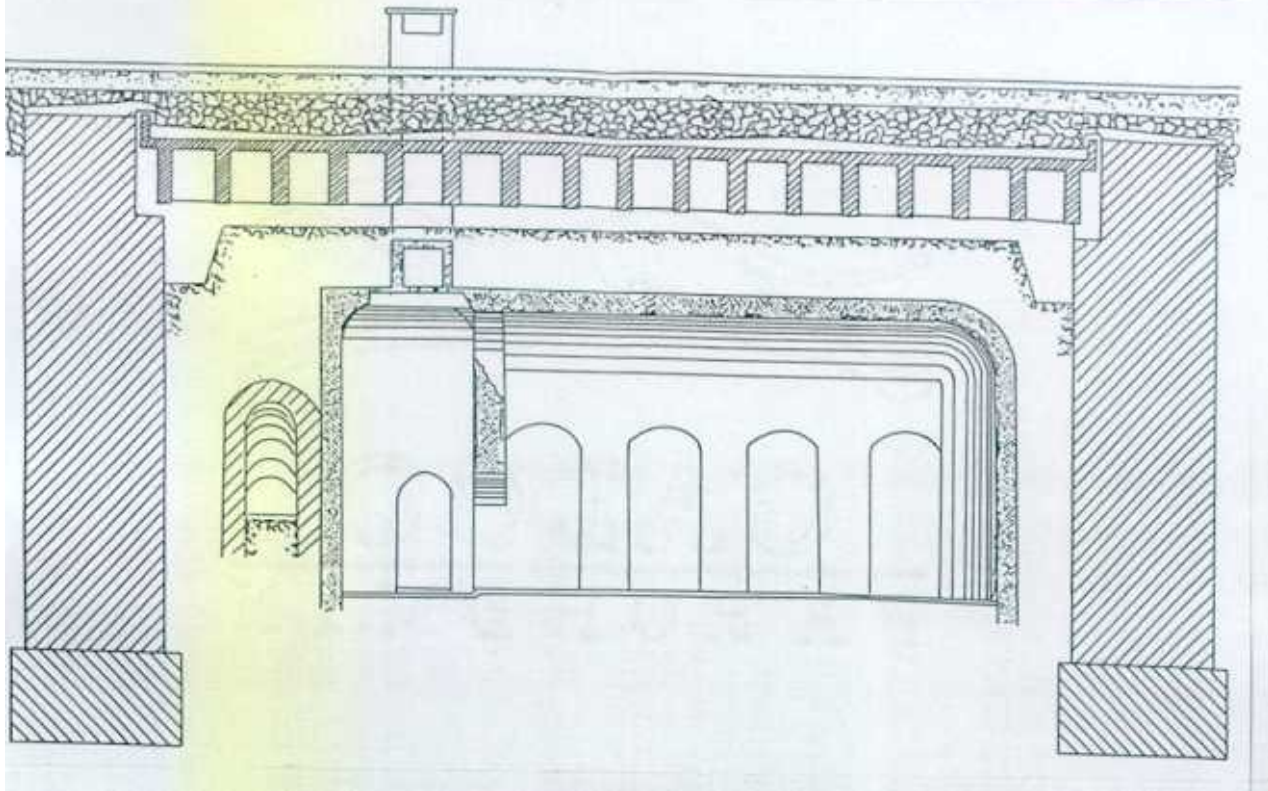
III.3.3.a.- Medidas en la Basilica Pitagorica di Porta Maggiore

Los ensayos que se expondrán a continuación se realizaron en la Basilica di Porta Maggiore en Roma. Se trata de una iglesia subterránea construida sobre un templo pitagorico. En la figura III.138 se muestra el alzado de dicha basilica.

Inicialmente, el trabajo consistía en la localización de posibles entradas a una planta inferior que habrían sido cerradas cuando se construyó la iglesia actual. Para su localización se determinó realizar medidas cualitativas mediante Termografía Infrarroja, usando una fuente externa de radiación infrarroja para calentar las zonas antes de ser estudiadas. De esta forma, considerando las diferencias de conductividad térmica entre el aire y los materiales de construcción la presencia de posibles puertas tapiadas sería fácilmente localizable.

Los estudios se centraron en la zona mostrada en la figura III.139.

Un primer barrido mediante Termografía Infrarroja Clásica (sin usar la lámpara de radiación) no puso de manifiesto la existencia de ninguna anomalía como se muestra en la figura III.140.



0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 m.

Figura III.138 Alzado de la Basilica Pitagorica di Porta Maggiore en Roma



Figura III.139 Zona en la que se centraron las medidas termográficas en la Basilica di Porta Maggiore

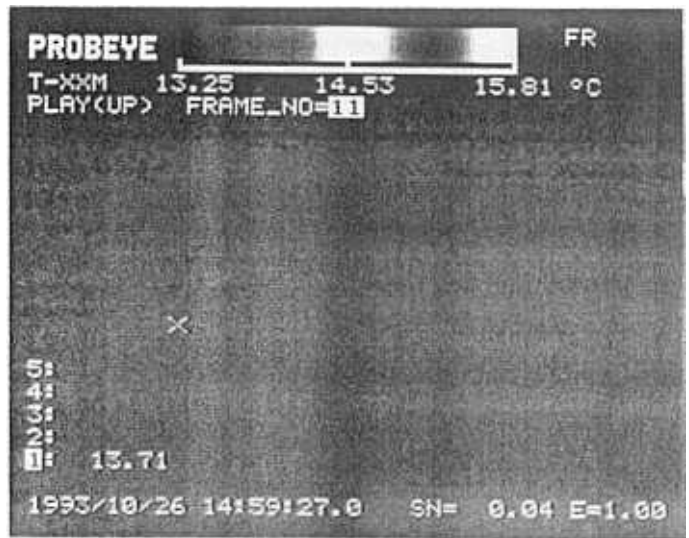


Figura III.140 Termograma tomado en la iglesia de Santa Maria sin usar fuentes externas de radiación

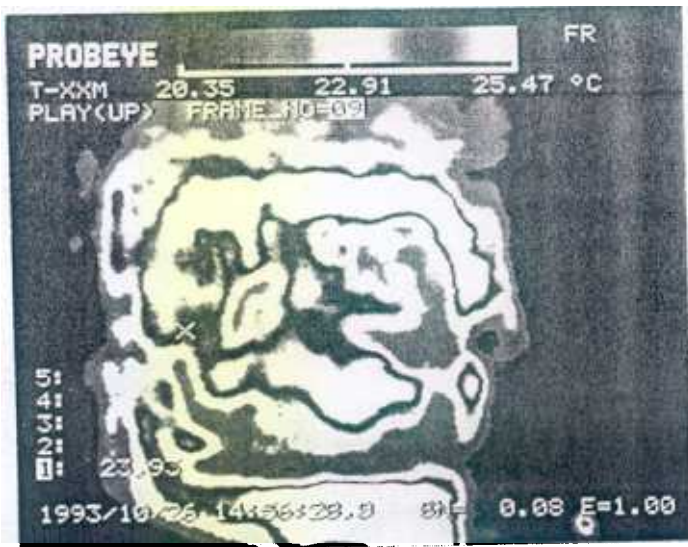


Figura III.141 Termograma de la misma zona usando la fuente de radiación externa

En el termograma mostrado en la figura III.141 se pone de manifiesto la existencia de anomalías que no aparecían cuando se trabajaba sin fuente de radiación. Estudio complementarios de estas zonas demostraban la existencia de cavidades debajo del pavimento.

III.3.3.b.- Medidas en Santa Maria Porta Paradisi

Los resultados obtenidos en la Basilica Pitagorica di Porta Maggiore, mostrados en el apartado anterior pusieron de manifiesto la utilidad de las fuentes externas de radiación para la detección de anomalías en edificios

Los siguientes estudios usando fuentes de radiación controlada se realizaron una vez puesta a punto la técnica en el laboratorio, evaluado el tiempo de estabilización de la lámpara, etc. Estos ensayos se realizaron en la Iglesia de Santa Maria Porta Paradisi en Roma. Esta iglesia está situada en la orilla del río Tiber y, por esta razón tiene altos niveles de humedad relativa (~ 70 %). El estudio consistía en determinar si existía humedad en los muros de la iglesia. En la figura III.142 se muestra el exterior de la iglesia estudiada; en la III.144, la zona en la que se realizaron las medidas.

No se obtuvo ningún resultado a partir de las medidas realizadas mediante Termografía Infrarroja clásica. En la figura III.143, se muestra un termograma de la misma zona realizado aplicando una radiación externa.



Figura III.142 Exterior de la iglesia de Santa Maria Porta Paradisi



Figura III.143 Termograma de la zona estudiada tomado usando una fuente de radiación externa.



Figura III.144 Aspecto de la zona donde se desarrollaron las medidas termográficas

A partir del termograma presentado en la figura III.143 fue posible localizar las zonas en las que se habían aplicado tratamientos hidrófugos en los frescos, evaluar su bondad y determinar la presencia de nuevas humedades.

III.3.4.- Uso combinado de las técnicas

III.3.4.a.- Medidas en la Catedral de Burgos

Las últimas medidas realizadas "in-situ" durante esta investigación, se llevaron a cabo combinando todas las técnicas basadas en Termografía Infrarroja previamente descritas. Tales ensayos se realizaron en la Capilla de Santa Tecla en la Catedral de Burgos. En la figura III.145 se presenta un plano de la zona de la Catedral de Burgos. En dicha figura se ha señalado la Capilla en la que se realizaron las medidas.

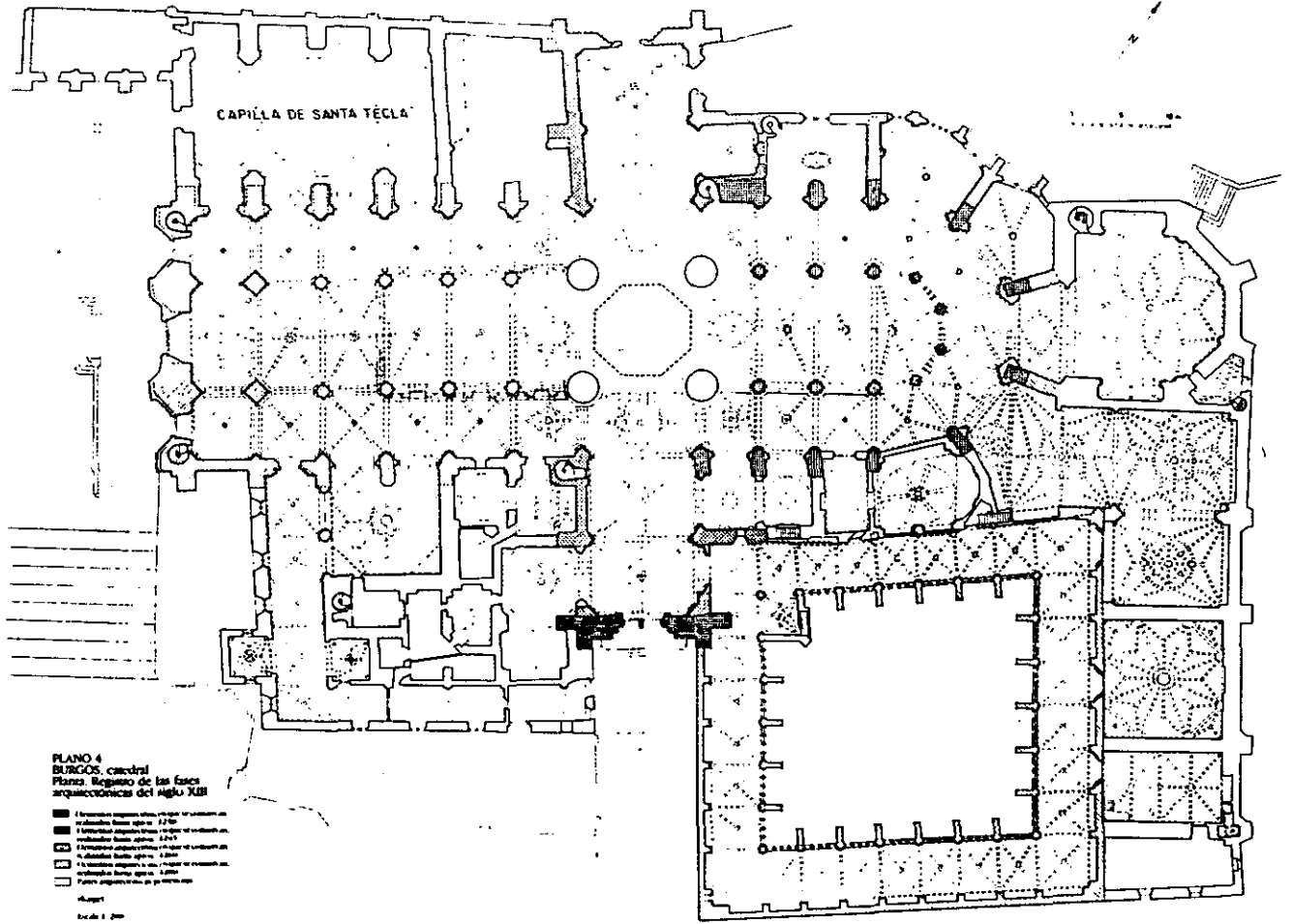


Figura III.145 Plano de la zona de la Catedral de Burgos donde se realizaron las medidas termográficas.

Los ensayos estaban dirigidos a determinar el origen de humedad en la Capilla. Los datos atmosféricos determinados en el momento de la medida se muestran en la tabla III.51

| | |
|-------------------------------|------|
| Temperatura interior (°C) | 20.8 |
| Humedad relativa interior (%) | 59.0 |
| Temperatura exterior (°C) | 29.0 |
| Humedad relativa exterior (%) | 40.0 |

Tabla III.51 Datos ambientales registrados durante las medidas termográficas

Se realizaron medidas termográficas combinando el uso de filtros interferenciales y fuentes externas de radiación. Los resultados obtenidos se muestran en las figuras III.146 a III.149. Mediante estos ensayos, se demostró que se está produciendo un flujo de vapor desde la sala continua a la Capilla estudiada y que no existe humedad en los muros de la misma.

En estos ensayos no fue posible tomar fotografías usando el filtro de agua, ya que en este caso se detectaba una imagen en movimiento del flujo de vapor. El análisis de dicho termograma permitía concluir que se estaba produciendo un flujo de agua desde la sala continua a la capilla estudiada.

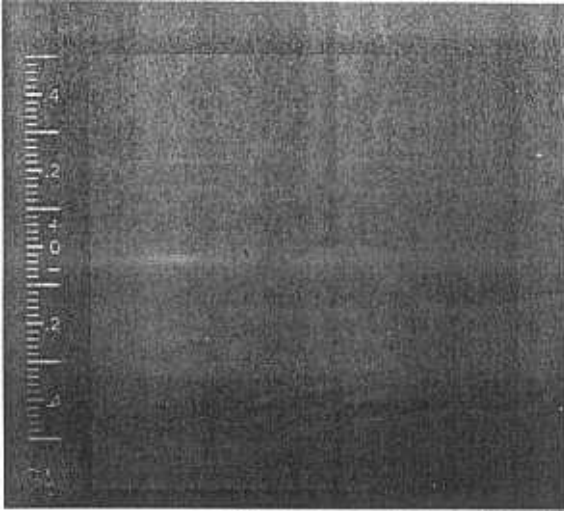


Figura III.146 Termograma tomado sin filtro interferencial y sin fuente de radiación de la zona estudiada

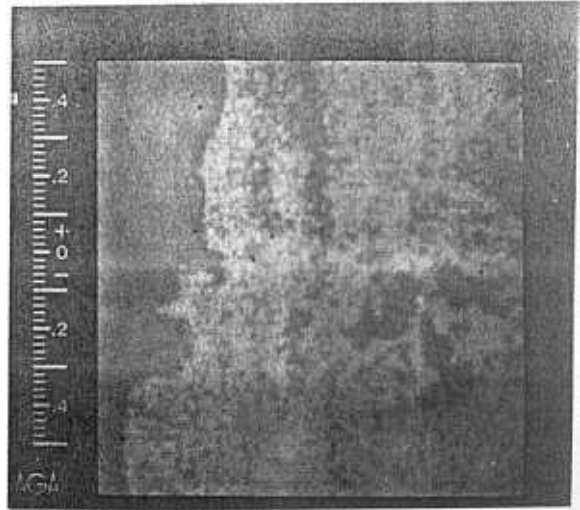


Figura III.147 Termograma tomado sin filtro interferencial y con fuente de radiación de la zona estudiada

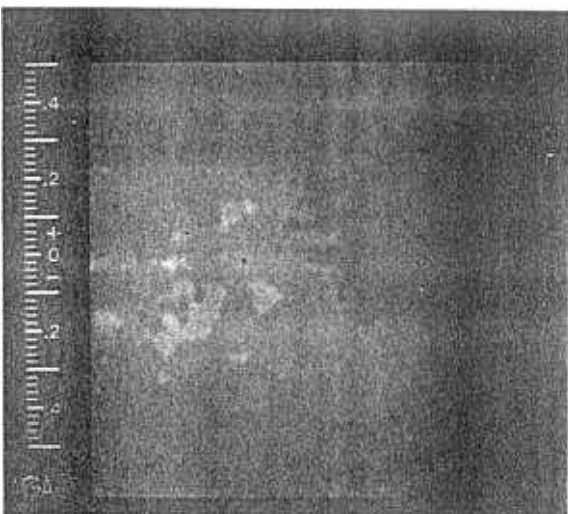


Figura III.148 Termograma tomado usando el filtro de CO_2 y sin fuente de radiación externa.

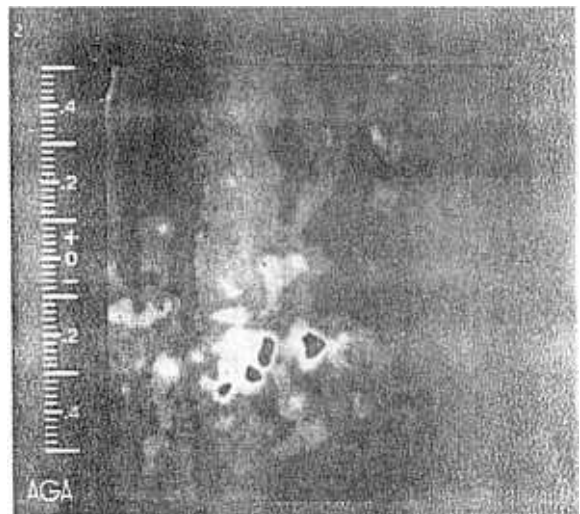


Figura III.149 Termograma tomado usando el filtro de CO_2 y la fuente de radiación externa.

De los termogramas presentados se pueden establecer dos conclusiones fundamentales. Por una parte, la existencia de una fuente externa controlada mejora la detectabilidad de la zona estudiada (comparar los termogramas presentados en III.146 y III.147 y los presentados en III.148 y III.149). Además, la comparación de los termogramas tomados con los distintos filtros permite determinar cómo está influyendo el vapor de agua en la superficie.

Capítulo IV: Discusión de los resultados

En el presente capítulo del trabajo se sigue un esquema similar al presentado en el capítulo referente a Experimentación y Resultados, aunque algunos de los puntos no se discuten por entenderse la obviedad de los mismos. Las experimentación correspondiente a estos puntos se consideró necesaria para el buen funcionamiento del equipo, pero no se ha considerado necesaria su explicación.

IV.1.- Técnica

IV.1.1.- Radiación externa controlada

Uno de los problemas más importantes aparecidos a la hora de aplicar la Termografía Infrarroja a la detección de zonas húmedas en materiales de construcción fue el estudio de zonas con bajos contenidos de humedad, debido a las características de la termocámara de la que se disponía.

El equipo de Termografía Infrarroja utilizado tiene una banda de detección entre 2.5 y 5.6 μm . Como ya se ha explicado en puntos anteriores (III.1.4 y III.1.5), aunque las bandas de mayor emisión del agua aparecen centradas en torno a 6 μm , también existe una banda de emisión en 2.7 μm . Por lo tanto, si un cuerpo húmedo se enfoca con una fuente de radiación que emita en esta banda de tal forma que sólo se produzca reflexión en la superficie, se producirá un aumento de la radiación total recogida por la termocámara procedente de la zona húmeda (radiación emitida por el cuerpo más la reflejada en su superficie).

El fenómeno anteriormente expuesto fue utilizado en un intento de mejorar la detección de zonas húmedas en materiales de construcción, sobre todo en el caso de áreas con escaso contenido de agua. La validez de este primer objetivo queda claramente

demostrada con el análisis de las figuras IV.1 y IV.2 donde se muestran los termogramas correspondientes a una placa de escayola humedecida tomados antes y durante la acción de una fuente externa de radiación controlada actuando como se indicó en el punto III.1.4.

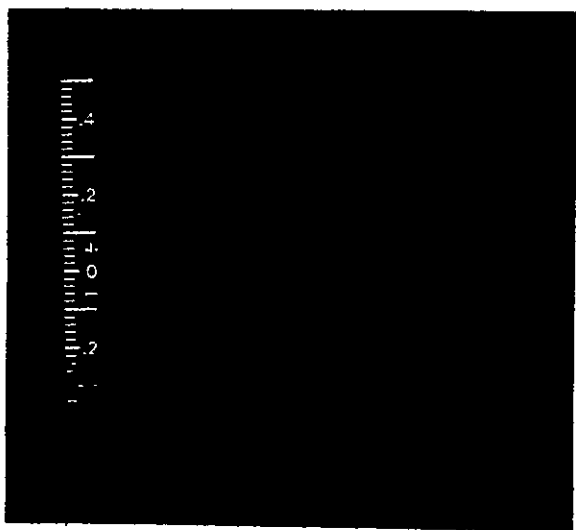


Figura IV.1 *Termograma de una placa de escayola humedecida tomado sin fuente externa de radiación*

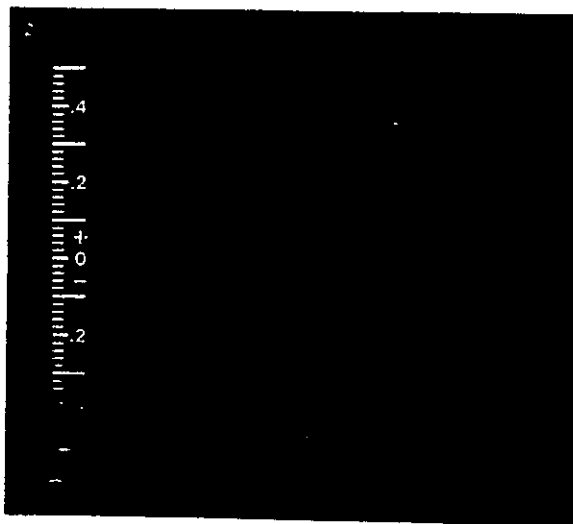


Figura IV.2 *Termograma del mismo material cuando actúa una fuente externa controlada de radiación.*

Como se explicó en III.1.4.b, el periodo de estabilización de la fuente es de 10 min (figura III.21). Una vez estabilizada la fuente, se emite o no radiación en la región a analizar en función de que se quiera obtener imagen con o sin fuente externa controlada. El tiempo durante el cual el material está sometido a la radiación es muy pequeño. Por otra parte, el tipo de material usado tiene una pequeña velocidad de evaporación. Por lo tanto, se puede considerar que en el tiempo de radiación no se producen variaciones reales en la distribución de agua en la superficie del material. Sin embargo, si ambos termogramas (con y sin fuente externa) se comparan, se pueden observar importantes diferencias.

Como ya se ha explicado en diversas ocasiones, un mismo tono de gris en un termograma representa una zona de igual radiación total emitida por el material. En el caso concreto que se estudia, se puede identificar con una zona con igual contenido de humedad. De la comparación de ambos termogramas es fácil deducir que zonas con pequeños contenidos de agua no son detectables mediante Termografía Infrarroja (al menos con un equipo de las características del usado en el desarrollo del presente trabajo de tesis), mientras que, mediante la acción de una fuente con las características de la aquí usada, es

fácil identificar dichas zonas: Las zonas próximas a los extremos del material aparecen con el mismo tono de gris en la figura IV.1, lo cual indica que la termocámara "ve" un mismo contenido de agua en toda la zona; si se observa la figura IV.2, se pueden apreciar zonas con distinto tono de gris en dicho área.

Los resultados presentados en la figura III.22, muestran como las zonas más secas del material (zonas con mayor temperatura inicial) sufren aumentos de "temperatura aparente" mayor que las más mojadas (comparar curvas correspondientes a pto 1 y 5 en figura III.22). Como el volumen de poros en el material se considera homogéneamente repartido y la fuente externa está colocada perpendicularmente a la superficie que se estudia, el tal fenómeno se debe producir por la mayor capacidad de reflexión del material respecto al agua. La actuación de una fuente externa produce por tanto una separación entre la señal procedente de zonas del material secas y zonas con escaso contenido de agua que ya se puso de manifiesto en las figuras IV.1 y IV.2.

Finalmente, en esta figura se pueden apreciar variaciones bruscas de temperatura que coinciden con los tiempos en los que la fuente de radiación fue enfocada o apagada (700 y 1700 seg aproximadamente). Tales variaciones en las curvas demuestra que la lámpara de radiación no produce un calentamiento real de la superficie (al menos detectable mediante Termografía Infrarroja) ya que si éste fuera el caso, las evolución de la temperatura con el tiempo debería seguir un comportamiento exponencial.

MODELIZACIÓN MATEMÁTICA DEL PROCESO

Una vez alcanzado el primer objetivo, se planteó la posibilidad de obtener más información sobre el estado del material que se estudie mediante la modelización matemática del proceso.

Como se ha expuesto en el punto III.1.4.a, dicho desarrollo se basó en el estudio de la variación de radiación total recogida por la termocámara en dos casos: cuando no existe radiación externa y cuando una radiación de características controladas actúa sobre la superficie que se estudia. El estudio matemático se realizó en dos casos: considerando el proceso antes explicado y considerando que toda la radiación procedente de la fuente se reflejaba en la superficie del material (no había cambio real de temperatura en la superficie). Este último desarrollo se realizó para asegurar que las aproximaciones consideradas en el planteamiento matemático del proceso eran válidas.

En la figura III.18, se presentan las curvas teóricas obtenidas para distintos valores de emisividad según los dos desarrollos antes expuestos. Se observan muy pequeñas desviaciones entre ambas curvas, sobre todo para valores relativamente grandes de porosidad (en tanto por uno). Por lo tanto, excepto para materiales de muy pequeña porosidad, es igualmente válido usar las ecuaciones obtenidas a partir del desarrollo total que a partir de la aproximación realizada. En cualquier caso, para materiales con porosidades muy pequeñas sería necesario un estudio más profundo del fenómeno, que no ha sido desarrollado hasta el momento.

Materiales con porosidades parecidas al granito utilizado en el desarrollo del presente trabajo de tesis absorben muy pocas cantidades de agua y sufren procesos de evaporación muy rápidos. Por esa razón, cualquier fenómeno externo (en este caso, la actuación de una fuente externa de radiación) podría producir perturbaciones en el proceso que se desea estudiar.

ENSAYOS SOBRE YESO Y LADRILLO

Los últimos ensayos de laboratorio relacionados con el uso de fuentes externas de radiación, se realizaron con materiales con porosidades altas. En todos los casos, se consideró el punto más alto de la probeta como punto seco. La figura III.23 muestra las rectas obtenidas en la ecuación [III.11] para cada uno de los puntos analizados en el material. El valor de la pendiente de dichas rectas debe estar relacionado con el contenido de agua del material en la superficie por el propio planteamiento del modelo matemático.

Según dicho modelo, se considera la radiación total de una parte específica del material como la total emitida por el material más la total emitida por el agua contenida en sus poros. No se considera emisividad del aire, y, por tanto, la cantidad de agua que existe en una zona determinada del material se cuantifica a partir de un valor de "porosidad aparente" v (en tanto por uno). Es decir, se considera que el material, en este caso, tiene un valor de "porosidad aparente" v decreciente a lo largo de su superficie y que en cualquiera de los puntos, el material está saturado de agua. Por lo tanto, la cuantificación de dicho parámetro "v" debe de ser equivalente a la evaluación de un contenido de agua relativo en la superficie del material.

Por otra parte, en las rectas correspondientes a la figura III.23, se aprecian cambios importantes que guardan un cierto paralelismo con la cantidad de agua contenida:

La recta correspondiente al punto 4 de medida tiene una ordenada en el origen claramente distinta del resto. Este punto corresponde con una zona de la superficie situada a una altura importante (aproximadamente a 12 cm). Dado el planteamiento del ensayo (explicado en III.1.4.b), en el momento de llevarlo a cabo, esta parte del material permanecía prácticamente seca, como pone de manifiesto la diferencia entre la recta correspondiente a este punto y el resto. La pendiente de la recta, que no corresponde exactamente con 45°, indica un pequeño aumento del contenido de agua en este punto (recordar que en el eje de abscisas de la figura III.23 se ha representado la radiación correspondiente al punto más alto del material y que éste se considera totalmente seco).

Las rectas correspondientes a los puntos 2 y 3 son prácticamente paralelas, lo cual indica un comportamiento muy similar del material ante la radiación en ambas zonas. Por lo tanto, se puede considerar un contenido de agua muy próximo para las dos.

Finalmente, la recta correspondiente al punto 1 tiene una pendiente claramente menor que todas las demás. Los aumentos de radiación total emitida en esta zona son menos claros que en el resto. Si se recuerda, un mayor contenido de agua en un material induce un salto menor en la temperatura (y por tanto en la radiación total emitida). Por lo tanto, y como cabía esperar según el planteamiento del ensayo, esta zona corresponde con la de máximo contenido de agua en la superficie.

Los mismos resultados hasta aquí discutidos, relacionados con el ensayo sobre yeso, se presentan en la figura III.24, donde se presenta la distribución de la humedad con la altura de la probeta. Se considera que el punto más alto del material (cuya radiación se presentó en el eje de ordenadas en la figura III.23) está totalmente seco. El valor de v para el resto de los puntos estudiados se calcula a partir de éste. Se observa una saturación de agua en la parte más baja del material producida posiblemente por dos fenómenos: el peso de la columna de agua dentro del propio cuerpo, que tenderá a caer y la disminución de la ventilación en esta parte del material. El tramo central de la probeta, entre 6 y 10 cm aproximadamente) tiene un contenido de agua constante, lo que concuerda con el planteamiento del ensayo (la probeta se mantenía sumergida en agua hasta aproximadamente 10 cm de altura durante un período de tiempo antes de realizar el ensayo). Finalmente, la parte más alta del material se mantiene totalmente seca en el período de tiempo en el que se realizaron las medidas. Merece la pena destacar, para terminar, la pequeña curvatura que produce el último de los puntos medidos que indica una tendencia del agua a ascender por capilaridad hacia las zonas más secas del material.

Un ensayo de iguales características se realizó sobre un ladrillo. En la figura III.25 se muestran las rectas obtenidas considerando siempre el punto más alto del material como totalmente seco. La interpretación de los resultados sería igual a la expuesta en el caso de la escayola: el punto 4 tiene una recta de características claramente distintas al resto, lo cual indica un menor contenido de agua en esta zona. Respecto a los otros tres puntos analizados, se observa una mayor homogeneidad del agua que en el caso de la escayola. Esto se pone de manifiesto por el comportamiento de las rectas correspondientes a estos puntos. Existe, en este caso, una mayor similitud de las características de las tres rectas. Este hecho puede justificarse por las características de la red porosa de cada una de los materiales estudiados que se presentaron en las tabla III.12 y III.13. La gran porosidad del yeso favorece el desplazamiento del agua dentro del material en muy cortos periodos de tiempo, mientras que en el caso del ladrillo, con valores de porosidad mucho menores, el tiempo transcurrido desde que el material se saca del agua hasta que se realizan las medidas no es suficiente para que la distribución inicial de agua en el material se haya perturbado. En el caso del ladrillo, los efectos de capilaridad (ley de Jurin) mantienen durante más tiempo el agua.

Esta característica del material permitió realizar un seguimiento temporal de su estado, que no fue posible en el caso anterior (la parte superior, tomada como referencia, se mojaba rápidamente en el caso del yeso). En las figuras III.26 y III.27 se muestran los resultados obtenidos.

La evolución del contenido de agua con el tiempo para cada área del material se muestra en la figura III.26. Inicialmente, los puntos más bajos medidos, situados a 5 y 7.7 cm de altura respectivamente, absorben una cierta cantidad de agua procedente de puntos del interior del material (observar que las curvas correspondientes a puntos más altos son siempre crecientes) hasta alcanzar la saturación. Existe un periodo de tiempo (aproximadamente igual en ambas zonas) en el que el contenido de agua se mantiene constante. A partir de aproximadamente 70 min, se inicia un proceso de pérdida de agua. Formalmente, estas curvas corresponden, como más adelante se demostrará con las pérdidas de peso del material en un proceso de evaporación y con los resultados teóricos obtenidos en la modelización de tales procesos. El punto situado a 15 cm de altura, que se considera inicialmente seco, absorbe desde el principio del proceso, agua procedente de puntos más bajos hasta alcanzar un equilibrio. Si se analizan ahora los valores de contenido de agua de equilibrio, se puede observar como el agua tiende a permanecer en las zonas centrales de la superficie del material (7.75 y 15 cm de altura) que son las que presentan los máximos contenidos de agua al final del análisis.

La evolución de la humedad con la altura del material se presenta en la figura III.27. Inicialmente, existe un gradiente del contenido de agua en la superficie del material, como se observa en la curva correspondiente a 0 min. Posteriormente se produce una redistribución de agua en la superficie del mismo, aparece una zona saturada (hasta 8 cm de altura aproximadamente) y, al mismo tiempo, empieza a llegar agua a puntos inicialmente secos (en torno a 15 cm). Se puede entender que esta primera redistribución del agua en la superficie del material se debe principalmente al peso de la propia columna de agua que obliga a ésta a caer. Este fenómeno debe de ser más acusado en este caso que en el del yeso por distintas razones. Por una parte, la muestra de ladrillo tiene altura casi doble que la de yeso (el criterio establecido para el desarrollo del ensayo consistía en iniciar éste después de mantener la muestra sumergida en agua hasta la mitad de su altura durante un periodo de tiempo dado). Además, la porosidad del ladrillo es bastante menor que la del yeso (ver tabla III.12) y, por lo tanto, los procesos de evaporación en este caso serán más lentos.

Si se estudian las curvas correspondientes a tiempos posteriores, se puede observar que el agua tiende a mantenerse en las zonas centrales de la superficie del material. Por una parte, existe un movimiento capilar del agua hacia zonas inicialmente secas (observar el aumento del contenido de agua en torno a 15 cm de altura). Además, existe una pérdida de agua en las partes más bajas del material que puede explicarse por el aumento de la superficie de ventilación en esta zona (el material evapora por su base además de por las caras).

Finalmente, señalar que en estos ensayos, de nuevo se ponen de manifiesto las mejoras obtenidas en la detección cuando actúa una radiación externa controlada. Como más adelante se comentará, en el desarrollo de los ensayos de evaporación en materiales de construcción, se estudiaron los efectos aquí explicados (gravedad y variación de la superficie de ventilación del cuerpo) con objeto de determinar si era o no necesario medir en más de un punto de la superficie de un material cuando estaba sometido a un proceso de evaporación. En los ensayos realizados sin fuentes externas de radiación, los valores de temperatura medidos en tres puntos de la superficie del material (correspondientes a los extremos y a la zona central de la misma, respectivamente) quedaban dentro del margen de error de la medida aún en los casos más desfavorables. Es decir, la incidencia de una radiación externa controlada permite obtener mayor precisión en las medidas de humedad de una superficie.

IV.1.2.- Termografía Infrarroja Selectiva

La termografía Infrarroja Selectiva se desarrolló en un intento de evitar los efectos producidos por la atenuación atmosférica cuando se pretendía aplicar la técnica en atmósferas con altos contenidos de humedad.

El uso de filtros interferenciales acoplados a la termocámara requiere una nueva puesta a punto de la técnica que incluye la obtención de nuevas curvas de calibración y estudio de los efectos de atenuación atmosférica. Los resultados obtenidos en estos ensayos se mostraron en el punto III.1.5.

PUESTA A PUNTO DE LA TÉCNICA

Respecto a las curvas de calibración obtenidas, mostradas en la figura III.30, se observa una disminución importante de la señal en el caso de filtro de H_2O . La curva correspondiente al filtro de CO_2 mantiene valores de radiación próximos a las curvas correspondientes al calibrado de la termocámara sin filtros (figura III.1). Esta diferencia entre las curvas es fácilmente explicable si se recuerdan las curvas de intensidad espectral de la radiación (figura I.6). En el caso del uso de filtro de H_2O , se está considerando la banda de radiación entre 2.5 y 3 μm para una temperatura ambiente próxima a los 300 °K. En estas condiciones, el tramo de curva considerado corresponde con una zona próxima a la cola de la curva de emisión del cuerpo negro, lo cual explica la pequeña intensidad de la señal recogida en este caso.

Por el contrario, el uso del filtro de CO_2 limita la señal recogida por la termocámara a la banda entre 4 y 4.5 μm , banda que corresponde, según la figura I.6., a una zona de mayor emisión de radiación (para la misma temperatura). En este caso, además, la curvatura de la curva debe ser más plana que en el caso de trabajar con la cámara sin filtros interferenciales ya que la banda de detección es más pequeña (la banda de detección de la termocámara es de 2 a 5.6 μm).

Los mismos argumentos son válidos si se intentan explicar las curvas de variación de la radiación con la temperatura cuando se usan filtros interferenciales (figuras III.31 y III.32). En el caso del filtro de H_2O , se recibe muy poca radiación y las curvas tienen curvatura importante; por el contrario, las curvas correspondientes al filtro de CO_2 son planas y el uso de este filtro implica una mayor detección mediante termografía (mayores

valores de radiación recibida en este caso). Este comportamiento es fácilmente explicable, según lo anteriormente comentado, si se considera la zona de las curvas de Planck a la que se limita la detección.

ENSAYOS EN LABORATORIO

Los ensayos presentados en las figuras III.33 a III.41 tenían por objeto verificar la validez del uso de la Termografía Infrarroja Selectiva en el estudio de humedades en materiales de construcción. Para ello, se hicieron medidas termográficas sobre probetas de escayola sometidas a procesos de capilaridad y evaporación con agua destilada. Es importante señalar que todos los termogramas discutidos en este punto han sido obtenidos considerando el mismo rango de detección del equipo aún a riesgo de no obtener la mejor calidad de imagen posible. El objeto de tal decisión era obtener imágenes comparativas con el fin de discutir los resultados obtenidos cualitativamente.

De la comparación de los termogramas correspondientes a los procesos de capilaridad y evaporación estudiados (figuras III.33 a III.41) se pueden obtener las siguientes conclusiones generales:

- * El uso de la cámara abierta aporta la mayor información sobre el estado del material (comparar figuras III.33, III.36 y III.39 con el resto)
- * El filtro de agua (figuras III.34, III.37 y III.40) permite ver fundamentalmente la parte húmeda de la muestra (comparar correspondientes a medidas sin filtros).
- * El filtro de CO₂ (figuras III.35, III.38 y III.41) permite ver toda la muestra aunque la imagen es mucho más difusa que en el caso de los termogramas sin filtro.

Como se explicó en el apartado III.1.5, cualquiera de los filtros interferenciales utilizados trabaja en bandas más estrechas que la termocámara. Por eso, es lógico que sea en este caso (cámara abierta) cuando se obtenga una información más amplia del estado del material. Sin embargo, a partir de los termogramas correspondientes a las medidas con filtros, es posible obtener información complementaria a la analizada hasta ahora.

El filtro de agua hace visible fundamentalmente la parte mojada de la probeta (recordar que la banda de detección en este caso esta comprendida entre 2.5 y 3 μ m). Pero, además aporta información acerca del contenido de humedad presente en el entorno del material. Esto significa que mediante la comparación de termogramas es posibles establecer como está evolucionando la humedad en el material con más precisión que si se trabaja solo

con la cámara abierta. Por ejemplo, la figura III.34, correspondiente a un proceso de capilaridad en una probeta de escayola, indica no sólo que el agua está penetrando en el material por capilaridad sino también que se está iniciando un proceso de evaporación en la parte más baja del mismo. Además, la altura real que ha alcanzado el agua en la probeta es algo menor que la mostrada en el termograma sin filtro (comparar figuras III.33 y III.34). En el caso de medidas sin filtro, el termograma muestra toda la información relacionada con cambios de temperatura del material. Esto incluye variaciones de conductividad térmica (producidas por la presencia de agua en la parte inferior del material) que no se ponen de manifiesto al trabajar con filtro de agua.

De la misma forma, los termogramas tomados con filtro de agua correspondientes a procesos de evaporación (figuras III.36 y III.39), muestran cómo se redistribuye el agua dentro del material y cómo evoluciona el proceso de evaporación a lo largo del tiempo. La anchura de la isoterma externa al material permite determinar la velocidad de evaporación del proceso. Durante el primer día de evaporación (figura III.36) el material está perdiendo mucho agua y su velocidad, al tercer día, ha disminuido notablemente, como muestra la diferencia de la anchura de la isoterma externa en estos casos.

El filtro de CO_2 produce una imagen más difusa de la muestra (figuras III.35, III.38 y III.41). En esta banda de transmisión (de 4 a $4.5 \mu\text{m}$) se pierden la mayoría de los efectos de emisión del agua y, por tanto, se obtiene una señal más débil procedente del material aunque todavía es posible detectar diferencias entre la parte seca y la mojada del mismo.

El análisis del proceso de capilaridad con filtro de CO_2 (figura III.35) muestra una única isoterma interna. Esto significa que el agua está homogéneamente repartida en toda la parte mojada del material. Por lo tanto, de nuevo se pone de manifiesto que la imagen tomada sin filtros interferenciales (figura III.33) no sólo muestra la humedad en el material, sino también otros fenómenos susceptibles de perturbar térmicamente la muestra. Por eso, en este caso (figura III.33) aparecen distintas bandas de radiación en el material que no son detectables cuando se usa el filtro de CO_2 .

De la misma forma, el análisis de los termogramas correspondientes al proceso de evaporación tomados con filtro de CO_2 muestran cómo ha evolucionado la humedad en el material a lo largo del período de medida.

En el estudio de procesos de capilaridad y evaporación, se ha demostrado que al analizar las muestras haciendo uso de los filtros interferenciales, la información que se

obtiene es complementaria. Las condiciones de medida (distancia, orientación, apertura, etc.) se mantuvieron constantes para que las medidas obtenidas fuesen comparables.

Los procesos de evaporación se han presentado en dos bloques de termogramas diferentes, correspondientes al primer día de evaporación (figuras III.36 a III.38) y al tercer día (figuras III.39 a III.41). De esta forma, puede observarse el fenómeno a lo largo del tiempo. Si se analizan las imágenes correspondientes al primer día de ensayo obtenidas sin filtro interferencial (figuras III.36), se observa que las isotermas más claras corresponden a la parte más baja del material. Este hecho pone de manifiesto que el agua se está acumulando en la parte inferior de la probeta, lo que era de esperar debido a la acción gravitatoria sobre las disoluciones. Si se comparan estas imágenes con la equivalente a los procesos de succión capilar de la muestra (figura III.33), se observan diferencias muy notables, debido fundamentalmente a la diferencia de ensayo provocado. Mientras que en el caso de succión capilar se parte del material seco, aquí se parte del material saturado de humedad, por lo que en ambos casos tienen que darse fenómenos inversos. Sin embargo, el proceso es fácilmente detectable cuando el agua empieza a penetrar en el material (succión capilar) y es muy difícil en el caso de evaporación. Por eso, la anchura de muestra es prácticamente igual en todos los termogramas correspondientes a este proceso y sufren diferencias notables al estudiar procesos de capilaridad. Este hecho puede tener gran importancia cuando se estudian procesos con disoluciones salinas y se hará referencia a él posteriormente.

IV.2.- Materiales de construcción

IV.2.1.- Modelización matemática de los procesos hídricos. Justificación experimental

Los resultados teóricos obtenidos a partir de el modelo matemático presentado, se confirmaron mediante el estudio con Termografía Infrarroja Clásica de los procesos hídricos modelizados. En todos los casos se utilizó agua destilada para realizar los ensayos con el fin de evitar la interferencia de posibles iones disueltos en el proceso a estudiar y la obturación de poros y capilares por obstrucción de sales.

PROCESOS DE EVAPORACIÓN CON AGUA DESTILADA A 20 °C

Los resultados presentados en las figuras III.64 a III.67 corresponden a las curvas de evolución de la temperatura superficial y el peso de cada material estudiado. Dichas curvas se obtuvieron ajustando los valores experimentales a una curva como la obtenida en la modelización matemática del proceso mediante un programa informático adecuado.

Para verificar los modelos matemáticos presentados, es necesario comparar los resultados teóricos y experimentales obtenidos para cada material. A este respecto, era importante conocer algunas características físicas de los materiales involucradas en los procesos. Como se ha explicado en distintas ocasiones, las variables físicas de los morteros no están tabuladas dado que se trata de materiales artificiales con características propias en cada caso. Por esta razón, el estudio se centró inicialmente en la caliza y el granito, considerados como materiales representativos de los distintos grupos establecidos en función de la porosidad. Las características físicas de dichos materiales se presentan en la tabla IV.1 (/24/).

| | POROSIDAD (%) | DENSIDAD (g/cm ³) | COND. TÉRMICA (cal/(cm seg °C)) | C. ESPECÍFICO (cal/(g °C)) |
|---------|---------------|-------------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| CALIZA | 10-11 | 2.68 - 2.76 | 0.017 - 0.036 | 0.217 |
| GRANITO | 0.6-0.7 | 2.64 - 2.76 | 0.054 - 0.116 | 0.20 |

Tabla IV.1 Características físicas de caliza y granito

A partir de los valores teóricos presentados en la tabla anterior y de los resultados obtenidos en la modelización matemática de procesos de evaporación se calcularon las curvas teóricas de evolución de la temperatura superficial (T_s) con el tiempo y de concentración de agua en los poros del material (C). Las curvas obtenidas se presentan en las figuras IV.3, IV.4, IV.5 y IV.6.

En dichas figuras se han representado con puntos los valores experimentales y con línea continua, las curvas teóricas descritas mediante el modelo. Es importante observar que en ambos casos las curvas teóricas y experimentales coinciden, aunque en el caso de la caliza existe una ligera desviación de los datos experimentales al modelo teórico.

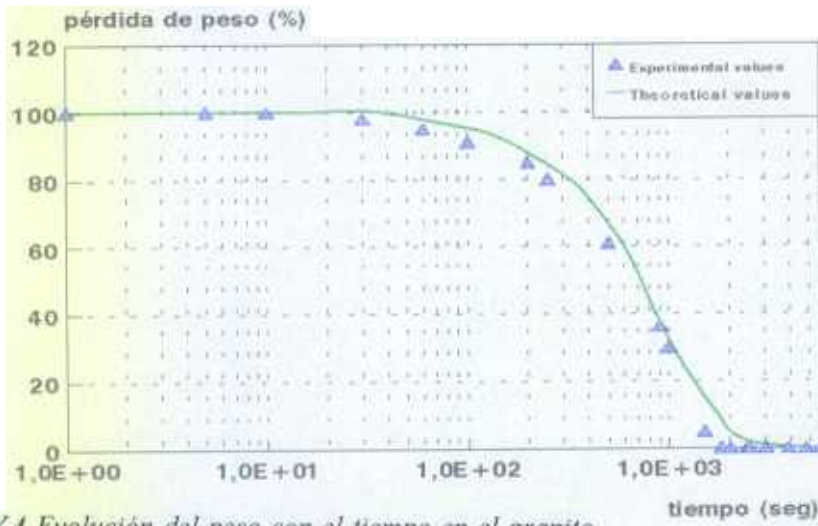
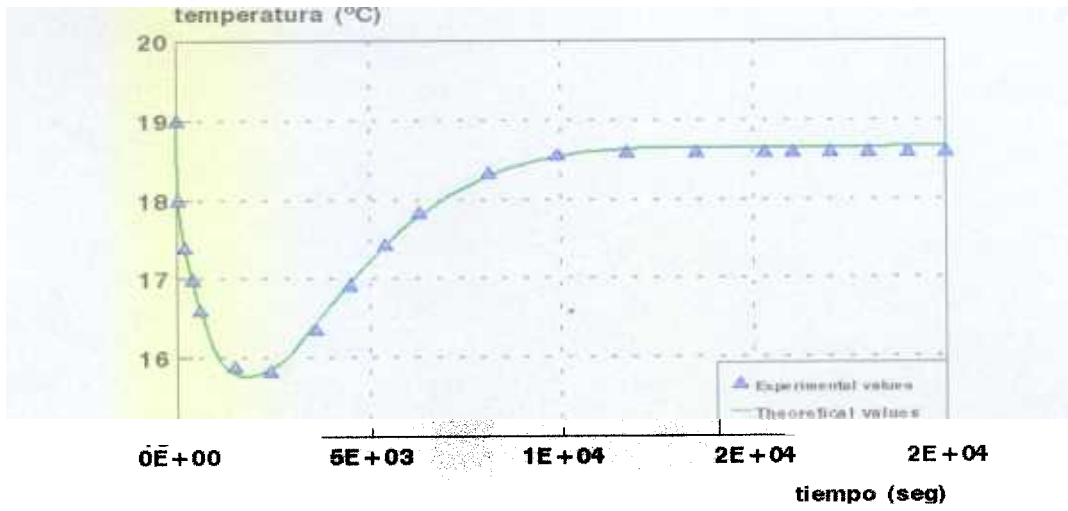


Figura IV.4 Evolución del peso con el tiempo en el granito

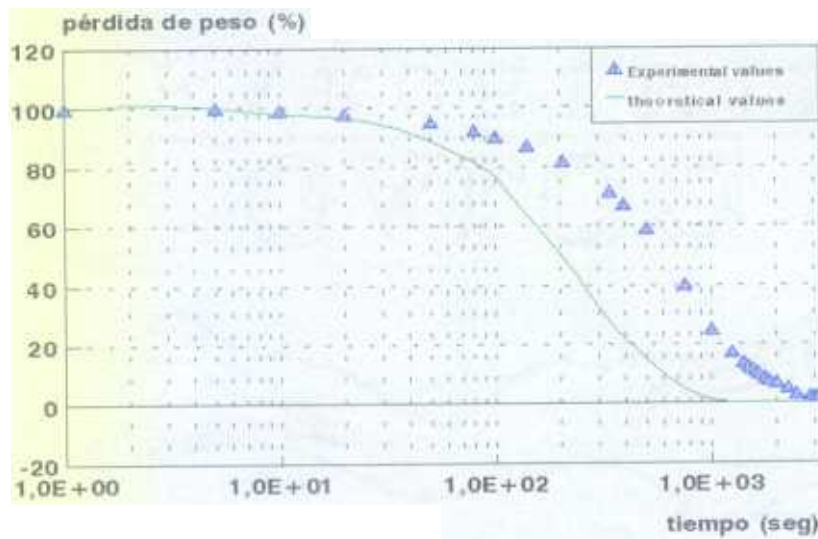


Figura IV.5 Evolución del peso con el tiempo en la caliza

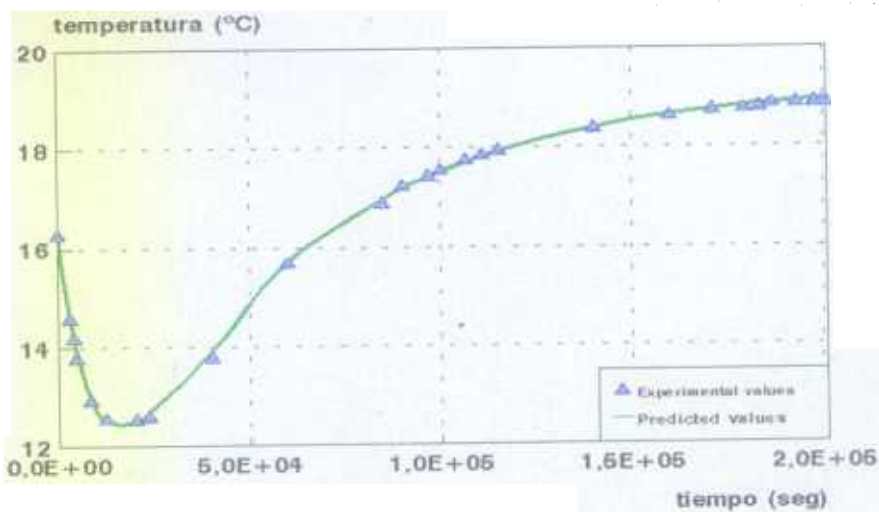


Figura IV.6 Evolución de la temperatura con el tiempo en la caliza

La explicación de estas variaciones está relacionada con el hecho de haber considerado constante la conductividad térmica del material en el estudio teórico de los procesos. Esta condición parece ser válida para el caso del granito pero no para la caliza. En este último caso, parece razonable pensar que hay un cambio de la conductividad térmica del material debido al contenido de agua en el mismo. Por eso, este cambio es más importante a tiempos pequeños del proceso de evaporación (cuando las diferencias de comportamiento entre material seco y mojado son más importantes). Estas diferencias decrecen cuando el tiempo de evaporación aumenta. Por lo tanto, cuando el tiempo de evaporación es grande, el material contiene una pequeña cantidad de agua que apenas modifica su conductividad térmica.

El análisis de porosidad de los materiales presentado en III.2.1.b se determinó que en el caso del granito, además de tener un valor de porosidad pequeño (en torno al 0.7%), aproximadamente el 60 % de los poros tiene tamaños comprendidos entre 10 y 100 μm (figura III.57), mientras que en la caliza, aunque la porosidad es mucho mayor (en torno al 11 %), los poros tienen, en general, tamaños menores: el 60 % de los entre 0.1 y 1 μm y el 30 % entre 1 y 10 μm (figura III.55). Por lo tanto, el tamaño de poros mayoritario en la caliza favorece una mayor penetración del agua en el material, alargándose los tiempos de equilibrio.

A partir de los coeficientes de ajuste de las curvas experimentales se han obtenido valores teóricos de la conductividad térmica de los materiales, considerando un valor promediado del resto de las constantes físicas. En la tabla IV.2 se muestran los resultados obtenidos.

| | | VALOR EXPERIMENTAL | VALOR TEÓRICO |
|---------|----------------|--------------------|---------------|
| GRANITO | CURVA DE PESO | 0.070 | 0.081 |
| | CURVA DE TEMP. | 0.076 | |
| CALIZA | CURVA DE PESO | 0.0088 | 0.027 |
| | CURVA DE TEMP. | 0.0088 | |

Tabla IV.2 Valores de conductividad térmica teóricos y experimentales obtenidos a partir de termografía infrarroja

Se obtienen valores muy aproximados de conductividad térmica en el caso del granito. Sin embargo, en el caso de la caliza existen importantes dispersiones entre los valores teóricos y los experimentales.

Si se considera que la conductividad térmica del material mojado se comporta como una asociación de resistencias eléctricas en paralelo, es decir:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{\text{agua}}} + \frac{1}{C_{\text{material}}} \quad [IV.1]$$

y se considera, además, la conductividad del agua $4.3 \cdot 10^{-5} \text{ cal}(\text{cm seg } ^\circ\text{C})^{-1}$ (/24/). Se obtiene una conductividad las siguientes conductividades térmicas para materiales saturados de agua (considerando las características físicas de los materiales presentadas en IV.1):

| | C. TÉRMICA (Cal(cm seg °C) ⁻¹) |
|---------|---|
| GRANITO | 0.071 |
| CALIZA | 0.042 |

Tabla IV.2 Valores de conductividad térmica calculados a partir de [IV.1]

A partir de los resultados anteriores se observa como las discrepancias en las curvas correspondientes a la caliza se deben a que no se ha considerado la evolución de la conductividad térmica en el modelo establecido.

Los resultados hasta aquí presentados, ponen de manifiesto nuevamente la importancia de la red porosa del material en cualquier proceso relacionado con el movimiento del agua. En casos como el representado por la caliza, resulta conveniente conocer la evolución de la

conductividad térmica del material con el contenido de humedad si se desea encontrar la expresión matemática que explica el proceso de evaporación en materiales de construcción.

Además de la conductividad térmica, se han considerado constantes otras variables físicas. Estas aproximaciones pueden justificarse tanto por las características de los materiales estudiados como por los propios procesos objeto de estudio. Sin embargo, es importante enfatizar que se ha desarrollado una primera aproximación teórica a los procesos de evaporación y, por lo tanto, es necesario un mejor conocimiento tanto del material en el que ocurre el proceso como de sus propiedades físicas o de las condiciones ambientales del entorno con objeto de mejorar el modelo matemático presentado. A este respecto merece la pena destacar características como el calor específico (c_p) o el calor de evaporación del agua (c_w) que se han considerado constantes en todo el proceso debido a la pequeña solubilidad de los materiales tratados en condiciones atmosféricas normales. No obstante, existen algunos casos como yesos, escayolas o materiales sometidos a condiciones ambientales más extremas en los que esta condición no se cumple y las variaciones de tales constantes deben considerarse. Por eso, cada caso específico requerirá un estudio propio, en el cual deben considerarse todos los fenómenos aquí presentados.

Finalmente, respecto al resto de materiales estudiados experimentalmente, considerando la conductividad térmica como única propiedad física variable con el contenido de humedad del material (además de la temperatura superficial y el peso), y la relación establecida entre este parámetro y la porosidad v del material, se puede considerar que los morteros de reparación I y II presentarán un comportamiento teórico muy similar al obtenido experimentalmente. Igual que en el caso del granito no existirán grandes perturbaciones en la conductividad térmica del material debido al contenido de agua en el mismo ya que ambos materiales tienen porosidades pequeñas, incapaces de permitir que el material absorba la cantidad suficiente de agua. Sin embargo, en los morteros de cemento, cal o el mortero de reparación III las curvas teóricas presentarán desviaciones importantes respecto al caso experimental, debido a la influencia del contenido de agua en el material. Esta desviación será tanto mayor cuanto menor sea el tiempo de evaporación transcurrido en el material.

SUCCIÓN CAPILAR CON AGUA DESTILADA A 20 °C

Los resultados experimentales obtenidos en estos ensayos se han presentado en las figuras III.103, III.104 y III.105. En estos ensayos se consideraron tres puntos de medida en la superficie de cada material, situados respectivamente a 1, 5 y 15 cm de altura. En ninguno de los casos se detectaron variaciones de radiación en el punto más alto de los estudiados

en el transcurso del ensayo. Por eso, nunca se hace referencia a dicho punto.

A partir de la modelización matemática del proceso de succión capilar, se han obtenido curvas de evolución de la temperatura superficial con el tiempo formalmente iguales a las correspondientes al modelo de evaporación. Según esto, cualquier proceso de succión capilar, una vez superado un periodo inicial en el cual el material solo absorbe agua, puede ser entendido como un proceso mixto de capilaridad y evaporación que, dependiendo de la existencia de la fuente de agua coexisten en equilibrio con el exterior o se extinguen progresivamente, primero el de capilaridad y luego el de evaporación. Durante el periodo inicial, el material solamente absorberá agua hasta alcanzar la cantidad suficiente para iniciar la evaporación. Este periodo debe de estar íntimamente relacionado con la porosidad del material, los tamaños de poros más "adecuados" para la absorción y la interconexión de la red porosa. En general, se puede considerar que materiales con porosidades mayores, absorberán más cantidad de agua en el mismo periodo de tiempo y, por lo tanto, el proceso de evaporación se iniciará antes. Es decir, poros grandes dificultan la penetración de agua pero favorecen la evaporación.

En este caso, el término exponencial expresado en la ecuación III.33 está formado por dos componentes (ecuación III.51). El primero de ellos corresponde al obtenido en el caso de un proceso de evaporación. En los procesos de succión capilar interviene, además, un segundo factor que depende solamente de la cantidad de agua que penetra en el material por capilaridad (comparar las ecuaciones III.33 y III.51). En procesos de evaporación la velocidad de enfriamiento del material depende de una constante característica de cada material llamada difusividad térmica; en procesos de succión capilar, interviene, además, la constante Ψ que relaciona la tensión superficial con la temperatura. No se han encontrado valores tabulados de dicho parámetro, y por eso no ha sido posible estimar teóricamente el valor de la conductividad térmica a partir de estos datos al contrario que en el caso de los procesos de evaporación.

Para tiempos infinitamente grandes la temperatura del material alcanzará un valor constante que vendrá dado por:

$$T_{\text{eq}} = T_0 + \sum_{m=1}^{\infty} M_m \cos(m\pi x) + \frac{R}{T_m m^2 \pi^2 \kappa} \sin\left(\frac{m\pi}{2}\right) \quad [\text{IV.2}]$$

Este valor, obtenido como límite de la temperatura, depende únicamente de la temperatura inicial y de las características del material y del fluido que penetra en él. Es decir, cada material, sometido a un proceso de succión capilar, posee una temperatura de

equilibrio, que alcanza para tiempos suficientemente grandes y que sólo depende de sus características, de las de la disolución utilizada y de las condiciones ambientales del entorno.

Si se considera ahora la evolución de la temperatura a distintas alturas de un mismo material, el proceso se retardará en función de la altura considerada. Así, para un mismo tiempo de medida, la conductividad térmica del material tendrá menos influencia cuanto mayor sea la altura del punto medido, porque contendrá menor cantidad de agua. En el modelo desarrollado, no se han considerado variaciones de temperatura superficial con la altura respecto a la fuente de agua, pero ésta se pondrá de manifiesto con una desviación menor de la conductividad térmica del material al aumentar la distancia.

IV.2.2.- Estudio de otros procesos hídricos

EVAPORACIÓN Y SUCCIÓN CAPILAR EN ESCAYOLA

El estudio de distintos procesos hídricos en materiales de construcción con disoluciones salinas se desarrollo en un intento de aproximar los ensayos de laboratorio a situaciones reales en edificios. En este caso, el agua que penetra en el material siempre tendrá un cierto contenido de sales que, como se ha explicado en capítulos anteriores, puede tener muy diverso origen. La presencia de sales acentúa los daños producidos en el material. El lugar donde se produce la precipitación de sales, por ejemplo, es de gran importancia en la restauración de edificios: Además de alterar el equilibrio hídrico con el exterior y favorecer procesos de condensación, las sales precipitadas en la superficie del material no producen daños importantes en el mismo mientras que cuando esta precipitación se produce en el interior, se pueden generar fisuras asociadas a fenómenos de cristalización. En general, el lugar donde precipita la sal está relacionado con la humedad de equilibrio de la misma: La condición de sobresaturación y precipitación se da cuando la humedad de equilibrio de la sal es mayor o igual que la humedad relativa del ambiente. En el caso concreto que nos ocupa, las sales utilizadas tienen muy altos valores de humedad de equilibrio (del 75.5%, en el caso del NaCl y del 91.4% para el Na_3PO_4 , ambos a 20 °C). Por lo tanto, es lógico pensar que cualquier disminución de la humedad relativa favorezca la precipitación de estas sales en el interior del material.

Los ensayos de evaporación y succión capilar presentados en los puntos III.1.5.c estaban destinados a evaluar la bondad de la Termografía Infrarroja Selectiva. Dichos ensayos se realizaron con probetas de escayola ya que al ser éste un material muy absorbente (ver tabla III.13) cualquier proceso relacionado con el movimiento de agua en su interior es

fácilmente detectable aún en bandas muy estrechas (recordar que los filtros interferenciales limitan las bandas de detección de la termocámara a bandas de anchura aproximada de 0.5 μm). Además se realizaron medidas cualitativas en las que únicamente se pretendía comparar los resultados obtenidos con los distintos filtros y las distintas disoluciones. Para realizar este tipo de medidas, se mantuvieron constantes los valores de radiación medida por la termocámara para cada filtro interferencial con objeto obtener termogramas comparables entre sí, aún a riesgo de que la imagen obtenida no fuera, en algunos casos, la de mejor resolución. Esta forma de trabajo solamente se realizó en este caso concreto, ya que en el resto de los ensayos realizados siempre se evaluó la radiación emitida en cada momento (y, a partir de ella, la temperatura superficial y la emisividad del material).

Para intentar entender el comportamiento de un material de construcción cuando absorbe o evapora una disolución determinada, es importante conocer algunas características físicas tanto del material que se estudia como de la propia disolución. A este respecto, se consideran como factores influyentes la solubilidad de la sal, la tensión de vapor de la disolución y la porosidad del material. Además, se debe tener en cuenta, que en muchos casos, se pueden producir reacciones químicas entre el material y la sal disuelta, lo que modificaría el comportamiento del mismo en el proceso estudiado. Los valores de porosidad (en %) y la distribución de tamaños de poro de los materiales estudiados ya fueron presentados en capítulos anteriores (punto III.2.1.b). En la tabla IV.4 se presentan los valores de solubilidad de las disoluciones utilizadas (/24/).

| | SOLUBILIDAD (g/100 cm ³) | | | | |
|---|--------------------------------------|---------|---------|---------|----------|
| | T=0 °C | T=15 °C | T=20 °C | T=30 °C | T=100 °C |
| NaCl | 37.5 | | | | 39.8 |
| Na ₂ SO ₄ | 11 | 36 | | 92.7 | |
| Na ₃ PO ₄ ·12H ₂ O | | | 28 | | ∞ |
| Na ₂ C ₂ O ₄ | | | 3.7 | | 6.33 |
| NaNO ₃ | 73 | | | | 180 |

Tabla IV.4 Solubilidad de sales

Todos los ensayos a los que se hace referencia en este apartado se realizaron con disoluciones a 20 °C (saturadas). En aquellos casos en los que no se conocía la solubilidad a dicha temperatura, ésta se calculó interpolando entre los dos valores conocidos. En el presente estudio, no se consideran los valores tabulados de tensión superficial de las

disoluciones, ya que éstas cambiarán dentro del material a lo largo del proceso.

En la figura IV.7 se presentan las curvas de pérdida de peso de las disoluciones salinas utilizadas en los ensayos de capilaridad y evaporación. Dichas curvas se obtuvieron a partir de disoluciones 1 M de cada una de las sales evaporando libremente en condiciones normales de presión y temperatura. Todas las disoluciones se mantuvieron en recipientes iguales para mantener constante la superficie de evaporación del líquido.

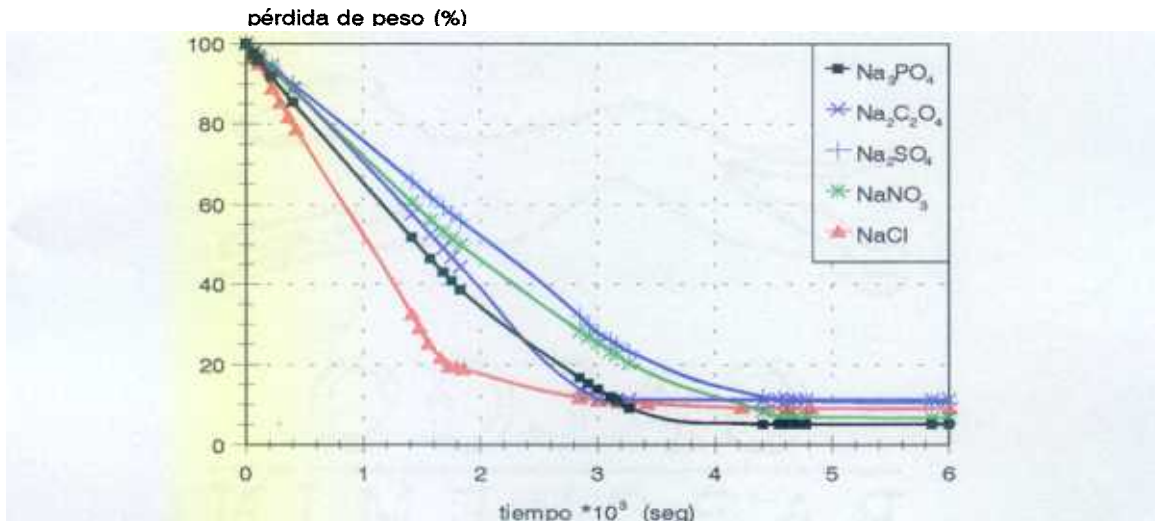


Figura IV.7.- Pérdida de peso en disoluciones salinas 1M en condiciones atmosféricas normales

En la interpretación de los resultados, relativa a procesos de evaporación y succión capilar en materiales de construcción, se considerará como "comportamiento patrón" para cada disolución salina el mostrado en la gráfica presentada en IV.7. Cualquier desviación de dicha evolución se considerará inducida por el material de construcción estudiado.

Ensayos de capilaridad

Del estudio de los termogramas correspondientes a los ensayos sin filtro se observa una área mojada mayor y una mayor homogeneidad de la zona húmeda en el caso del ensayo con agua destilada respecto a los correspondientes a disoluciones salinas (figuras III.107 a III.109). En el primer caso (figura III.109), las zonas seca y mojada se pueden detectar en el mismo valor de nivel termal. Esto implica una mayor homogeneidad de la radiación entre las partes secas y mojadas, y, por lo tanto, mayor homogeneidad en la distribución de humedad. Adicionalmente, si se compara la forma de las isotermas, se observan también importantes diferencias entre el ensayo correspondiente a agua destilada y los correspondientes a disoluciones salinas. En el caso del ensayo con agua destilada (figura III.109) la isoterma externa aparece con forma homogénea y rodea toda la muestra y la

interna presenta forma de menisco. Por el contrario, en el caso de disoluciones salinas (figuras III.110 y III.111) la isoterma externa es más ancha en la parte más baja de la probeta y la interna es plana. Es decir, en el caso de agua destilada, la succión capilar es mayor cerca de las caras externas de la probeta (forma de menisco) como en el caso de un capilar; además, los procesos de evaporación ocurren en toda la muestra, mientras que en los casos de disoluciones salinas, el agua asciende más rápidamente por las capas internas del material, permaneciendo en la parte baja del prisma, donde se producen los procesos de evaporación más importantes.

Esta característica de las isotermas también aparece cuando se usa el filtro de agua (figuras III.112 a III.114). En este caso solo es visible la parte mojada del prisma. La forma de las isotermas es también diferente y prueba de nuevo que en los ensayos con agua destilada se produce una distribución más homogénea de la humedad (ver forma rectangular de la isoterma en figura III.112). Por otra parte, la forma de cuña de las isotermas en los casos de disoluciones salinas indican mayores cantidades de agua en la parte más baja del prisma que asciende a través de sus poros internos. Este fenómeno se produce y se observa más claramente en el caso de la disolución de Na_3PO_4 (figura III.114) en el cual se distinguen dos niveles isotermos usando el filtro de agua. Esto significa que el agua está principalmente retenida en la parte más baja de la muestra.

El ensayo con la disolución de NaCl (figura III.116) se puede entender como un caso intermedio entre los dos anteriores.

Los estudios de capilaridad en probetas de escayola se hacen para diferentes disoluciones salinas y en diferentes condiciones. La densidad de la disolución es mayor en el caso del Na_3PO_4 que en el NaCl , y, por supuesto, mayor que en el agua. La ley de Jurin sugiere que la altura que alcanza un fluido por efecto de capilaridad es, según [I.1], inversamente proporcional a la densidad del fluido. En consecuencia, la altura a alcanzar por el H_2O será mayor que la que alcanzará la disolución de NaCl y ésta, a su vez, mayor que la de la disolución de Na_3PO_4 . Esto se pone de manifiesto claramente en los termogramas III.109, III.110 y III.111. Estos termogramas corresponden al estudio de probetas de escayola sometidas a procesos de succión capilar con disoluciones salinas. En todos los casos, las condiciones de medida han sido las mismas para que los resultados sean comparables. Se observa que el agua destilada asciende hasta la mitad de la altura de la muestra aproximadamente (figura III.109) con gran uniformidad. Por su parte, la disolución de NaCl (figura III.110) alcanza menos altura, y se aprecia una mayor diferencia entre las isotermas, lo que da idea de una menor velocidad en el proceso de capilaridad. Esto se acentúa si se

analiza el termograma correspondiente a la disolución de Na_3PO_4 (figura III.111). Aquí, además de ser menor la altura, se obtienen al menos cuatro niveles térmicos diferenciados, mientras que en la disolución de NaCl aparecen dos y en la de agua destilada sólo uno.

Al analizar este proceso por medio de filtros interferenciales (figuras III.112 a III.117) no mejora la información conseguida. Sin embargo, aporta datos que pueden ayudar a interpretar fenómenos asociados. Así, en el análisis con el filtro de agua para el agua destilada (figura III.112), el termograma obtenido pone de manifiesto una evolución del movimiento del agua en forma de pirámide truncada, lo que da idea de un movimiento más rápido del agua en la región central del material, y un proceso de evaporación iniciado, con intercambio de humedad a la atmósfera como se pone de manifiesto en la extensión de la isoterma al exterior de la muestra. Por su parte, el filtro de CO_2 pone de manifiesto el cambio de temperatura en la muestra por la presencia de agua y los límites a los que ha llegado, pero se pierde información respecto al caso del termograma tomado sin filtro.

Si se estudia el comportamiento en capilaridad de las disoluciones saturadas con los filtros, se obtiene un resultado similar al del agua destilada. Para ambas disoluciones el filtro de agua ayuda a determinar cómo se desplaza el agua en el interior del material, y lo que es más importante, el posible inicio de evaporación de las muestras. En concreto, puede observarse que la disolución de NaCl ha alcanzado alturas algo mayores de lo que se observaba sin filtro, que el contenido de agua en el material es bastante uniforme y que el proceso de evaporación se inicia fundamentalmente en la base de la muestra. Por otra parte, para la disolución de Na_3PO_4 se observa un gradiente en la distribución de la disolución en el interior del material. Puede observarse también que la disolución alcanza una mayor altura que la registrada sin filtro y que no se produce evaporación en la muestra.

De esta forma, se pueden conocer los procesos de capilaridad y distinguir la presencia de sales disueltas en el material.

Ensayos de evaporación

Los resultados obtenidos en el análisis de procesos de evaporación mediante Termografía Infrarroja Selectiva se presentan en las figuras III.70 a III.87. Además, las muestras se pesaron periódicamente hasta alcanzar peso constante. Las curvas de pérdida de peso se presentan en la figura III.88.

En los termogramas correspondientes a los ensayos sin filtro (figuras III.70 a III.72

y III.79 a III.81) se puede observar toda la muestra estudiada y la evolución del agua durante las primeras 48 horas de evaporación. Durante el primer día (figuras III.70 a III.72) se observa la misma evolución del agua independientemente del tipo de disolución: Las isotermas son más claras en la parte más baja de la muestra en todos los casos estudiados. Este hecho prueba nuevamente que el agua está acumulándose en la parte más baja de la muestra, debido al peso de la columna. De cualquier forma, existen diferencias entre los termogramas correspondientes al ensayo con agua destilada y los correspondientes a disoluciones salinas que manifiestan diferencias en los procesos de evaporación: Las isotermas son más brillantes en el caso de los termogramas correspondientes a disoluciones salinas y la pendiente de las mismas es más acusada en el caso de los termogramas correspondientes a los ensayos con agua destilada.

Si los termogramas correspondientes a las medidas tomadas al tercer día del comienzo del proceso de evaporación sin usar filtros interferenciales (figuras III.79 a III.81) se comparan con los obtenidos el primer día (figuras III.70 a III.72), se puede concluir que en el proceso de evaporación el material sumergido en agua destilada no sufre cambios durante este período de tiempo porque la forma de las isotermas es la misma en los termogramas III.79 y III.70. Sin embargo, en los termogramas correspondientes a los ensayos realizados con disoluciones salinas, se observan cambios importantes (comparar las figuras III.71 y III.79, correspondientes a la disolución de NaCl y las III.72 y III.81, correspondientes a la disolución de Na_3PO_4). En estos casos, el agua permanece en la parte central del material, por eso las isotermas más oscuras aparecen en esta zona.

Las sales, por tanto, quedan retenidas en la parte interna del material y debido a su naturaleza higroscópica están absorbiendo agua de su entorno. Este fenómeno favorece la acumulación de agua en esta zona del material detectada mediante Termografía Infrarroja Selectiva

Con respecto a los termogramas correspondientes al ensayo realizado con el filtro de agua (figuras III.73 a III.75 y III.82 a III.84), las conclusiones obtenidas son:

El proceso de evaporación empieza antes en la probeta que ha sido sumergida en agua destilada y finalmente, en la sumergida en Na_3PO_4 . El agua evaporada del material permanece en la atmósfera próxima a él, y, por lo tanto, el aspecto de la isoterma en su entorno, indica la cantidad de agua que el material está perdiendo. En el termograma correspondiente al ensayo realizado con agua destilada (figura III.73) aparece una isoterma muy densa cubriendo este área, mientras que en el termograma correspondiente al ensayo

realizado con la disolución de Na_3PO_4 (figura III.75) no hay ninguna isoterma cubriéndolo. Es decir, el material sujeto a evaporación con agua destilada ha perdido gran cantidad de agua durante este período, mientras que el sujeto a evaporación con una disolución de Na_3PO_4 ha perdido muy poca cantidad, en el mismo período de tiempo. El ensayo con la disolución de NaCl (figura III.74) se puede considerar como un caso intermedio en el cual, el proceso de evaporación ha empezado, pero es más lento que en el caso del ensayo con agua destilada, ya que la isoterma no es tan ancha.

Durante el tercer día de evaporación (figuras III.82 a III.84), el material sujeto a un proceso de evaporación con una disolución de Na_3PO_4 está perdiendo la mayor cantidad de agua (figura III.84), justo lo opuesto al material con agua destilada (figura III.82). En este caso, también el material sometido a evaporación con una disolución de NaCl , corresponde al caso intermedio.

Como la Termografía Infrarroja mide la radiación procedente de la superficie del cuerpo estudiado y el filtro de agua permite detectar el agua evaporada próxima a su superficie, el ancho de la isoterma exterior al material (medida con el filtro de H_2O), estará relacionado con la cantidad de agua que se está evaporando. La anchura de las isotermas externas (en cm), mostradas en la tabla IV.4, está de acuerdo con los resultados antes explicados.

| | ANCHO DE LA ISOTERMA (cm) | |
|---------------------------------|---------------------------|------------|
| | PRIMER DÍA | TERCER DÍA |
| AGUA DESTILADA | 2.1 | 1.6 |
| DISOL. DE NaCl | 1.9 | 1.8 |
| DISOL. Na_3PO_4 | 1.6 | 2.0 |

Tabla IV.4 Anchura de las isotermas externas en los termogramas obtenidos con filtro de agua

Finalmente, el filtro de CO_2 produce una imagen más difusa de toda la muestra (figuras III.76 a III.78 y III.85 a III.87). Como ya se ha explicado en el punto referente a los procesos de capilaridad, en esta banda de trabajo (4 a 4.5 μm) prácticamente, no se detectan efectos de emisión del agua y, por eso se obtiene una señal más débil procedente del material.

En los termogramas correspondientes al filtro de CO_2 se observa como el agua está

homogéneamente repartida en todo el material, por eso, la misma isoterma cubre toda su superficie (figuras III.76 a III.78). Sin embargo, durante el tercer día, los procesos de evaporación han cambiado en los materiales que contienen disoluciones salinas, como muestran los termogramas correspondientes a este estudio (figura III.77 y III.78). En esta figura, la misma isoterma cubre la parte externa del material que corresponde con la parte más seca. En el caso de los ensayos con agua destilada, no se producen cambios durante este periodo (figuras III.76 y III.85).

Finalmente, en la figura III.88 se muestra la pérdida de agua para cada una de las muestras durante el proceso de evaporación. Esta evolución está de acuerdo con lo anteriormente mencionado:

Durante el primer día la pendiente de la curva correspondiente al ensayo con agua destilada es la más pronunciada y la correspondiente a la disolución de Na_3PO_4 , la menor. Es decir, durante este periodo de tiempo, la mayor evaporación corresponde al ensayo con agua destilada, y la menor, al realizado con una disolución de Na_3PO_4 .

De la misma forma, del estudio del tramo de curva correspondiente al tercer día de evaporación, se observa que la curva correspondiente al ensayo con agua destilada es prácticamente horizontal, así que hay muy poca agua evaporando y la isoterma que cubre la parte externa a la probeta es muy estrecha. La mayor pendiente corresponde al ensayo realizado con la disolución de Na_3PO_4 , y, por tanto, es éste el material que evapora más cantidad de agua en este periodo y la isoterma que cubre su entorno es la más densa.

Las conclusiones obtenidas a partir de análisis mediante Termografía Infrarroja Selectiva se refieren únicamente a la velocidad de evaporación de las distintas disoluciones salinas y están de acuerdo con los resultados obtenidos a partir de las curvas de pérdida de peso de los mismos materiales.

Los ensayos relativos a procesos de evaporación y succión capilar en probetas de escayola, ponen de manifiesto los distintos comportamientos que puede adoptar un material cuando se modifica el tipo de disolución que actúa sobre él. El análisis se centrará inicialmente en el estudio de las pérdidas de peso presentadas en la figura III.88 por ser éstos los resultados más significativos.

Las pérdidas de peso se evaluaron considerando el contenido neto de agua en la probeta al sacarla de la disolución (peso de la probeta saturada de agua menos el peso de

la probeta una vez secada en estufa y alcanzada la temperatura ambiente) como el 100% de agua absorbida y cuantificando, a partir de este valor, la evolución de dicha pérdida. Todos los ensayos se realizaron con disoluciones saturadas.

Si se comparan los resultados presentados en las figuras III.88 y IV.7, se observa una evolución más lenta del proceso de pérdida de peso por evaporación en los casos correspondientes a materiales evaporando (presentados en la figura III.88), lo cual se puede explicar fácilmente por la variación de la superficie libre del fluido respecto al caso de evaporación libre: En el caso de materiales evaporando, los poros se pueden saturar fácilmente con las sales depositadas procedente de la propia evaporación, relentizando, e incluso impidiendo, dicho proceso. Además, la precipitación de sales dentro del material dificultará también la pérdida de agua. De cualquier manera, los resultados de pérdida de peso presentados en la figura III.88, están de acuerdo con las curvas de evaporación de las disoluciones salinas presentadas en la figura IV.7. Durante el primer día, la evaporación más lenta se produce en la probeta que ha permanecido sumergida en la disolución de Na_3PO_4 , como cabía esperar del estudio de las curvas presentadas en IV.7. El tercer día, el proceso más lento corresponde a la probeta que se ha mantenido sumergida en agua destilada porque está alcanzando el equilibrio con el ambiente, mientras que la más rápida corresponde a la sumergida en la disolución de Na_3PO_4 , que es la más alejada, en ese momento, del equilibrio. En la figura IV.7 se puede observar cómo la disolución de NaCl alcanza el equilibrio mucho antes que cualquiera de las otras. Trasladando este comportamiento al caso de probetas de escayola evaporando, se puede deducir que no existen procesos físico-químicos en el interior del material que modifiquen radicalmente su comportamiento en un proceso de evaporación con una disolución de NaCl .

Si ahora se analizan los pesos (en %) alcanzados en el equilibrio (figura III.88), se pueden observar divergencias claras entre las distintas disoluciones (recordar que como el material es siempre el mismo, todas las variaciones entre los curvas se consideran producidas por la disolución salina). La probeta sumergida en agua destilada es la primera en alcanzar el equilibrio y pierde prácticamente todo el agua que había absorbido. En los experimentos realizados con disoluciones salinas, el equilibrio se alcanza para valores de incremento de peso que rondan el 20 % (respecto al peso de la probeta seca). Esto significa la propia disolución está impidiendo la evaporación total del agua contenida en el cuerpo o que la sal depositada aumenta el peso de la probeta.

Durante el tercer día de evaporación la velocidad con la que pierde agua la probeta sumergida en NaCl se relentiza, aunque todavía sufre pérdidas importantes durante bastante

tiempo. Igual que en los resultados presentados en IV.7, el equilibrio se alcanza antes en el caso de la disolución de NaCl y el peso de equilibrio alcanzado es mayor en este caso. En el caso de la probeta sumergida en Na_3PO_4 , las pérdidas ocurridas hasta este momento han sido mucho más pequeñas, lo cual significa una mayor influencia de esta dicha disolución que de la de ClNa durante todo el proceso.

La presencia de sales en el material induce distintos procesos responsables de este fenómeno. La precipitación de sales dentro del material dificultará el proceso de evaporación. Además intervendrá el tiempo transcurrido desde el inicio del ensayo: la cantidad de sales precipitada será mayor para tiempos mayores. Esto explica por qué en las curvas de pérdida de peso en el caso de disoluciones salinas no sólo se produce una disminución de la velocidad de evaporación sino también un achatamiento de la curva que es tanto mayor cuanto mayor es el tiempo transcurrido. La precipitación de sales favorece, además, la entrada de agua en el material debido a la higroscopicidad de las mismas. Así, se está produciendo un equilibrio dinámico entre el agua que el material es capaz de evaporar y el agua que absorben las sales presentes en él.

Finalmente, el grado de compactación y la densidad de las sales una vez precipitadas modifica también de forma importante la capacidad del material para evaporar el agua que contiene: Cuanto más empaquetadas quedan las sales precipitadas en el material, mayor capacidad tendrán para tapar sus poros y, por tanto, más dificultarán la evaporación. Los ensayos mostrados en la figura IV.7 pusieron de manifiesto la distinta forma de cristalización de las sales estudiadas. Mientras que en el caso del Na_3PO_4 la sal precipitada forma cristales más o menos grandes, en el caso del NaCl, se forman cristales mucho más pequeños. Así que, las sales de NaCl precipitadas en los poros del material los deben cubrir casi totalmente, mientras que en el caso de Na_3PO_4 el gran tamaño de los cristales impedirá el empaquetamiento de la sal, quedando huecos entre ella y la pared del poro que permiten la evaporación.

En la figura IV.8, se presentan una serie de probetas de yeso que han sido sometidas a procesos de succión capilar con las mismas disoluciones salinas ya estudiadas y, posteriormente, se han dejado secar en condiciones atmosféricas normales.

En dicha figura, se observa fácilmente la capa de sal que cubre la probeta sobre la que ha actuado la disolución de Na_3PO_4 . En el caso de trabajar con disoluciones de NaCl, la capa que cubría la probeta era bastante más delgada, aunque también cubría toda la superficie de la misma.

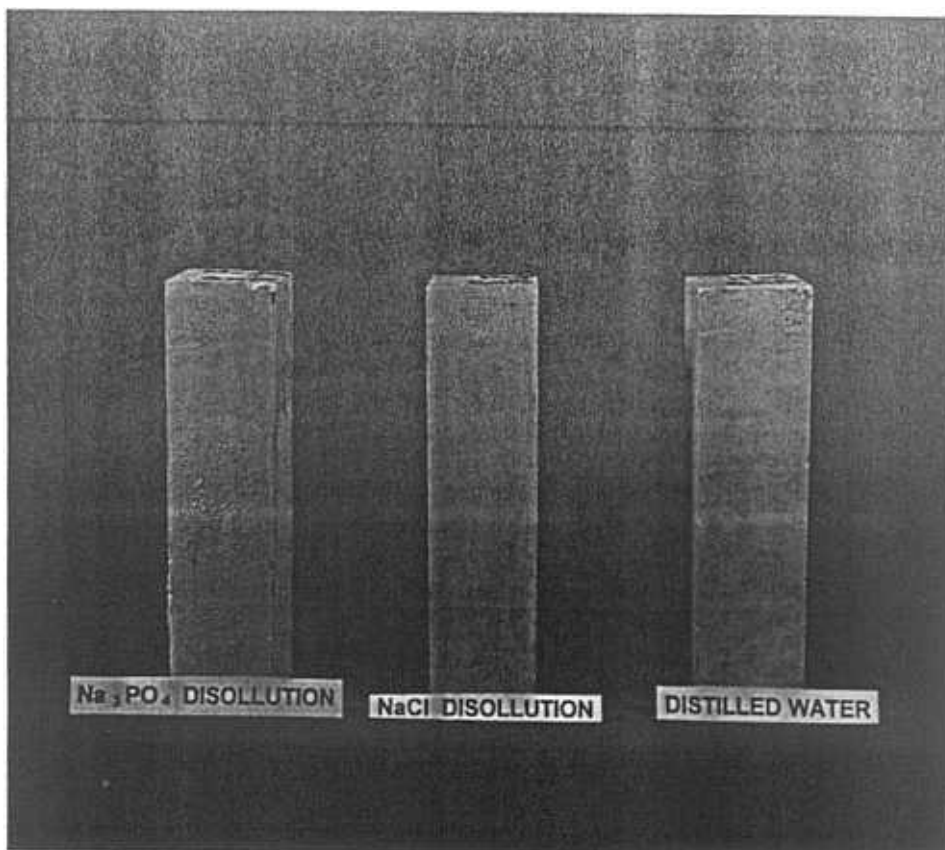


Figura IV.8 *Probetas de escayola sometidas a procesos de succión capilar con las disoluciones estudiadas.*

Se puede considerar que este mismo fenómeno, en menor escala, se produce en el interior del material. Por eso, el proceso de evaporación en la probeta sumergida en Na_3PO_4 será más lento desde el primer momento. La sal precipitará en mayor cantidad en este caso, favoreciendo el taponamiento de los poros e impidiendo la pérdida de agua. Además, este fenómeno será tanto más importante cuanto más agua haya perdido el material ya que quedará más sal retenida en él.

En la curva de pérdida de peso correspondiente a la disolución de NaCl (figura III.88), existen dos tramos claramente diferenciados. A partir del tercer día, la curva tiende lentamente al equilibrio. En este momento la existencia de cristales precipitados dentro del material influye de forma relevante en la evaporación. Sin embargo, en el caso de la disolución de Na_3PO_4 , el proceso mantiene un comportamiento muy similar pero con un retraso considerable en el tiempo respecto al caso de NaCl . Las diferentes sales presentan un comportamiento similar, pero alargándose más o menos el tiempo en función del tipo de sal.

En los ensayos realizados para la obtención de las curvas presentadas en IV.7 se observó que, en iguales condiciones, la precipitación de sales en el caso de Na_3PO_4 se inicia antes, formándose cristales de tamaño bastante mayor que en el caso del NaCl . Por lo tanto, el proceso será más lento, desde tiempos muy pequeños, en este caso. Ahora bien, el mayor tamaño de cristal formado ofrecerá menor resistencia a la evaporación. Por eso, en las curvas de evaporación presentadas en III.88 no se observan cambios bruscos de comportamiento.

La discusión hasta aquí presentada, correspondiente al estudio de curvas de pérdida de peso cuando probetas de escayola se someten a procesos de evaporación con distintas disoluciones salinas, está completamente de acuerdo con los resultados obtenidos a través de los termogramas correspondientes a tales procesos, que fueron discutidos en el punto IV.1.3. Ha sido posible obtener las mismas conclusiones, respecto a velocidades de evaporación y cambios de comportamiento, mediante Termografía Infrarroja Selectiva. Se pone así de manifiesto la validez de la técnica.

En casos como los estudiados, esta técnica no es, posiblemente, la más adecuada para el análisis del proceso, ya que se han obtenido los mismos resultados a partir de técnicas y análisis más simples. Sin embargo, en este punto merece la pena recordar que el fin último perseguido a lo largo de la presente investigación es la aplicación de una técnica no destructiva al estudio e identificación de humedades en Monumentos del Patrimonio. En este sentido, la validez de la Termografía Infrarroja Selectiva es innegable ya que permite obtener información sobre el tipo de sales presentes o la velocidad con la que se evapora un material de construcción sin dañarlo. Esto supone ser capaz de saber, en un momento dado, si un elemento constructivo absorbe o evapora agua, a qué velocidad lo hace, si existe una o más fuentes de humedad (en función del tipo de sal disuelta) o si se producen disoluciones del material.

Todo lo explicado hasta este momento es igualmente aplicable a los procesos de capilaridad. Del análisis de los termogramas correspondientes a dichos resultados (figuras III.109 a III.117) se concluía que había una mayor homogeneidad de la zona húmeda en el caso de utilizar agua destilada como disolución. Esto es, ahora, fácilmente explicable: Cualquier proceso de succión capilar lleva involucrado un proceso de evaporación y la presencia de disoluciones salinas relentiza estos procesos porque las sales perturban los movimientos del agua en el interior del material. En casos como los aquí presentados, las sales se concentrarán, principalmente, en la parte más baja de la probeta (donde se ha situado la fuente de entrada de agua) y, por tanto, impedirán el paso de agua, quedando ésta

más concentrada en dicha zona.

CAPILARIDAD HORIZONTAL EN PLACAS DE ESCAYOLA

Mediante los ensayos relativos a los procesos de penetración de agua presentados en el apartado III.2.4.a. se pretendía evaluar la validez de una de las consecuencias extraídas a partir de la modelización matemática de los procesos. Según lo anteriormente obtenido, el comportamiento de un material en el cual esta penetrando agua debe ser independiente de si se está produciendo un proceso succión capilar (fuente inferior) o bien horizontal (fuente en un lateral).

Los ensayos se realizaron únicamente sobre escayola ya que, en este caso y dada la disposición del ensayo, era necesario considerar placas suficientemente grandes del material a estudiar. Dadas las características físicas de los materiales de los que se disponía, únicamente la escayola presentaba características de porosidad tales que permitieran el paso de agua en tiempos suficientemente cortos. Como ya se ha comentado en el apartado IV.2.2, no es posible obtener valores teóricos de los coeficientes en el caso de materiales artificiales, ya que solamente en estos casos es posible obtener valores tabulados de sus características físicas. Sin embargo, es posible establecer cierto paralelismo entre los resultados obtenidos en estos ensayos y los relativos a procesos de evaporación y succión capilar, comentados en el apartado IV.2.2, a partir de la evolución de las curvas de la temperatura superficial (figura III.107) y de pérdida de peso (figura III.108).

Como se comentó en el apartado III.2.3, la placa C se utilizó únicamente para evaluar la posible influencia de la temperatura ambiental en el proceso analizado. En el caso de materiales como la escayola de gran porosidad y en los que, por lo tanto, los procesos de penetración de agua son muy rápidos, estas posibles perturbaciones son muy importantes en la primera parte del ensayo (cuando sólo se está produciendo una absorción de agua por el material seco), ya que cualquier variación en las condiciones externas puede producir importantes perturbaciones en el material. Como se puede observar en la figura III.107, la temperatura de la placa C permanece dentro del margen de error establecido para la termocámara, por lo tanto, no existen perturbaciones externas en el material.

La placa B, inicialmente seca, se colocó delante y en contacto con otra de iguales características (llamada A) y saturada de agua. Las curvas presentadas en las figuras III.107 y III.108 presentan los procesos ocurridos en cada una de ellas. Tanto la curva de temperatura como la de pérdida de peso correspondiente a la placa A se pueden identificar

como representativas de un proceso de evaporación (son formalmente igual que las correspondientes a este tipo de proceso que se presentaron en el apartado III.2.3). En lo relativo a la placa B, la curva de temperatura se puede identificar fácilmente con la correspondiente a un proceso de succión capilar (ver figuras presentadas en III.2.3). Si se estudia ahora la curva de variación de peso de dicha placa, se observa cómo el material absorbe agua procedente de la placa A aproximadamente durante las 10 primeras horas y, posteriormente, se inicia un proceso de evaporación. Dicho proceso es más rápido que el equivalente ocurrido en la placa A, hecho que se explica por la falta de ventilación en la placa posterior.

EVAPORACIÓN CON AGUA DESTILADA A 40 °C

Se ha comentado ya que los ensayos de evaporación con agua destilada a 40 °C se desarrollaron con objeto de verificar la condición de energía radiada constante, al variar la temperatura, impuesta en el modelo. Como el planteamiento general del presente trabajo está enfocado a la aplicación de la técnica a detección de humedades en Monumentos del Patrimonio, es lógico pensar que, en la mayoría de los casos, las posibles fuentes de agua estarán a temperaturas iguales ó inferiores a la ambiente. Por eso, se consideró esta temperatura (40 °C) lo suficientemente alta como para estudiar las posibles desviaciones ocurridas en el material.

Los ensayos no se pudieron realizar en todos los materiales estudiados, ya que, en algunos casos se disolvía parte del él al mantenerse sumergidos en agua durante el periodo establecido para la realización del ensayo. En la figura IV.9 se muestra la pérdida de peso neta medida en probetas del mismo material sumergidas (durante el mismo periodo de tiempo) en agua destilada a 20 y 40 °C respectivamente.

Estas curvas ponen de manifiesto que el aumento de temperatura implica, por una parte, menos cantidad de agua en el material, y por otra, una evaporación más rápida de la misma. Para entender esto hay que tener presente que una misma concentración de agua a temperaturas distintas implica distintas tensiones superficiales del fluido. Esto quiere decir que a medida que aumenta la temperatura disminuye el efecto de capilaridad y aumenta el de evaporación. Por ello, el contenido de agua es menor a mayores temperaturas y ésta se evapora más rápidamente

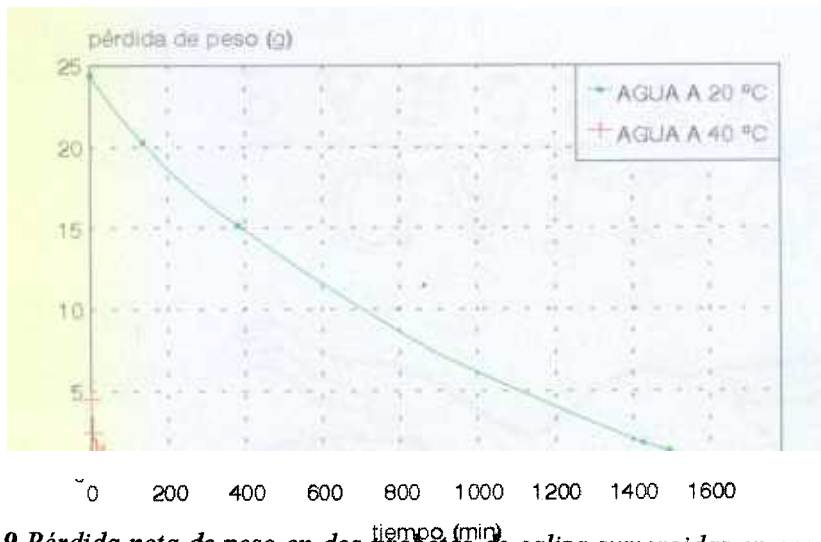


Figura IV.9 Pérdida neta de peso en dos probetas de caliza sumergidas en agua destilada a 20 y 40 °C respectivamente durante el mismo periodo de tiempo

Los resultados obtenidos para cada material estudiado se presentaron en las figuras III.68 y III.69. Del análisis de las curvas de variación de temperatura superficial del material (figura III.66) se observa, en primer lugar, una aceleración del proceso de evaporación: los materiales alcanzan su temperatura de equilibrio, en general, a tiempos más cortos que el mismo material sumergido en agua a 20 °C (hecho lógico debido a la mayor presión de vapor). Además, se observa una clara influencia de la porosidad del material en su capacidad para absorber y evaporar agua. En casi todas las curvas (salvo las correspondientes al mortero de reparación III y a la caliza) ha desaparecido el mínimo de temperatura, descendiendo ésta únicamente hasta su valor de equilibrio. En el caso de la caliza y, en menor grado, en el del mortero de reparación III, el descenso hasta el mínimo de temperatura existe, aunque es mucho más rápido que en el caso de agua a 20 °C. De las curvas referentes a la pérdida de peso del material (figura III.69) se obtiene la misma conclusión explicada antes: los materiales sufren procesos más rápidos de evaporación que en el caso de agua a 20 °C. Además, el fenómeno presentado en la figura IV.9, referente a la variación de agua absorbida al variar la temperatura de la misma, ocurría en todos los casos, aunque se ha elegido éste al ser más evidente la diferencia entre ambos.

Las máximas variaciones de temperatura ocurren en la probeta de caliza, porque es éste el material más poroso de todos los estudiados y, por tanto, el que más cantidad de agua absorbe y más lentamente la evapora. Se ha elegido este material para estudiar las diferencias de radiación emitida por representar el caso más desfavorable de todos los tratados.

Si se considera el caso de evaporación con agua a 40 °C, la diferencia de temperatura superficial medida es de aproximadamente 26 °C y corresponde con diferencias de radiación medida por la termocámara de 11.9 UI, que corresponde con una diferencia de temperatura de 18.5 °C. La diferencia de radiación emitida (en todo el espectro) entre ambos puntos es de aproximadamente 0.5 W m⁻².

EVAPORACIÓN CON DISOLUCIONES SALINAS A 20 °C

Los ensayos correspondientes a medidas cuantitativas en probetas sometidas a procesos de evaporación con distintas disoluciones salinas se presentan en el apartado III.2.3.c. Las figuras III.89 a III.95 muestran la evolución de la temperatura superficial de cada material cuando éste ha sido sumergido en las distintas disoluciones consideradas. En las figuras III.96 a III.102 se muestran las curvas de pérdida de peso de cada material. Estas curvas se obtuvieron ajustando los valores experimentales a funciones como las obtenidas a partir de la modelización matemática del proceso mediante un programa informático adecuado. Los coeficientes obtenidos se mostraron en las tablas III.19 a III.32.

Los coeficientes de regresión obtenidos, en este caso, son menores a los obtenidos para procesos con agua destilada. Esto indica que, como era de prever, la presencia de sales en el agua complica el proceso, tanto en el caso de evaporación como en el de capilaridad.

En el estudio de las curvas, se puede seguir un razonamiento equivalente al presentado para el estudio de probetas de escayola. Igual que entonces, se considera como comportamiento patrón de evaporación de las disoluciones el presentado en la figura IV.7 que corresponde con las pérdidas de peso obtenidas en disoluciones 1 M de las sales seleccionadas a 20 °C evaporando libremente. Si dichas curvas se comparan con las presentadas en el capítulo III (figuras III.96 a III.102) se puede observar, de nuevo, cómo la presencia de sales disueltas perturba el proceso de evaporación en el material tanto respecto al caso de evaporación libre de la misma disolución salina (comparándola con IV.7) como respecto a la evaporación de la misma probeta sumergida en agua pura. Como ya se ha explicado antes, la presencia de sales en el material puede modificar de diversas formas la porosidad del mismo: precipitación en sus poros, ruptura de paredes al cristalizar, etc. El efecto de estos procesos sería similar al observado en un sistema de capas de distinta porosidad sometido a procesos hídricos. En las figuras antes presentadas, se pueden encontrar distintos casos explicables según estos procesos. En todos, las curvas de pérdida de peso obtenidas con distintas disoluciones salinas se equilibran para porcentajes de peso mayores que en el caso del agua destilada. Por lo tanto, la existencia de sales impide la

evaporación total de agua del material en dos sentidos: alterando el equilibrio hídrico y aumentando el peso del material por deposición de sales..

Se ha hecho mención ya en puntos anteriores a la altas higroscopicidades de las sales utilizadas en estos experimentos. Esta propiedad favorece la absorción del entorno. Por lo tanto, se establece un equilibrio dinámico entre la cantidad de agua que el material evapora y la cantidad que absorbe del entorno por la presencia de sales cristalizadas. Además, la evaporación de agua en el material produce una cristalización de sales en el mismo. También se ha explicado ya que estos cristales precipitados producen taponamiento de poros que impide la evaporación. El tipo de cristal formado en cada caso será de importancia vital en este proceso. Cristales pequeños quedarán muy compactados dentro de los poros cubriendo gran parte de su superficie, mientras que cristales grandes permitirán la evaporación de parte del agua a través de huecos entre ellos y las paredes de los poros.

En algunos casos concretos (disolución de Na_3PO_4 actuando en un mortero de cal ó disolución de Na_2SO_4 en la caliza) las diferencias de peso de equilibrio son muy importantes. En estos casos concretos, los compuestos poseen distintas formas morfológicas con distintos contenidos de agua. En el paso de una a otra forma se producen reacciones químicas (de hidratación o deshidratación) que se activan para variaciones muy pequeñas de humedad relativa a una temperatura dada. Por ejemplo, el Na_2SO_4 en $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ a 20°C se produce cuando la humedad relativa supera el 60 %. Por lo tanto, además de todos los fenómenos hasta ahora explicados, en estos dos casos concretos, se están produciendo este tipo de reacciones en los poros del material donde existen sales precipitadas y las variaciones de humedad relativa varían continuamente por causa de evaporaciones, absorciones, precipitaciones, etc.

Las curvas de temperatura superficial sufren igualmente variaciones importantes respecto al caso de evaporación con agua pura. En los materiales con menor porosidad se producen las perturbaciones más importantes debido a la propia naturaleza de los mismos. En estos casos, los procesos de evaporación ocurren muy rápidamente y, por ello, cualquier perturbación introducida por la presencia de sales tendrá una influencia muy relevante en el proceso (no ocurrirá igual en el caso de materiales con porosidades relativamente altas, donde el proceso ocurre más lentamente y el material tiene más tiempo para recuperarse de las perturbaciones producidas). Así, por ejemplo, se observa como las curvas correspondientes al mortero de cal o a la caliza presentan curvas con comportamientos bastante parecidos entre sí (para las distintas disoluciones salinas utilizadas) mientras que en el caso de los morteros de cemento (incluidos los de reparación) y el granito no se

observa un comportamiento homogéneo en los procesos ocurridos con las distintas disoluciones.

Si se estudian ahora los procesos de capilaridad presentados en las figuras III.118 a III.124, se pueden obtener las mismas conclusiones antes explicadas. En primer lugar, se obtienen variaciones de temperatura superficial en el punto situado a 5 cm en todos los casos, aunque el periodo de tiempo en el que se realizaron las medidas fue el mismo que el caso del agua destilada (recordar que en el caso de utilizar agua destilada sólo se obtenía en el caso de la caliza y del mortero de cal). Esto indica una mayor movilidad del agua dentro del material cuando contiene algún tipo de ión disuelto. En cualquier caso, existen una diferencia de temperatura bastante importante entre los puntos medidos (para un mismo material y disolución) que se puede justificar según lo obtenido en puntos anteriores: Una parte importante de las sales contenidas en la disolución queda retenida en la parte más baja del material impidiendo el ascenso del agua. Así, la parte más baja, donde se han concentrado las sales, contiene mayor cantidad de agua (y se registran temperaturas más bajas). En el caso de agua destilada, la humedad se reparte más homogéneamente dentro del material, pero alcanza alturas menores que en el caso de trabajar con disoluciones salinas.

Además de otros mecanismos cuando hay iones disueltos aparecen fenómenos de difusión. Estos fenómenos se manifiestan por una movilidad de los iones hacia la parte del material donde la concentración de los mismos es menor, buscando un equilibrio de concentraciones entre ambas partes. En el caso concreto aquí estudiado, los iones tenderán a ascender, porque los fenómenos antes explicados favorecen la concentración en la parte más baja de la probeta. Este movimiento de iones actúa, por una parte, arrastrando agua procedente del proceso de capilaridad a alturas mayores y, por otra, favoreciendo la absorción de agua del entorno.

De todo lo anterior se observa como la presencia de sales disueltas en agua complican de forma importante los procesos hídricos dentro de un material de construcción. En la aplicación del modelo matemático obtenido, se consideró suficiente la utilización de los dos primeros términos de la serie. En este caso, sería necesario introducir algún otro término para obtener un buen ajuste de los datos experimentales. Además, sería necesario introducir parámetros que explicaran la variación de la porosidad del material producida por la presencia de sales, la movilidad de las mismas dentro el material, etc.

En el caso de la presencia de agua en edificios, el proceso será aún más complicado. Por una parte, un elemento constructivo se puede considerar casi siempre como un sistema

de capas de distinta porosidad y comportamiento hídrico. Además, el agua que llegue a la zona que se desea estudiar contendrá siempre distintos iones procedentes tanto de la fuente como de la disolución parcial de los materiales que ha atravesado. Este hecho modificará los resultados obtenidos respecto al caso de medidas en el laboratorio. Además, en muchos casos, las zonas estudiadas habrán sufrido distintos periodos de secado/mojado contribuyendo a la modificación de las características físicas del material. Por eso, cabe esperar diferencias más ó menos importantes en los resultados obtenidos en estos casos (respecto a las medidas realizadas en el laboratorio) y no siempre será inmediata la aplicación de las conclusiones hasta aquí obtenidas.

IV.3.- Aplicación a la detección de humedades en Monumentos.

IV.3.1.- Termografía Infrarroja Clásica

Como ya se ha explicado en capítulos anteriores, los ensayos termográficos realizados "in-situ" se llevaron a cabo durante todo el periodo que duró el desarrollo del presente trabajo de tesis y sirvieron para poner de manifiesto no sólo las ventajas asociadas al empleo de una técnica de ensayo no destructiva sino las limitaciones del equipo así como sus posibles mejoras. En este primer apartado, se presentan los primeros ensayos realizados, en los que se usó solamente la termocámara (sin ninguno de los elementos externos posteriormente desarrollados). Con estos ensayos, se pretendía evidenciar tanto la capacidad de medida del equipo como la forma en la que actuaban distintos factores externos en las medidas termográficas.

MEDIDAS REALIZADAS EN EL CLAUSTRO DE LA CATEDRAL DE TOLEDO

Los ensayos realizados en el Claustro de la Catedral de Toledo, muestran la capacidad de la Termografía Infrarroja para la detección tanto de la humedad presente en un elemento de construcción dado como de su origen en determinadas condiciones. Si el estudio termográfico se restringe a la zona de granito mostrada en la figura III.125, se podría pensar que se trata de un caso de succión capilar. En el termograma correspondiente a esta zona (figura III.126) se observa un gradiente en la escala de grises (recordar que zonas más oscuras corresponden con zonas de menor radiación que, en este caso, se pueden identificar con zonas más mojadas). Este mismo gradiente se da también en los valores puntuales de emisividad y temperatura de superficie obtenidos: Las zonas más bajas (siempre correspondientes a la zona de granito gris) tienen menores valores de temperatura de

superficie y emisividades mayores. Sin embargo, en la zona por debajo de las placas grisáceas no se detectaron variaciones de radiación emitida y, por tanto, el fenómeno no se puede asociar con un proceso de capilaridad vertical.

Por otra parte, la humedad estaba localizada en una zona de granito, donde el índice de sales depositado era bajo y, por lo tanto, no existían zonas muy higroscópicas. Se descartaba, de esta forma, que la humedad fuera debida a procesos de condensación desde el ambiente sobre la pared. En consecuencia, la posibilidad que se planteó es que el agua pasase a través de la pared por "capilaridad horizontal". Planteando esta hipótesis, se indagó sobre posibles pasos de agua, existencia de cámaras, etc detrás de la pared analizada. Esto permitió descubrir que esta zona fue restaurada hace algunos años. Inicialmente, estaba formada por un zócalo de granito (correspondiente con la zona de tono marrón) y una zona de caliza tallada que presentaba importantes daños producidos por la humedad.

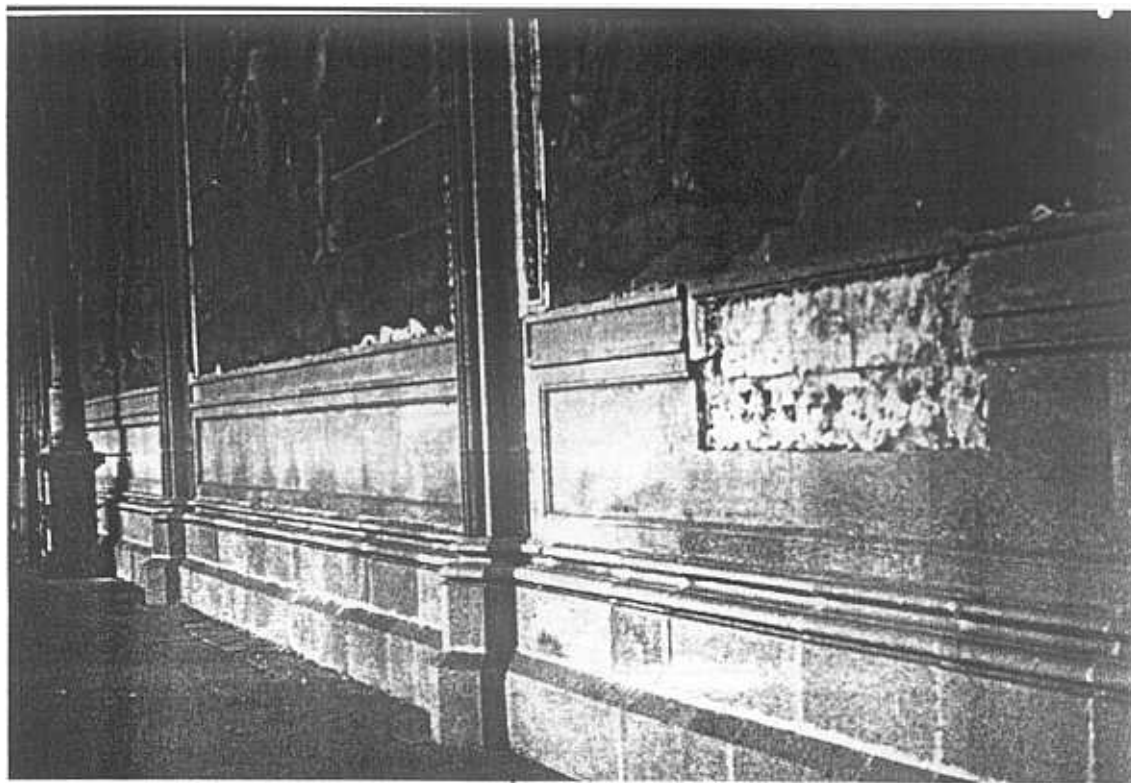


Figura IV.10 Aspecto del Claustro de la Catedral de Toledo.

Durante los trabajos de restauración esta zona se cubrió con placas de granito (correspondiente a la zona gris) quedando una pequeña cámara de aire entre ambos materiales (caliza y placas de granito). Dicha cámara se ha saturado de humedad procedente de la caliza y ha condensado en la parte inferior de la cara interna de la placa de granito que está más fría por estar en contacto con el exterior. A partir de este momento, se empieza a producir una penetración de agua

en el material que es observable desde el exterior. En la figura IV.10 se muestra la zona estudiada en la que se ha levantado una de las placas de granito.

Medidas realizadas en La Capilla Mozárabe de la Catedral de Toledo

La Capilla Mozárabe de la Catedral de Toledo fue otra de las estancias estudiada mediante Termografía Infrarroja. Esta zona se seleccionó por presentar un significativo deterioro aparente (presentado en la figura III.127). Las primeras medidas, destinadas a la localización de zonas con daños reales mostraron un único área con posibles daños que, curiosamente, se encontraba en una zona aparentemente en buen estado de conservación (figura III.128).

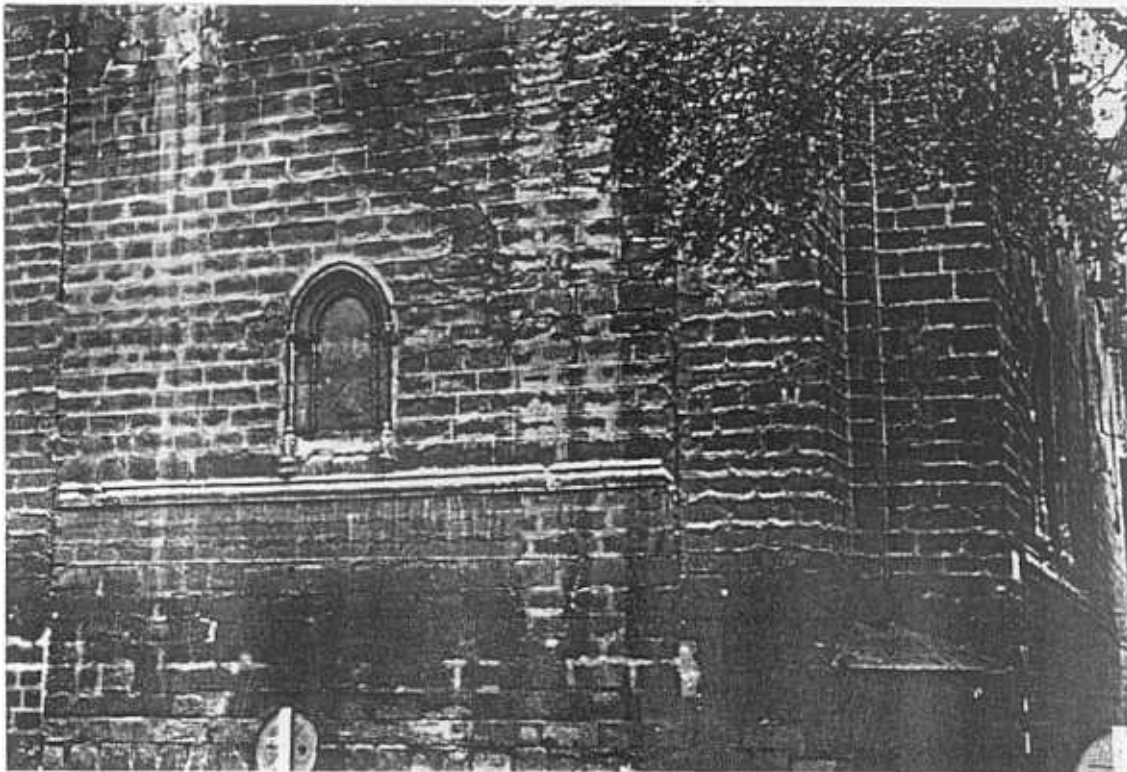


Figura IV.11 Aspecto del muro exterior del muro de la Capilla Mozárabe en la Catedral de Toledo.

En la figura III.129 se muestra el termograma correspondiente a esta zona. La forma de la mancha hizo pensar inicialmente en la existencia de alguna rotura en el sistema de recogida de aguas de la Catedral (el día que se realizaron las medidas había fuertes lluvias y viento). Una inspección en el exterior puso de manifiesto la existencia de una ventana tapiada de la que no se tenía constancia (mostrada en la figura IV.11). Realmente, se estaba registrando un defecto en el aislamiento del muro en la zona de la ventana (de menor espesor).

Medidas realizadas en las estancias del IET

Las medidas aquí presentadas se realizaron en una habitación dañada debido a una rotura en la red de saneamiento (ver figuras III.130 y III.131). En este caso, por lo tanto, se conocía el origen de la humedad. El ejemplo presentado, cuyos termogramas se muestran en las figuras III.132 y III.133, se refiere a los efectos de atenuación producidos cuando la distancia entre cámara y objeto es muy grande y que ya han sido explicados en el apartado III.1.3. En este caso, se tomaron medidas termográficas de la zona presentada en la figura III.129 desde distancias de 7 y 10 metros aproximadamente. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla III.47. Se observan variaciones importantes en las medidas realizadas sobre un mismo punto, sobre todo en los valores de temperatura superficial. Se pone de manifiesto la imposibilidad de tomar medidas cuantitativas cuando la distancia entre cámara y objeto es muy grande. Es también importante señalar que se mantienen los gradientes de temperatura superficial y emisividad en ambos casos. Por lo tanto, si es posible estudiar la evolución de una zona dañada, tanto a lo largo del tiempo como sobre la superficie.

IV.3.2.- Termografía Infrarroja Selectiva

Medidas en la iglesia de Vilar de Donas en Lugo

La Iglesia de Vilar de Donas está situada en una zona con gran humedad. Actualmente, el edificio se encuentra en muy mal estado de conservación como se observa en las figuras III.134 y III.135. En la tabla III.49 se presentan los datos ambientales tanto externos como internos del día en el que se realizaron las medidas. Debido a dichas condiciones, la toma de datos mediante Termografía Infrarroja Clásica resultaba prácticamente imposible, dado que tan altos contenidos de humedad en la atmósfera contribuían a la atenuación casi total de la señal emitida. Por eso, en esta zona sólo se tomaron medidas termográficas usando filtros interferenciales.

Igual que en otros casos, el objetivo de los ensayos era determinar el origen de la humedad presente si la hubiera.

En la figura III.137 se presenta el termograma obtenido usando el filtro de CO₂. Se obtiene una zona prácticamente homogénea de emisión. Sin embargo, cuando se usa el filtro de agua (figura III.136) dicha homogeneidad desaparece permitiendo distinguir al menos dos zonas distintas de radiación emitida.

En el termograma mostrado en la figura III.136 se está recogiendo toda la señal emitida por el agua (incluida la presente en el ambiente). Según se mostró en la tabla III.49, la humedad relativa en el interior de la iglesia era muy alta (del orden del 80 %) por lo tanto, aún para distancias entre cámara y objeto muy pequeñas, existía gran contenido de agua en el camino óptico recorrido por la radiación y es esto lo que se pone de manifiesto en el termograma obtenido.

En el caso del filtro de CO₂, toda la señal procedente de la emisión del agua ha desaparecido (recordar que este filtro trabaja en la banda comprendida entre 4 y 4.5 μm), por eso, se obtiene una emisión prácticamente homogénea de toda la zona estudiada, una vez anulados los efectos de dicha emisión. Se puede concluir que todo el fenómeno detectado mediante termografía infrarroja está producido por efecto del agua en el material.

Si, además, el estudio se centra en lo observado a partir del uso del filtro de agua, se observa una única zona de menor radiación (más oscura) muy homogénea por lo tanto, se puede concluir que se trata de una condensación del agua existente en la atmósfera.

IV.3.3.- Medidas con radiación externa controlada

Las primeras medidas realizadas usando una fuente de radiación externa controlada se hicieron en la Basilica Pitagorica di Porta Maggiore en Roma (figuras III.138 y III.139). Como se ha comentado en el capítulo III.3 estaban orientadas a la localización de posibles accesos, hoy día sellados, a una planta inferior. La fuente externa utilizada es la presentada en el capítulo III.1.4. Mediante su uso se intentaban localizar zonas de distinta conductividad térmica en los muros de la iglesia. Las medidas termográficas realizadas usando fuentes externas de radiación pusieron de manifiesto la existencia de anomalías en los muros no detectables mediante Termografía Infrarroja convencional. El estudio posterior de estas zonas puso de manifiesto la existencia de humedades. Las figuras III.140 y III.141 corresponden a los termogramas obtenidos en la zona de estudio, sin y con radiación externa respectivamente. La comparación entre ambas fotografías pone de manifiesto la existencia de zonas anómalas observables solamente en la figura III.141.

A partir de los resultados presentados en el ejemplo anterior, correspondientes a la Basilica Pitagorica di Porta Maggiore, se empezó a desarrollar un método de trabajo adecuado para el uso de Termografía Infrarroja con fuentes de radiación externa controlada. Las primeras medidas "in-situ" se desarrollaron en la Iglesia de Santa Maria Porta Paradisi en Roma (figuras III.142 y III.143). Esta iglesia está situada en el centro de la ciudad, en una

zona muy próxima al río Tiber. Dada su situación, los valores de humedad relativa en el exterior del edificio son muy elevados (del orden del 70 % el día en el que se realizaron las medidas), aunque, mediante procesos de ventilación, se han conseguido humedades relativas en el interior próximas al 50 %.

La zona del templo estudiada se muestra en la figura III.143. El análisis mediante Termografía Infrarroja Clásica no aportó ningún resultado, posiblemente, porque se intentaban registrar variaciones demasiado pequeñas de radiación. Por eso, se optó por el uso de fuentes externas de radiación, capaces de favorecer la radiación sobre todo en las partes mojadas. Las medidas usando estas fuentes se realizaron manteniendo tanto la cámara como la fuente a una distancia muy próxima del material (aproximadamente de 0.5 m) para evitar en lo posible la emisión de agua en la atmósfera. En la figura III.144 se presenta un termograma de la zona estudiada tomado usando la fuente de radiación externa. Existe, en primer lugar, una zona clara situada en el ángulo inferior derecho de la imagen. Esto indica que se estaban produciendo efectos de reflexión de la radiación (las zonas donde se producen efectos de reflexión aparecen como puntos brillantes en la imagen que se desplazan al cambiar la posición de la fuente). Esta zona corresponde a un área restaurada en la que se ha aplicado algún tipo de cobertura hidrófuga para proteger el material. Además, en puntos más altos de la superficie, se pudieron localizar zonas dañadas por la humedad.

IV.3.4.- Uso combinado de las técnicas

Como último ejemplo de aplicación de la Termografía Infrarroja se han presentado los resultados obtenidos en la Capilla de Santa Tecla en la Catedral de Burgos. En este caso, usaron todas las técnicas disponibles para el estudio de humedades. Las medidas se realizaron sobre un muro de granito, cuya ubicación se muestra en la figura III.145. Como se ha explicado en el punto III.3.4, se pretendía determinar el origen de las humedades presentes en dicha Capilla.

Se realizaron medidas usando todos los filtros interferenciales de los que se disponía así como la fuente de radiación externa. Mediante el uso del filtro de agua se pudo detectar que la humedad presente en la Capilla tenía su origen en el flujo de vapor proveniente de la habitación continua. Mediante el uso combinado de dicho filtro y de la fuente externa, era posible observar el flujo vapor procedente de la puerta (dicho flujo desaparecía casi completamente al cerrarla). Esta imagen no pudo ser obtenida.

Sin embargo, se pueden obtener las mismas conclusiones a partir del estudio de los

termogramas obtenidos sin filtro interferencial y con el filtro de CO₂. En primer lugar, es importante señalar que todos los termogramas que se analizan en este ejemplo se han tomado con la opción de la termocámara denominada "Modo Invertido". Esta opción permite presentar con tonos más claros las zonas de menor radiación.

En las figuras III.146 a III.149 se muestran los termogramas obtenidos. Si se observa el correspondiente a las medidas realizadas sin filtro interferencial y sin fuente de radiación (figura III.146), se observan unas zonas claras en la mitad izquierda de la imagen que corresponden a daños superficiales en el granito. Se observan, además dos zonas de áreas mucho mayores, claramente diferenciadas. Si se considera ahora el termograma obtenido sin filtro interferencial pero con fuente de radiación externa (figura III.147) se aprecian las mismas zonas dañadas aunque, en este caso, es posible detectar tres niveles importantes de radiación en vez de los dos localizados antes.

Las figuras III.148 y III.149 corresponden al análisis de la misma zona pero se han tomado usando el filtro de CO₂ (con y sin fuente de radiación). En primer lugar, en el termograma obtenido sin usar fuente externa de radiación (figura III.148) no se observan prácticamente variaciones en la radiación emitida por la termocámara. Esto significa que todas las variaciones de radiación recogidas en los casos anteriores (medidas sin filtros interferenciales) están producidas por la presencia de agua. Si se considera el termograma tomado con el filtro de CO₂ y la fuente externa, es posible localizar dos zonas de radiación constante. En este caso, las isoterms no se desplazan hacia el lado derecho de la imagen como ocurría en las medidas tomadas sin filtro sino que son aproximadamente concéntricas. Además, se mantiene la forma de la zona más oscura aparecida en la parte derecha de la imagen.

De todo lo expuesto se pueden extraer dos conclusiones importantes. En primer lugar, prácticamente todo el agua detectada proviene de un flujo de vapor cuya fuente se encuentra en la habitación continua. Por eso, usando el filtro de agua se observaba el movimiento del vapor y, en el caso de medidas sin filtro interferencial, las zonas menos radiantes (más mojadas) se encuentran en la parte izquierda de la imagen (más próximas a la puerta). Esta zona que según el termograma obtenido sin fuente de radiación externa es bastante homogénea, está formado por dos zonas muy claramente diferenciadas cuando se usa una fuente externa de radiación (comparar figuras III.146 y III.147). La superficie sobre la que se medía estaba cubierta por una capa de granito poco pulida. Es posible que en estas zonas próximas a la puerta se esté reteniendo una cantidad de vapor muy pequeña (porque hay muy poca diferencia de radiación entre ambas zonas) que se pone de manifiesto cuando la

radiación externa se refleja sobre ellas.

En el caso de medidas usadas con el filtro de CO₂, los efectos producidos por la presencia de agua se pierden. Se obtienen, por lo tanto, imágenes de radiación muy homogéneas en las que solo se detectan daños o variaciones producidas por fenómenos no relacionados con la existencia de humedad. Es posible, según esto, detectar los piquetes en la superficie de granito (que aparecen como zonas de pequeña superficie y tono ligeramente más claro en la mitad izquierda de la imagen), las juntas entre las distintas placas de granito (aparece una línea vertical en la mitad de la imagen), y zonas donde la rugosidad de la superficie sufre ligeros cambios (zonas oscuras en la mitad derecha de la imagen). A parte de estas pequeñas variaciones, las isotermas cubren toda la imagen obtenida. Además, al aumentar el valor de la misma no se produce un desplazamiento hacia la derecha como ocurría en el caso de las medidas tomadas sin usar filtros interferenciales sino que cubren superficies aproximadamente concéntricas del material.

La figura IV.13 ilustra los resultados obtenidos hasta ahora. Dicha imagen corresponde a un termograma tomado sin filtro interferencial y con fuente de radiación externa en las mismas condiciones que el presentado en la figura III.147 pero, en este caso, se mantuvo abierta la puerta que comunica la Capilla con la habitación.

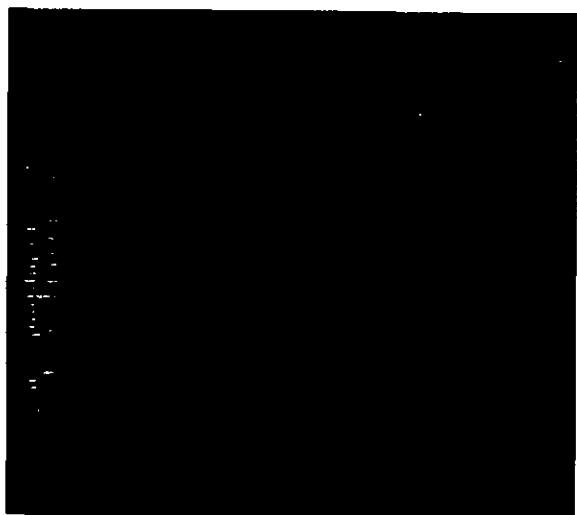


Figura IV.6 Termograma tomado sin filtro interferencial y con fuente de radiación externa cuando se mantiene abierta la puerta de comunicación entre la Capilla y la habitación continua.

Se obtiene una imagen con peor resolución que en el caso anterior. Esto ocurre porque ambos termogramas han sido tomados en el mismo valor de radiación para que las imágenes fuesen comparables. Sin embargo, en este último caso presentado, existe una mayor

variación relativa de radiación emitida en distintos puntos de la superficie. En este caso, se obtienen más zonas de distinta radiación, que se ponen de manifiesto por distintos tonos de gris. Esta diferenciación es más clara en la zona izquierda de la imagen que corresponde con la zona más próxima a la puerta. Es importante notar, además, que la zona más oscura en la parte derecha de la imagen mantiene prácticamente la misma forma que en el caso anterior, aunque ahora, se pueden detectar dentro de ella algunos puntos en los que se están produciendo diferencias en la radiación emitida. Esto significa que en esta zona, además del posible paso de vapor, existen anomalías propias del material (recordar que, en el caso de medidas con el filtro de CO₂, aparecía una zona ligeramente más sombreada en esta zona).

Capítulo V: Conclusiones

En la presente investigación se ha desarrollado una técnica de ensayo no destructiva basada en la termografía Infrarroja al objeto de abordar la problemática relacionada con el estudio de humedades en Monumentos del Patrimonio. Tales técnicas no destructivas han demostrado ser de gran importancia tanto en el problema en el que se centra el presente trabajo como en otros muchos de muy diversa índole relacionados con cualquier variación de radiación térmica ocurrida en materiales.

Dadas las características del trabajo, se consideraron tres grandes unidades a estudiar que se han mantenido en la estructura del texto presentado. Tales unidades se pueden resumir como:

- 1.- Investigaciones en torno a la termografía Infrarroja*
- 2.- Estudio de los materiales de construcción y de su comportamiento con la humedad*
- 3.- Aplicación de la termovisión en edificios.*

1.- CONCLUSIONES ESPECÍFICAS EXTRAÍDAS DE LAS INVESTIGACIONES REALIZADAS EN TORNO A LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA

** A partir de los estudios realizados la Termografía Infrarroja Clásica se muestra como una potente herramienta de análisis no destructivos, pero limitada por distintos factores externo, que en ocasiones pueden llegar a desaconsejar su uso.*

La determinación de la influencia de los distintos factores externos en la información proporcionada por la Termografía Infrarroja Clásica, pone de manifiesto que:

- a) El ángulo de incidencia y factor de forma del objeto a analizar implican variaciones en la señal obtenida inferiores al 5 % lo que permite obviar la influencia de estos parámetros.*

b) La atenuación atmosférica, dependiendo de las condiciones ambientales, origina alteraciones en la señal de mucha importancia. Analizando la influencia de este factor, tanto teórica como experimentalmente, se pone de manifiesto que la **Termografía Infrarroja Clásica** queda limitada a condiciones de baja humedad relativa (< 35 %), concentración normal de CO₂ (300 ppm) y distancias inferiores a los 4 metros. Para condiciones ambientales diferentes será necesario utilizar otras técnicas o corregir los factores mencionados.

c) La radiación de fuentes externas no controladas puede perturbar las medidas con estas técnicas de manera notable. Así, es desaconsejable su uso en exteriores bajo la acción de la radiación solar, o en interiores si hay reflejos de fuentes térmicas no conocidas.

* Con objeto de solventar las limitaciones en la aplicación de la técnica de medida basada en **Termografía Infrarroja Clásica**, y potenciar su capacidad de aplicación, se han desarrollado complementos a la técnica que han dado origen a:

a) La llamada **Termografía Infrarroja Selectiva**. (Selección de bandas por medio de filtros interferenciales específicos)

b) Potenciar la señal utilizando **fuentes de Radiación Infrarroja Externa Controlada**.

La utilización por separado o en conjunto de ambas técnicas, mejora sustancialmente la información proporcionada por **Termografía Infrarroja Clásica**, y aumenta la potencialidad de la técnica y el campo de aplicación de la misma.

* Los resultados obtenidos por medio de **Termografía Infrarroja Selectiva** ponen de manifiesto que la adecuada selección de bandas de detección (en este caso por medio de filtros interferenciales), permite visualizar y analizar diferentes procesos de movimiento de agua en los materiales, y el análisis conjunto de la información proporcionada por cada uno de los filtros, conocer los procesos implicados en un determinado material. Así, por ejemplo, la utilización del filtro en la región de 2.5 a 3 μm , permite visualizar los movimientos del vapor de agua, y en general, todos los procesos de evaporación.

* El segundo de los factores considerado es intrínseco a la propia técnica y está estrechamente ligado al objetivo perseguido en el presente trabajo: Las pequeñas variaciones de radiación emitida por los materiales estudiados en los dos casos límite saturado/seco y

la sensibilidad de la termocámara impiden, en algunos casos, una buena detección de zonas de humedad mediante *Termografía Infrarroja Clásica*. A este respecto se ha estudiado el uso de *fuentes infrarrojas externas de radiación controlada* actuando de tal forma que el equipo de termografía recoja la composición de la radiación emitida por el objeto analizado y la reflejada en su superficie (emitida por la fuente). Se ha demostrado que el uso de tales fuentes no modifica las características propias del material pero sí mejora en gran medida la capacidad de detección de la termocámara.

El estudio relacionado con el uso de *fuentes externas de radiación controlada* se ha completado con una modelización matemática del proceso. Las ecuaciones obtenidas dependen únicamente de las características de la fuente utilizada (conocidas) y de las características del material. A partir de ellas ha sido posible evaluar cuantitativamente el contenido de agua en la superficie de un material, la distribución (cuantitativa) del líquido en la superficie de éste y la evolución de dicha distribución a lo largo del tiempo.

2.- CONCLUSIONES ESPECÍFICAS EXTRAÍDAS DE LAS INVESTIGACIONES REALIZADAS EN TORNO A LAS PROPIEDADES HÍDRICAS DE LOS MATERIALES

Por otra parte y dada la complejidad tanto de los materiales que se estudian como de los procesos que en ellos ocurren, se han estudiado las características físicas de los materiales de construcción y su variación con el contenido de agua.

* El estudio de materiales se ha enfocado, simultáneamente desde dos puntos de vista. Por una parte, se han medido distintas propiedades físicas de los materiales seleccionados mediante distintas técnicas, incluida la *Termografía Infrarroja Clásica*, con objeto de evaluar su relación con el contenido de humedad. Y, por otra parte, se han desarrollado (en una primera aproximación) modelos matemáticos de procesos de evaporación y succión capilar. Para verificar tales modelos se han comparado los resultados teóricos (obtenidos a partir de los modelos) con otros experimentales obtenidos a partir de *Termografía Infrarroja Clásica*. Se obtiene una buena correlación entre ambos resultados.

* En dichos modelos, se ha considerado como parámetro físico variable (además de la temperatura del cuerpo y el contenido de agua), el volumen de poros del material. La *conductividad térmica* del material se ha considerado constante, admitiendo la pequeña capacidad de absorción (no forzada) de agua en la mayoría de los materiales de construcción empleados. Existen, sin embargo, discrepancias de relativa importancia en el caso de materiales de porosidad media, que ponen de manifiesto la necesidad de considerar

variaciones de dicho parámetro en tales casos.

** Finalmente, se han llevado a cabo medidas experimentales en otras situaciones más próximas a la realidad. En este grupo, se pueden incluir los experimentos de capilaridad (horizontal y vertical) y evaporación realizados con distintas disoluciones salinas. De los resultados obtenidos a partir de estos ensayos, se desprende una primera conclusión importante, ya implícita en todo lo anterior, referida a las medidas en edificios: Las medidas realizadas en el laboratorio se pueden considerar una primera aproximación a los procesos reales y ayudan a interpretar los resultados en edificios con toda la complejidad asociada.*

Además, el análisis de los resultados obtenidos en los ensayos realizados con disoluciones salinas pone de manifiesto, de nuevo, la validez de las conclusiones obtenidas en ensayos similares realizados mediante Termografía Infrarroja Selectiva. Las ventajas principales de este último tipo de medidas son su carácter no destructivo, la mayor rapidez del ensayo y el carácter dinámico del mismo.

3.- CONCLUSIONES ESPECÍFICAS EXTRAÍDAS DE LA APLICACIÓN DIRECTA DE LAS TÉCNICAS TERMOGRÁFICAS A EDIFICIOS

Finalmente, y dado el objetivo general planteado en el presente trabajo de tesis, se han presentado distintos ejemplos de aplicación de la técnica a medidas en edificios. Estas medidas se llevaron a cabo paralelamente a los trabajos antes presentados, realizados en el laboratorio. En ellas se ha intentado poner de manifiesto cómo las distintas mejoras de la técnica surgieron a partir de problemas a resolver aparecidos en edificios.

** Los primeros ensayos, realizados en la Catedral de Toledo y en el edificio que alberga el Instituto Eduardo Torroja, usando Termografía Infrarroja Clásica, ponen de manifiesto, por una parte, la potencialidad de la técnica (detección de cámaras cerradas en la Catedral de Toledo) y las limitaciones de la propia técnica. En general, cuando el proceso no ocurre en el laboratorio, y por tanto, no es controlable, las variaciones de radiación recogidas por el equipo pueden estar producidas por gran cantidad de factores diversos, no siempre relacionados con la humedad y será necesario un máximo cuidado en el proceso de medida.*

Además, aún cuando existe la certeza de que se trata de un daño relacionado con la presencia de agua, la manifestación "térmica" del mismo no guarda una relación biunívoca con la causa. A este respecto se ha demostrado la importancia de un conocimiento detallado

de las características de los distintos materiales de construcción y de su comportamiento, al menos cualitativo, cuando varía el contenido de agua en el mismo.

Las fuentes externas de radiación controlada se empezaron a desarrollar con objeto de aumentar las diferencias de señal emitida por el material seco y mojado y así facilitar la detección en los casos en que ambas son muy próximas. Su validez, tanto en laboratorio como en edificios, se ha demostrado en medidas posteriores. Su principal ventaja, estriba en la mejora de la capacidad de resolución de la técnica. El uso de fuentes externas de radiación controlada permiten detectar daños en la superficie estudiada que no son localizables mediante Termografía Infrarroja Clásica.

** Finalmente, a partir de las medidas realizadas en la Catedral de Burgos combinando las distintas técnicas disponibles (basadas todas en Termografía Infrarroja Clásica), se ha podido determinar, de forma unívoca, la causa que genera la presencia de agua en la zona estudiada. En este ejemplo se muestra de nuevo, cómo las conclusiones obtenidas mediante Termografía Infrarroja Clásica no siempre guardan una relación única con la causa que genera el daño y es necesario el uso de técnicas complementarias para determinarlo. En este sentido, la Termografía Infrarroja Selectiva ha sido de gran utilidad ya que permite estudiar el comportamiento del material eliminando el efecto de distintos componentes (vapor de agua o CO₂). La comparación de los distintos comportamientos observados ha permitido detectar el origen del daño unívocamente.*

En este caso, las fuentes de radiación controlada solo se usaron para potenciar la señal recogida por la termocámara. Esta señal es muy débil cuando se usan filtros interferenciales porque su ancho de banda es de, aproximadamente, 0.5 μm y un coeficiente de transmisión de entre el 40 y el 60 %. El uso combinado de fuentes externas controladas y Termografía Infrarroja Selectiva aumenta considerablemente la calidad de la imagen obtenida sin perturbar el objeto estudiado. En las medidas realizadas se pone de manifiesto la gran potencialidad de la técnica cuando se complementa con fuentes externas y filtros interferenciales.

Capítulo VI: Referencias bibliográficas

/1/- **F. Ortega Andrade** "Patología de la Construcción. Humedades en la Edificación." Ed.: EDITAN S.A. (1989).

/2/- **G. Lozano, C. Santolaria, A. Lozano** "Curso de Tipología, Patología y Terpeútica de las Humedades." Distribución: Consultores Técnicos de la Construcción. La Redonda s/n Somio Gijón (1992).

/3/- **L. Aguado y otros** "La Humedad como Patología frecuente en la edificación." Ed.: Colegio de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Madrid. (1993).

/4/- **L. J. Parrot** "Water absorption in cover concrete." *Materials and Structures* Vol. 25 pp 284-292 (1992).

/5/- **K. Nielsen, D. Hoffman** "Moisture Transport in porous building materials." *Proceedings of Science, Technology and European Cultural Heritage.* pp 593-596. Bolonia. Italia (1989).

/6/- **C. Hall** "Water Movement in Porous Building Materials I. Unsaturated Flow Theory and its Applications." *Building and Environment* Vol. 12, pp 117-125 (1977).

/7/- **R. J. Gummerson, C. Hall, W. D. Hoff** "Water Movement in Porous Building Materials II. Hydraulic Suction and Sortivity of Bricks and Other Masonry Materials." *Building and Environment* Vol. 15, pp 101-108 (1980).

/8/- **R. J. Gummerson, C. Hall, W. D. Hoff** "Water Movement in Porous Building Materials III. A Sortivity Test Procedure for Chemical Injection Damp Proofing." *Building and Environment* Vol. 16 n° 3, pp 193-199 (1981).

/9/- **C. Hall** "Water Movement in Porous Building Materials IV. The Initial Surface Absorption and the Sortivity." *Building and Environment* Vol. 16, pp 201-207 (1981).

/10/- **C. Hall, A. N. Kalimeris** "Water Movement in Porous Building Materials V. Absorption and Shedding of Rain by Building Surfaces." *Building and Environment* Vol. 17, pp 257-262 (1981).

/11/- **C. Hall, W. D. Hoff, M. R. Nixon** "Water Movement in Porous Building Materials VI. Evaporation and Drying in Bricks and Blocks Materials." *Building and Environment* Vol. 17, pp 257-262 (1981).

- /12/- **C. Hall, T. K. Tse** "Water Movement in Porous Building Materials VII. The sortivity of mortars." *Building and Environment* Vol. 21, pp 113-118 (1986).
- /13/- **S. J. F Ansson, W. D. Hoff** "Water Movement in Porous Building Materials VIII. Effects of Evaporative Drying on Height of Capillarity Rise Equilibrium in Wall." *Building and Environment* Vol. 21, pp 195-200 (1986).
- /14/- **C. Hall, M. H. Raymond Yau** "Water Movement in Porous Building Materials IX. The Water absorption and Sortivity of Concretes." *Building and Environment* Vol. 22, pp 77-82 (1987).
- /15/- **M. A. Wilson, W. D. Hoff, C. Hall** "Water Movement in Porous Building Materials X. Absorption of small Cylindrical Cavity." *Building and Environment* Vol. 26, pp 143-152 (1991).
- /16/- **M. A. Wilson, W. D. Hoff, C. Hall** "Water Movement in Porous Building Materials XI. Capillary Absorption from a Hemispherical Cavity." *Building and Environment* Vol. 29, pp 99-104 (1994).
- /17/- **J. R. Philip** "The Theory of Infiltration: 4. Sortivity and Algebraic Infiltration Equations." *Soil. Sci.* n° 48 pp 257-264 (1957).
- /18/- **M. J. Cunningham** "A new Analytical Approach to the long term behaviour of moisture concentrations in building cavities I. Non Condensing Cavity" *Building and Environment* Vol. 18, pp 109-116 (1983).
- /19/- **M. J. Cunningham** "The moisture performance of framed structures. A mathematical model." *Building and Environment* Vol. 23, pp 123-135 (1988).
- /20/- **M. J. Cunningham** "Modelling of moisture transfer in structures I. A description of a finite difference nodal model." *Building and Environment* Vol. 25, pp 55-61 (1990).
- /21/- **M. J. Cunningham** "Modelling of moisture transfer in structures II. A comparison of numerical model, an analytical model and some experimental results." *Building and Environment* Vol. 25, pp 85-94 s (1990).
- /22/- **M. J. Cunningham** "Moisture diffusion due to periodic moisture and temperature boundary conditions. An approximate steady analytical solution with non-constant diffusion coefficients." *Building and Environment* Vol. 27, pp 367-377 (1990).
- /23/- **C. R. Pedersen** "Prediction of moisture transfer in building constructions." *Building and Environment* Vol. 27 pp 387-397 (1992).
- /24/- *Handbook of Chemistry and Physics*. 49ª edición Ed.: Robert C. Weast. Publicado por The Chemical Rubber CO. (1968).
- /25/- **P. Kumar Mehta** "Concrete structure, properties and materials." Ed.: Prantice-Hall, New Jersey (1986).

- /26/- **R. G. Wylie** "The properties of water salt system in relation to humidity." *Humidity and Moisture* Vol. 3 pp 507-512 Reinhold, New York (1965).
- /27/- **T. Blanco, F. Puertas, A. Macías, A. Palomo** " Study of support Roman Mortars of Italic's mosaics." *7th Proceedings del International Congress on Deterioration and Conservation of Stone.* pp 1299-1305 Lisboa. Portugal (1992).
- /28/- **A. K. Mullick, S. Chandra** "Physico-Chemical, Biological and Thermal Degradation Including Environmental Effects." *Proceedings del 9th International Congress on the Chemistry of Cement* pp. 695-698 New Delhi. India (1992).
- /29/- **M. J. Escorihuela, O. Fernández Peña** " Durabilidad del Hormigón" *Materiales de Construcción* n°161 pp. 65-68 (1976).
- /30/- *Recomendaciones de la RILEM. Matériaux et Constructions. Vol.13 n° 75* pp 176-180 (1980).
- /31/- **F. A. L. Dullien** "Pore media" Ed.: Academic Press INC. New York. (1992).
- /32/- **B. Meng** "Moisture-transport-relevant characterization of pore structure." *Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone.* pp 387-396 Lisboa. Portugal (1992).
- /33/- **K. Nielsen, D. Hoffmann** "Pore Characteristics and Moisture in Brick masonry." *Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone.* pp 735-743 Lisboa. Portugal (1992).
- /34/- **D. hoffmann, K Nielsen** "Pore structure of rendering as a feature of its weathering." *Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone.* pp 611-620 Lisboa. Portugal (1992).
- /35/- **M. Añobe, F.J. Sainz de Cuetos, M.J. Martín Pozas** "Study of the porosity system of the monumental stone in Zamora (Spain)." *Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone.* pp 735-743 Lisboa. Portugal (1992).
- /36/- **J. C. Sousa, J. B. Parra, J. A Pajares, J. J. Pis** "Characterization of porous solids." Ed.: Elsevier (1993)
- /37/- **S. J. Geg, K. S. W. Sin** "Adsorption, surface area and porosity." Ed.: Academic Press Londres (1982)
- /38/- **J. I. Goldstein, D. E. Newbury** "Scanning Microscopy and X-Ray microanalysis." Ed.: Plenum Press (1981)
- /39/- **G. A. D. Briggs** "An introduction to scanning acoustic Microscopy." *Microscopical Society Microscopy Handbooks.* Ed.: Oxford University Press. Oxford (1985)

- /40/- **J. S. Ploem, H. J. Tanke** "Introduction to fluorescence Microscopy" *Microscopical Society Microscopy Handbooks*. Ed.: Oxford University Press. Oxford (1987)
- /41/- **A. Boyde** "Confocal optical microscopy" Ed.: *Modern Microscopies, Techniques and Applications*. Ed.: P. J. Duke. Plenum Press (1990)
- /42/- **E. J. Garbacz** "Mercury porosimetry and effective networks of permeability calculations in porous materials." *Power Technol.* n°67 pp 121-125 (1991)
- /43/- **R. A. Cook, R. C. Hover** "Mercury porosimetry of cement-based materials and associated correction factors." *Construction and Building Materials* Vol. 7 n°4 pp 231-240 (1993).
- /44/- **H. W. Reindhardt, K. Gaber** "From pore size distribution to an equivalent pore size of cement portland." *Materials and Structures* n°23 pp 3-15 (1990)
- /45/- **S. J. Gregg, K. S. Sing** "Absorption, Surface area and Porosity." *Academic Press* (1982)
- /46/- **R. E. Oberholster** "Pore structure, permeability and hardened cement paste in relation to durability: status and prospects". *Proceedings del 8° Congresso Internacional do Química do Cimento*. Vol. 1 pp 323-335 Rio de Janeiro. Brasil (1986)
- /47/- **R. F. Feldman** "Pore structure, permeability and diffusivity as related to durability." *Proceedings del 8° Congresso Internacional do Química do Cimento*. Vol. 1. pp 336-356 Rio de Janeiro. Brasil (1986)
- /48/- **J. L. Esteban Sainz** "Aportación al estudio de las características termofísicas de los materiales homogéneos." *Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.* (1985).
- /49/- **V. S. Arpaci** "Conduction Heat Transfer." *Addison-Wesley Publishing Company, Reading Massachusetts.* (1966).
- /50/- **B. Mark** "Moisture flow through porous building materials." *Lund Institute of technology, Sweden* (1974)
- /51/- **N. L. Clarke, R. S. T. Kingston** "Further investigations of some errors in a dynamic method for the determination of thermal conductivity and diffusivity of insulating materials." *Australian Journal of Applied Science* Vol.2 n° 2 (1951)
- /52/- **R. Javelos, J. C. Faures, B. Perrin** "Utilization d'une méthode de chocs thermiques pour la détermination du coefficient de conductivité thermique et de la diffusivité des mastiers et terres cuites." *Annales de I.T.B.T.P.* (Febrero 1982)
- /53/- **M. D. Novels, J. T. Clegg** "Measurement of thermal conductivity of building blocks by the calibrated transient state method." *Build. Serv. Eng.* Vol.45 pp 170-173 (1977).

- /54/- G. N. Dulnev, D. P. Volkov, V. I. Malarev "Thermal conductivity of moist porous materials." *Journal of Engineering Physics* Vol. 56 pp 198-206 (1989).
- /55/- G. N. Dulnev, Y. N. Zarinchnyak, B. L. Muratova "Conductivity of moist porous solids." *J. Eng. Phys.* Vol. 31 pp 928-932 (1976).
- /56/- L. N. Polyenin "Coefficients of heat transfer in condensation." *Heat Transfer Sov. Res.* Vol. 21 pp 656-666 (1989).
- /57/- B. H. Vos "Non steady state. Method for determination of moisture content in structures." *Appl. Sci. Res. Sect.* (1955)
- /58/- Bird, Steward, Lighfoot "Fenomeni di trasporto." Ed.: Casa Editrice Ambrosiana. Milán (1970)
- /59/- K. L. Chapra "Thin film phenomena." Ed.: McGraw-Hill Company (1969)
- /60/- J. Crank "The mathematics of diffusion." Ed.: Clarendon Press Oxford (1982)
- /61/- H. S. Carslaw, J. C. Jaeger "Conduction of Heat in Solids." Ed.: Oxford University Press, Oxford (1984)
- /62/- W. M. Rohsenow, J. P. Hartnett "Handbook of Heat Transfer." Ed.: McGraw-Hill Company (1972)
- /63/- J. P. Holman "Heat Transfer." International Student Edition. Ed.: McGraw-Hill Kogakusha LTD. Tokio (1982).
- /64/- J. Aguilar Peris "Curso de termodinámica" Ed.: Alhambra. Madrid (1984)
- /65/- R. A. Livingstone, T. H. Taylor Jr. "Diagnosis of salt damaged at a smokehouse in Colonial Williamsburg." *Bolletín of the Association for Preservation Technology.* Vol. 23 n°3 pp 3-12 (1991).
- /66/- P. Rénucci, L. Gaudart, J. P. Pétrakian, D. Roux "Effects of annealing on the electrical resistance of thin films of alkaline earth metals." *Electronics and Optics. The solid films n°* 125 pp 53-56 (1985).
- /67/- L. Valdeón, M. S. King, M. H. de Freitas "Ultrasonic methods for quantifying the degradation of building stone." *Proceedings del 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone,* pp 697-704 Lisboa. Portugal (1992).
- /68/- H. Fütznér, K. Heinrichs, R. Kownatzki "Classification and mapping of weathering forms." *Proceedings del 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone,* pp 957-968 Lisboa. Portugal (1992).

- /69/- **E. Frinzi, V. Massa, D. Morero** "Radar-aided investigations on mosaics." *Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, pp 969-978 Lisboa. Portugal (1992).
- /70/- **K. No, J. F. McClelland** "Thermal-wave imaging of epoxy/aluminum interfaces." *J. Appl. Phys.* Vol.64 n° 15 pp 1730-1735 (1988).
- /71/- "The Infrared Handbook." Editores: **W. L. Wolfe y G. J. Zissis** Ed.: *Environmental Research Institute of Michigan*. (1989).
- /72/- **D. R. Hudson Jr.** "Infrared System Engineering" Ed.: *John Wiley and Sons*. New York (1969)
- /73/- **G. Gaussorgues** "La Thermographie Infrarouge. Principes Technologies-Applications." *Technique et Documentation*. Ed.: *Lavoisier* (1989)
- /74/- "AGA Thermovision 82. Operating Manual." *AGA Infrared System* (1981).
- /75/- **B. Petterson, B. Axén** "Thermography. Testing of a Thermal Insulation and Airghness of Buildings." Editor: **Bengt Steen**. Ed.: *Swedish Council of Building Research, Stockholm* (1980).
- /76/- **S. F. Burch, J. T. Burton, S. J. Cocking** "Detection of defects by transient thermography: A comparison of predictions from two computer codes with experimental results." *British Journal of NDT*. pp 36-44. (1984).
- /77/- **S. Allen, L. R. Allen** "Development of Infrared Thermography standards for New Jersey state buildings." *SPIE Vol. 581 Thermosense VIII* pp 156-161 (1986).
- /78/- **P. C. McMullan** "Assesment structural components of new masonry construction utilizing Infrared Thermography." *SPIE Vol. 1313 Thermosense XII* pp 78-83 (1990).
- /79/- **E. Grinzato, G. Padova, G. Panozzo** "Quality test by thermographical analysis: an estimation of k-value." *I.I.R. Commission d2* pp 73-83. *Czechoslovaquia* (1981).
- /80/- **E. Grinzato, G. Padozzo** "Comparison of measurements of k-value by A.T.P. internal heating method and thermographic analysis." *I.I.R. Commision D1, D2, D3* pp 183-190 *Orlando. USA* (1985).
- /81/- **P. G. Bison, E. Grinzato, M. G. Cortelazzo** "Radiometric reference segmentation in thermal images." *Proceedings of the 5th International Conference on Imaging Analysis and Processing* pp 18-22 *Positano (Italia)* (1989).
- /82/- **E. Grinzato, P. G. Bison, A. Mazzoldi** "In-situ quality control of cold store assembling by I.T. and image processing" *Proceedings of the I.I.R. XVIIIth International Congress*. *Montreal Canada* (1991).

- /83/- **D. G. Manning, F. B. Holt** "The development of deck assessment by radar and thermography." *Transportation Research Record* pp 13-20 (1987)
- /84/- **J. Kulicki** "Use of thermography as an investigatory method in conservation research. Outline of problems." *Science Technology of European Heritage. Proceedings of the European Symposium*, pp 566-570. Bolonia. Italia (1989).
- /85/- **H. Ishikawa** "Some laboratory tests on application of thermography to non destructive testing of building materials and structures." *Proceedings of the 6th International Conference Held. Durability of Building Materials and Components Vol. 2* pp 883-892 Omiya (Japón) (1993).
- /86/- **P. Baggio, P. G. Bison, C. Bonacina, C. Bresan, E. Grinzato** "Thermal inertia evaluation in porous materials by multispectral optical analysis." *Proceedings of the XVIIIth International Congress of Refrigeration*, pp 10-14 Montreal. Canadá (1991).
- /87/- **C. Martin, G. Villoutreix, P. Fauchais, J. Martinet** "Utilization de la thermographie infrarouge par la mesure du facteur normal d'émission de métaux dans une bande spectrale de largeur déterminée." *C.R. Acad. Sc. Paris t.25* (1972).
- /88/- **K. Schurer** "A method for measuring infrared emissivities for near black surfaces at ambient temperatures." *Infrared Physics Vol. 16* pp 157-163 (1976).
- /89/- **C. Martin, P. Fauchais** "Mesure par thermographie infrarouge de l'émissivité de matériaux bons conducteurs de la chaleur." *Revue Phys. Appl. N° 15* pp 1469-1478 (1980).
- /90/- **M. P. Loung** "Détection de l'endommagement mécanique du béton par thermographie infrarouge." *Matériaux Mécanique Électricité n° 419* pp 30-33 (1987).
- /91/- **W. N. Reynolds** "Inspection of laminates and adhesives bonds by pulse video thermography." *NDT International Vol. 21 n° 4* pp 229-232 (1988).
- /92/- **S. J. Marshall** "Detecting moisture in buildings using infrared thermography." *SPIE Vol. 254 Thermosense III* pp 111-116 (1980).
- /93/- **E. Grinzato, A. Mazzoldi** "Infrared detection of moist areas in monumental buildings based on thermal inertia analysis." *SPIE Vol. 1467 Thermosense XIII* pp 75-82 (1991)
- /94/- **E. Grinzato, C. Bressan, P. G. Bison** "Evaluation of moisture in porous material by dynamic energy balance." *SPIE Vol. 1682 Thermosense XIV* pp 213-221 (1992).
- /95/- **P. G. Bison, C. Bressan** "Automatic equipment for water content measurement on porous materials by mean of multispectral analysis." *Workshop on Advanced Infrared Thermography and Applications. IROE. Florencia. Italia* (1992).
- /96/- **V. Vavolov, P. G. Bison** "Some new ideas in dynamic thermal tomography." *Quantitative Infrared Thermography Conference, Paris. Francia* (1992)

/97/- **P. Baggio, C. Bonacina, E. Grinzato** "Determinazione delle caratteristiche termohigrometriche dei materiale da costruzione porosi." *Proceedings of the Congresso Nazionale AIT, Parma Italia (1992).*

/98/- **R. Schickert** "Infrared thermography as a possible tool to detect damaged areas in buildings" *Durability of buildings materials Vol. 3 pp 87-99 (1985).*

/99/- **R. Schickert, B. Bottcher** "Application of IR thermography to investigate damage areas of buildings." *Proceedings of the International Colloquia Materials Science and Restoration, pp 1-7 Nellingen. Alemania (1983)*