



CONAMA10
CONGRESO NACIONAL
DEL MEDIO AMBIENTE

COMUNICACIÓN TÉCNICA

Estudio de la eficacia del enfriamiento evaporativo en piezas cerámicas porosas para su aplicación en la arquitectura

Autor: Sofía Melero Tur

Institución: Universidad Politécnica de Madrid

e-mail: s.melero@abio-upm.org

Otros Autores: Inmaculada Morgado Baca (U.P.M.); Consolación Acha Román (U.P.M.); Francisco Javier Neila González (U.P.M.).

RESUMEN

El enfriamiento evaporativo se basa en la reducción de temperatura del aire mediante un proceso adiabático. El empleo de esta estrategia en la edificación es altamente complejo; ya que, se está aumentando el contenido de humedad en el ambiente por el mismo proceso de acondicionamiento interior descrito. Por lo que la eficacia del proceso, sin salirse de los rangos de confort normalizados, dependerá también del clima en el que se esté empleando la estrategia. El objetivo de este estudio se centra en evaluar la viabilidad del Enfriamiento Evaporativo en piezas porosas cerámicas, buscando siempre el mayor grado de pasividad posible. Por tanto, se tiene la coexistencia de la complejidad de este proceso de enfriamiento con aumento de humedad; y la variable añadida de la pieza cerámica y sus características que determinarán o no el funcionamiento del conjunto del sistema. Para llegar al objetivo planteado se ha realizado un estudio en dos fases: En una primera fase: un estudio previo de evaluación de la eficacia del empleo de sistemas de Enfriamiento Evaporativo según las zonas climáticas del territorio español con el objetivo de determinar las zonas adecuadas para la aplicación del sistema propuesto. En una segunda fase: la evaluación de la eficacia del enfriamiento evaporativo mediante piezas porosas cerámicas mediante ensayos empíricos. La integración de este tipo de sistemas en la arquitectura actual permitiría mejorar las condiciones de confort interior con medios sencillos y con consumos de energía casi nulos en una gran parte del territorio nacional; extrapolable a cualquier otro país del que se requeriría un estudio climático previo para evaluar la eficacia de empleo de este tipo de sistemas.

1. INTRODUCCIÓN.

El empleo de técnicas de enfriamiento evaporativo como estrategia de acondicionamiento, es conocido y usado desde hace mucho tiempo, pero la eficacia de la capacidad de enfriamiento de estos sistemas estará condicionada por las propiedades del aire a enfriar, es decir, por su comportamiento psicrométrico. Son técnicas altamente eficaces que se acercan a procesos adiabáticos (de intercambio energético constante) por lo que resultan de alto interés; pero es necesario saber cuáles son las condiciones del ambiente, temperatura y humedad, en las que se puede aplicar este tipo de sistemas.

La estrategia de Enfriamiento Evaporativo es una de las más “delicadas” a la hora de aplicarlas en ambientes interiores porque en la mayoría de los casos estamos aumentando su contenido de humedad. Esta variación de humedad puede alterar el confort interior.

Ciertas culturas “ancestrales” como las egipcias o las árabes tenían un control “heredado” sobre el bienestar higrotérmico. En sus construcciones aplicaban sistemas de refrigeración por evaporación en patios, ventanas, cubiertas, etc. Este “control generacional” sobre la aplicación de esta estrategia se ha ido perdiendo en el tiempo.

Por otro lado, de todos es conocido el “efecto botijo” en nuestro país. Se basa también en enfriamiento evaporativo, pero en este caso la materia que se enfría no es el aire sino el agua alojada en el interior del botijo. Es un enfriamiento evaporativo con un grado más de complejidad puesto que incluimos ahora otra variable más en el conjunto del sistema: la pieza cerámica y sus características.

Los sistemas de Enfriamiento Evaporativo Cerámico (EEC) ya han sido empleados en contados ejemplos con una eficacia variable dependiendo de la aplicación. Para poder determinar la viabilidad de este tipo de sistemas, se han realizado una serie de sencillos ensayos que nos permiten dimensionar y estimar su eficacia para poderlo aplicar en soluciones arquitectónicas, tanto para el acondicionamiento interior como exterior.

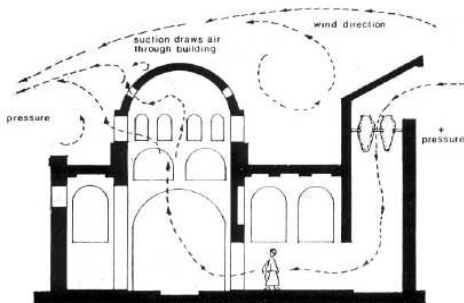
El objetivo principal de este documento es estudiar la Viabilidad del Enfriamiento Evaporativo en Sistemas porosos Cerámicos, buscando siempre el mayor grado de pasividad posible.

Para ello se plantean los siguientes objetivos parciales:

- 1º_Estudio de la eficacia de la estrategia del Enfriamiento Evaporativo.
- 2º_Estudio de la eficacia del Enfriamiento Evaporativo Cerámico (SEEC) mediante ensayos con piezas cerámicas porosas.

2. JUSTIFICACIÓN.

El Enfriamiento Evaporativo Cerámico es una técnica empleada en sistemas tradicionales (torres de ventilación en Oriente Medio [Fig.1]), artesanales (botijo [Fig.2]) y actuales (Pabellón de España en la Expo 2008 [Fig.3], Torre Enfriadora Cerámica del prototipo de la Universidad de Sevilla para el Solar Decathlon Europe [Fig.4]). Sin embargo, la eficiencia de su funcionamiento no es fácil de determinar, ya que no se trata de un enfriamiento directo del aire, sino que el enfriamiento se produce a través de un material cerámico que, a su vez, puede tener múltiples combinaciones de características distintas. El reto reside en hallar la pieza ideal enfriadora y la aplicación arquitectónica idónea.



[Fig.1]



[Fig.2]



[Fig.3]

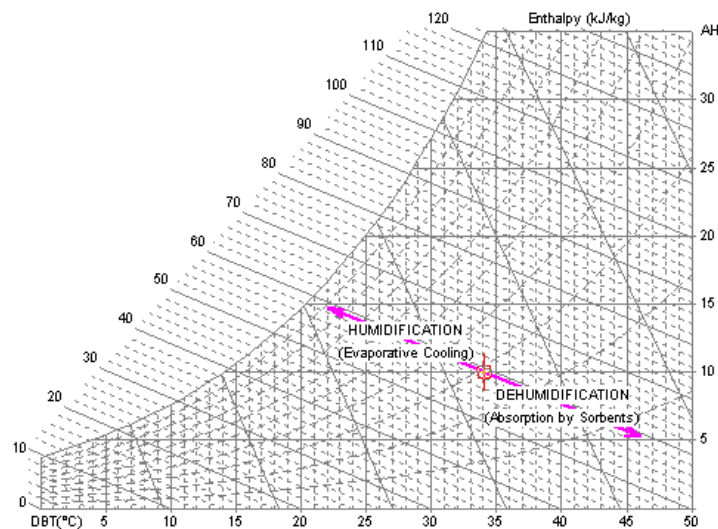


[Fig.4]

3. DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS DE ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO.

3.1. CONCEPTO DE ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO.

El enfriamiento evaporativo se basa en la reducción de temperatura del aire mediante un proceso adiabático, la energía se mantiene constante siguiendo las líneas de entalpía constante, representado en el diagrama psicrométrico como indica la figura a continuación [Fig.5].



[Fig.5] Proceso de Enfriamiento Evaporativo en el diagrama psicrométrico.

En un proceso de enfriamiento evaporativo el agua cambia de fase de estado líquido a vapor. La energía (en forma de calor) necesaria para ese cambio de fase, que es el calor latente de vaporización, es tomada de la energía interna de la mezcla. Lo que provoca una disminución de la temperatura de ésta. Se trata, por tanto, de un enfriamiento

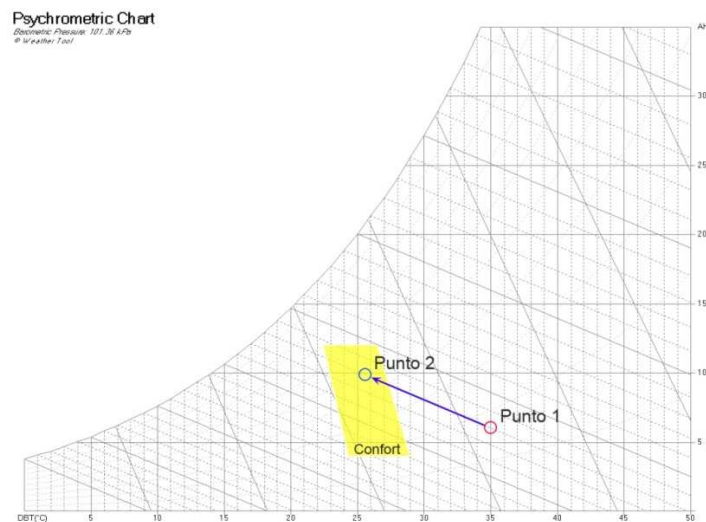
adiabático, en el que la entalpía (J/Kg de aire seco) permanece constante. Por lo tanto, el contenido energético [calor sensible + calor latente] permanece constante. O lo que es lo mismo, que el “calor robado” al aire es la energía necesaria para evaporar la humedad contenida en ese aire. El calor de vaporización del agua es de 580 kcal a 100°C (2424J) [6]. Por lo que si evaporamos un gramo por segundo tendremos una potencia de enfriamiento de 2,42kW.

El resultado de este proceso es que disminuye la temperatura y se eleva la humedad del ambiente; resultado que como estrategia de enfriamiento pasivo tiene sus limitaciones. Dicho de otra manera, el enfriamiento evaporativo es un proceso de transferencia de calor y masa que se basa en la conversión del calor sensible en calor latente.

3.2. CLASIFICACIÓN.

3.2.1. Enfriamiento Evaporativo Directo [EED]:

Este tipo de enfriamiento es el más eficaz, el enfriamiento evaporativo enfría directamente el ambiente; por lo que el aire cambia sus condiciones, es decir, sufre una disminución de la temperatura y un aumento de humedad, manteniendo constante la entalpía. La gran limitación que tiene es que en ambientes con humedades relativas superiores al 50% la capacidad de enfriamiento es muy baja.

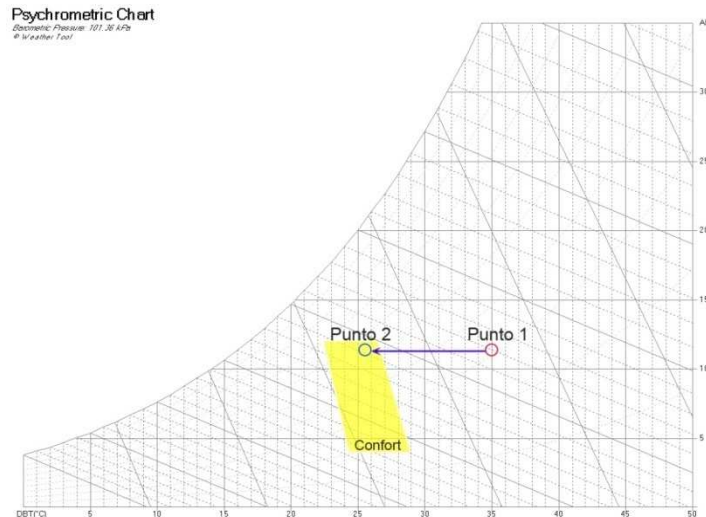


[Fig.6] Proceso de EED.

3.2.2. Enfriamiento Evaporativo Indirecto [EEI]:

En este caso el enfriamiento evaporativo no es utilizado para enfriar directamente el ambiente; se utiliza para enfriar un elemento intermedio, que (por radiación, conducción y/o convección) enfriará el ambiente a acondicionar.

Es un enfriamiento mucho menos eficaz que el anterior puesto que las pérdidas en el conjunto del sistema son mayores al darse dos “enfriamientos”, dos transferencias de energía. Pero es un enfriamiento posible en aquellas zonas donde la humedad relativa es ya bastante alta y no es conveniente elevarla más.



[Fig.7] Proceso de EEI.

La representación en el diagrama explica esta transformación. Al final el enfriamiento es el mismo que el produce un paramento radiante; que por convección y radiación se produce el intercambio de calor en el ambiente.

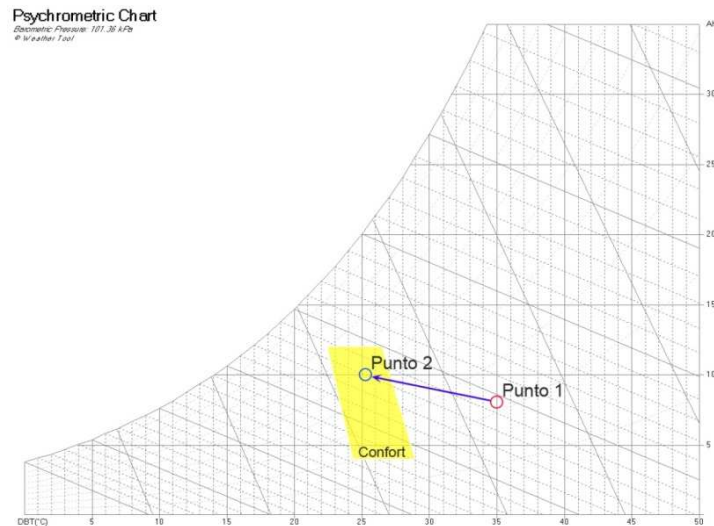
3.2.3. Enfriamiento Evaporativo Mixto [EEM]:

Este enfriamiento es una mezcla de los dos anteriores, al igual que el enfriamiento que tiene lugar con piezas cerámicas. Por ello, el Enfriamiento Evaporativo Cerámico (EEC) es considerado como un Enfriamiento Evaporativo Mixto (EEM).

Se produce una variación de contenido de humedad del ambiente pero no es una transformación isoentálpica. Estos casos serán, por ejemplo, los sistemas de enfriamiento en los que se usen elementos porosos que contienen agua o están empapados de agua y que parte del enfriamiento producido en la vaporización del agua es cedido al ambiente y parte al material mismo que contiene el agua; que, a su vez, por convección y radiación roba parte del calor del ambiente. Es decir será el caso de Enfriamiento Evaporativo mediante elementos porosos cerámicos, que es el caso que nos compete en este estudio.

Es uno de los más complejos de estudiar y cuantificar puesto que en el diagrama no se mantiene constante ningún parámetro y va a depender muy directamente de las características del elemento “contenedor de agua” que determinará su capacidad de enfriamiento por las propiedades del material que lo conforma. En nuestro caso dependerá directamente de las características de la cerámica que contiene el agua.

Una posible representación gráfica en el diagrama psicrométrico sería la que se adjunta a continuación. Ha aumentado el contenido de humedad y disminuido la temperatura pero la cuantificación no es tan directa como en los dos casos anteriores (EED y EEI); por lo que también resulta más difícil de cuantificar y valorar la eficacia del sistema.



[Fig.8] Proceso de EEM [EEC].

4. ELEMENTOS DEL SISTEMA EEC Y SUS PROPIEDADES.

La efectividad del enfriamiento evaporativo es muy alta, pero tiene también grandes limitaciones: es necesario un ambiente bastante seco y que el agua esté lo suficientemente expuesta a una corriente de aire.

En un sistema de Enfriamiento Evaporativo Cerámico (EEC) además se tienen que tener en cuenta las propiedades del material cerámico. Por lo tanto, tendremos tres elementos fundamentales que influirán en la eficiencia del sistema: fluido agua, fluido aire y material cerámico.

Cada elemento del sistema es una variable que se va a tener que poder “modificar controladamente” para mejorar el estado de confort en un ambiente concreto. El resto de elementos que se pueden encontrar en este sistema no se van a considerar variables puesto que no se van a poder “modificar controladamente”. Van a ser los condicionantes del sistema. Como condicionantes se tiene desde el grado de actividad metabólica, el grado de arropamiento, hasta la humedad relativa y temperatura exteriores. Que sean condicionantes implica que habrá que tenerlos en cuenta a la hora de tomar decisiones de proyecto para aplicar la estrategia de enfriamiento evaporativo; éstos estarán relacionados con los intercambios que se establecen entre el cuerpo y el medio y que

vienen definidos por la ecuación siguiente (signos positivos representan pérdidas y negativos ganancias):

$$M - W = \pm CV \pm R \pm CC \pm RS + EV + D + A \quad \text{[referencia 1]}$$

Donde: M es la velocidad del metabolismo (la aplicación estándar es de 125W o 1,25 met); W es la energía mecánica efectiva exterior; CV son los intercambios por convección; R son los intercambios por radiación; CC son los intercambios por conducción a través de las partes del cuerpo puestas en contacto con un sólido; RS son los intercambios de calor latente (evaporación respiratoria) y sensible producidos en la respiración; EV son las pérdidas por evapotranspiración; D es la difusión de vapor de agua desde la piel; A es la energía acumulada.

Los términos relevantes que definen la eficacia de los sistemas EE son los de CV y EV. Donde influirán las variables del movimiento del aire y del agua vaporizada. Lo que significa que, para que estos intercambios sean negativos en la ecuación y provoquen un efecto de enfriamiento sobre el cuerpo no se pueden llegar a saturar con una humedad relativa demasiado alta que no permita la evapotranspiración o un movimiento de aire con temperatura elevada que provoque “ganar calor” en vez de “perderlo”.

4.1. Fluido AGUA:

El agua, o más concretamente el contenido de vapor de agua en el ambiente, es el elemento que al cambiar de fase va a provocar el enfriamiento, al convertir la energía en forma de calor en la energía necesaria para su cambio de estado. Para que el aire sea enfriado mediante la evaporación es necesario que el agua se encuentre en la misma “masa de aire” (para tomar el calor de éste), cuanto mayor sea la superficie de exposición del agua en contacto con el aire más fácilmente se producirá su evaporación; por tanto, es necesario alcanzar un nivel de pulverización alto del agua; por ejemplo se evapora muy bien el agua de un surtidor y mucho peor el de un estanque. En el caso de la evaporación a través de la superficie cerámica el agua se evapora tras atravesar los poros del material cerámico y entra en contacto con el aire.

Las propiedades del agua:

El agua es un cuerpo líquido, incoloro, inodoro e insípido. Su densidad es igual a 1 kg/l (1000 kg/m³) y su calor específico de 4,1855 kJ/Kg.°C (1 kcal/Kg.°C) y una conductividad térmica es de 0,98 W/m.K. Hierve a la temperatura de 100°C a nivel del Mar y su punto de solidificación es de 0°C (hielo). Tiene gran poder disolvente por lo que se le denomina también "disolvente universal".

La medición de la conductividad térmica del agua puede ser un indicador de su calidad, que nos determina la concentración de iones disueltos. A mayor concentración mayor conductividad. Un ejemplo claro es la cantidad de sales que se encuentran disueltas en el agua; a mayor cantidad de sal, mayor conductividad. Por tanto, la calidad del agua, que va a ser fundamental para el funcionamiento del sistema, se tendrá que tener presente en la instalación del sistema.

4.2. Fluido AIRE:

El aire atmosférico está formado por un gran número de componentes gaseosos, vapor de agua y mezclas contaminantes. El aire seco es el aire atmosférico al que se le ha eliminado tanto el vapor de agua como los contaminantes. La composición de este aire

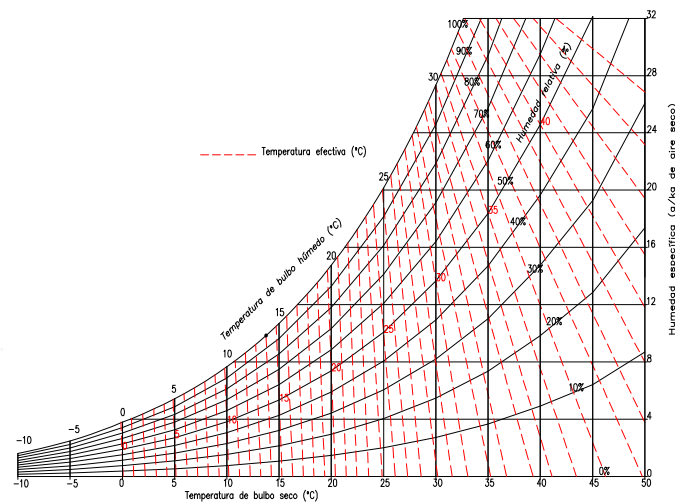
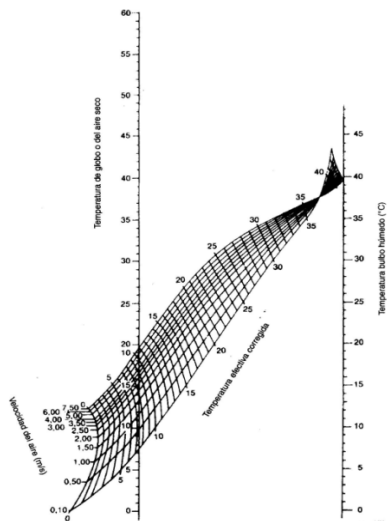
en la troposfera es prácticamente constante (se puede considerar como un gas perfecto). El Nitrógeno (78%) y el Oxígeno (21%) son los constituyentes principales del volumen total de aire. El oxígeno es imprescindible para la respiración y el nitrógeno actúa de diluyente. [referencia1]

La mezcla de aire seco y vapor de agua constituye el aire húmedo. El vapor de agua tiene una influencia fundamental en nuestro bienestar a pesar de que su porcentaje en peso del total es menos del 3% (incluso en los climas más húmedos). La capacidad del aire de retener de vapor de agua está en relación con la temperatura del aire. A presión atmosférica constante, a menor temperatura, menor cantidad de vapor y a mayor temperatura, mayor cantidad de vapor de agua. Con el fin de obtener un modelo sencillo para entender y calcular los cambios físicos de la mezcla descrita, la forma tradicional de la termodinámica estudia el aire como una mezcla simplificada de gases ideales, es decir una mezcla de gas (aire seco) y vapor de agua (que se considera un gas). Entendiendo que el agua sólo forma parte de la mezcla si se encuentra en forma de vapor y entra, por tanto en el diagrama (proceso en el que se produce el enfriamiento por el cambio de fase del agua al vaporizarse). Esta transformación psicrométrica va a estar condicionada por: el grado de humedad (o contenido de humedad) de ese aire, para saber la capacidad de enfriamiento que tiene; y la velocidad del aire, a mayor velocidad, mayor movimiento de la masa de aire total y más rápida la evaporación (mayor cantidad de agua entra en contacto con el aire y vaporiza).

El movimiento del aire es una variable del sistema limitada por el efecto de éste sobre el cuerpo humano. El aire, no es una masa en reposo sino que constituye una delgada capa fluida y turbulenta removiéndose con intensidad variable debido a los contrastes térmicos. La escala de Beaufort ordena los vientos según su fuerza, considera que los vientos menores de 0,5m/s son "calma", la realidad es que movimientos superiores a 0,08m/s ya son perfectamente perceptibles por el ser humano.

Para estimar el efecto de reducción de temperatura por el movimiento del aire se establece el concepto de temperatura efectiva, es "un índice arbitrario que combina en un único valor el efecto de la temperatura, humedad y movimiento del aire en relación con la sensación de calor o frío sentida por el cuerpo humano" [referencia1]. Es un valor obtenido de forma empírica.

Gráficamente se puede calcular mediante el gráfico de Yaglou y Houghton [fig.9], calculado para una HR del 100%; o por el diagrama de nuevas temperaturas efectivas ASHRAE-KSU (1974) [fig.10] [referencia 1], calculado para una HR del 50% y una velocidad del aire inferior a 0,2286m/s. En ambos se encuentra el inconveniente de no disponer de un gráfico en el que se relacionen todas las variables posibles de este tipo de sistemas.



[Fig.9] Gráfico de Yaglou y Houghton. [Fig.10] Diagrama de nuevas temperaturas efectivas ASHRAE-KSU (1974).

De ambos gráficos sí se puede determinar, por otro lado, que tanto el aumento del movimiento del aire como la disminución de la humedad relativa de este aire no siempre van a significar un descenso de la temperatura efectiva, ambos están limitados. En el caso del movimiento del aire las limitaciones son: la velocidad del aire (explicado anteriormente), como la temperatura de ese aire; si supera los 37°C la sensación térmica se invierte y al aumentar la temperatura se aumentan las ganancias (térmicas) por convección y, por tanto, aumenta la sensación de calor y la temperatura efectiva. En el caso de la humedad relativa del aire sucede que, como también se ha visto, a menor humedad relativa mayor capacidad del ser humano para perder calor por evapotranspiración. Pero cuando la temperatura húmeda llega a 0°C, la temperatura efectiva aumenta en 0,5°C. Esto sucede porque el aire seco es menos conductor que el húmedo y por tanto la apreciación de una temperatura baja es mayor a humedades relativas más altas.

En definitiva, los condicionantes asociados al fluido aire que limitan la eficiencia del sistema de EE en un ambiente son:

- El contenido de humedad en el aire (y su humedad relativa).
- La velocidad del aire (movimiento del aire).
- La temperatura del aire (si en nuestra estrategia se incorpora aire del exterior o de otro ambiente distinto al que se va a acondicionar).

4.3. Material CERÁMICO:

Para el desarrollo de un sistema de enfriamiento evaporativo mediante material cerámico, lo que va a influir en la eficacia del mismo, son las propiedades de la cerámica desde el punto de vista de la capacidad de enfriamiento. En definitiva, todas aquellas características que puedan afectar a la porosidad y a su red capilar principalmente. También va a afectar la superficie de exposición y la cantidad de agua contenida en la pieza cerámica.



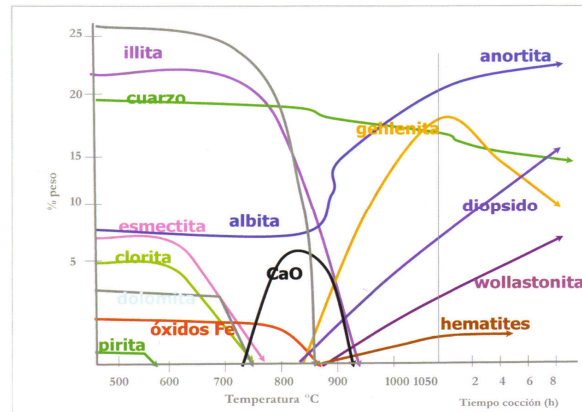
Las piezas cerámicas que se van a ensayar están formadas principalmente de arcilla en su composición. La arcilla está compuesta principalmente de un silicato de aluminio hidratado: $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$. Los componentes básicos son, por tanto, la sílice (SiO_2), el óxido de aluminio (Al_2O_3) y, en menor proporción, el óxido de hierro (FeO_2) entre otros. El óxido de hierro es el que da el color rojizo al barro.

Cada cantera, yacimiento o lugar tiene barros de distintas características; no tanto por la acción de los agentes atmosféricos (viento, lluvia, erosión,...) sino por cómo se hayan ido formando los sedimentos geológicos en la zona, cantidad de materia orgánica, etc. Condicionan en muchos casos la plasticidad y el punto de vitrificación del barro. Los barros se pueden clasificar también por el punto de fusión: de alta (gres, refractario o porcelanas), media o baja temperatura (el de los botijos, ladrillos comunes). Los refractarios, por su nivel de vitrificación, son materiales más impermeables y aguantan bien los cambios de temperaturas, son más resistentes (mayor dureza pero alta fragilidad). En este caso, interesan barros de baja temperatura.

Por tanto, recopilando aquello que puede alterar la porosidad y la red capilar de la pieza cerámica desde su materia prima a su cocción, se establecen 3 apartados con respecto a cada etapa de producción:

1. Con respecto a la materia prima (preparación):
 - El tamaño de grano de la arcilla y de los antiplásticos ejerce una influencia fundamental: cuanto más fina es la partícula tanto más rápida y mejor será la vitrificación de la pasta. Por lo tanto, más porosidad en la pieza. Por esto es importante no sólo la materia prima sino la preparación de ésta (su cribado, etc). El proceso en este punto se resumen en extracción, estacionamiento, dosificación y amasado.
 - El alto contenido en feldespatos reducirá el punto de vitrificación para que se forme la cerámica dando una arcilla más porosa.
 - Mezclando las pastas con serrín fino o carbón molido, al volatilizarse esos materiales en el horno se forman en ellas poros. Quedando piezas ligeras y porosas (usadas para filtros de agua), aunque mecánicamente débiles.
2. Con respecto a la fabricación de las piezas (conformación):
 - En el caso de las piezas para la construcción se pueden resumir en moldeo, extrusión y prensado. Cada una genera una red capilar distinta; en la fase experimental se han utilizado piezas de extrusión, método más común empleado para la fabricación de piezas cerámicas para la construcción.
3. Con respecto al secado y la cocción:
 - El secado, hoy día, se realiza artificialmente, utilizando en lo posible el aire caliente recuperado en la etapa de enfriamiento de los hornos. Cuanto más lento sea mayor será la red capilar y más fina. Esto, frente a un poro grande, puede resultar ventajoso en el proceso de enfriamiento evaporativo "cerámico".
 - Es muy importante la duración de la cocción: mejor a mayor tiempo de cocción, esto no requiere de una temperatura más elevada. La cocción se efectúa en hornos semicontínuos de cámaras intermitentes, como el horno Hoffmann o, más modernamente, en hornos continuos tipo túnel. La temperatura de cocción varía entre 900 y 1.100 °C para el caso del tipo de piezas cerámicas que interesan.

El siguiente gráfico muestra la composición mineralógica de la pieza cerámica según el tiempo de cocción y los grados alcanzados, componentes que, por tanto, también influyen tanto en la estructura interna de la cerámica como en su porosidad.



[Fig.11] Evolución descomposición-formación fases minerales durante el proceso de cocción. Peters & Iberg, 1978.

Por tanto, los datos que principalmente interesan de las piezas cerámicas son:

- Densidad (aparente y absoluta), que determina la porosidad y el porcentaje de huecos.
- Adsorción al agua, succión (de agua). Determina la accesibilidad de la red capilar.
- Permeabilidad al vapor de agua.
- Adherencia.

Con estos datos se podría, complementariamente, llegar a cálculos de resistencia térmica, conductividad térmica y acumulación térmica. Que permitirían evaluar el comportamiento energético de la solución arquitectónica adoptada.

Resumiendo lo expuesto en este apartado, las variables en cada uno de los elementos del sistema que van a interesar para evaluar la eficacia del funcionamiento de sistemas de enfriamiento evaporativo poroso cerámico van a ser:

- Fluido agua: la calidad del agua y su temperatura.
- Fluido aire: Contenido de humedad, temperatura y su velocidad (movimiento).
- Material cerámico: porosidad y red capilar.

5. ESTUDIO DE LA EFICIENCIA DEL ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO CERÁMICO Y SU RELACIÓN CON LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS.

La eficiencia del enfriamiento evaporativo va a depender en gran medida de las condiciones de partida del ambiente a acondicionar y, por lo tanto, del clima de la localidad concreta donde se aplique. Tras un estudio previo de la zonificación climática del territorio español, según el Código Técnico de la Edificación, se eligen cuatro ciudades con distintos potenciales de efectividad según el tipo de Enfriamiento Evaporativo a aplicar. Estas ciudades son: Sevilla (zona climática B4), Tarragona (zona climática B3), Toledo (zona climática C4) y Madrid (zona climática D3). Sevilla con una alta eficacia de las estrategias de EED y EEI, Tarragona con una alta eficacia de EEI,

Toledo de EED, y Madrid, ciudad en la que se ha realizado la fase experimental para evaluar el comportamiento de las piezas cerámicas.

El conocimiento de los potenciales de eficacia de los procesos EED y EEI, nos permitirá establecer unos rangos de eficacia para el EEM y, por tanto, para el EEC.

5.1. METODOLOGÍA.

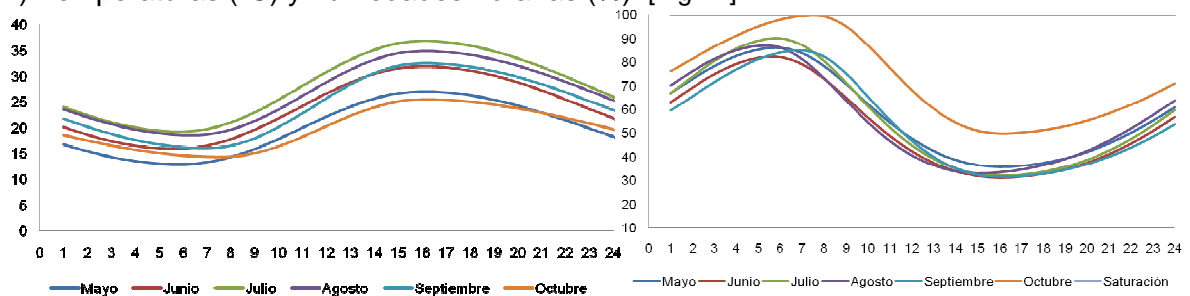
Para calcular el porcentaje de mejora sobre el confort que tienen el EED y el EEI, se ha seguido la siguiente metodología:

- Estudio climático de cada localidad seleccionada, determinación de temperaturas y humedades horarias.
- Construcción de los gráficos psicrométricos con los meses y áreas de confort extendido (EED y EEI) para cada localidad.
- Selección de los meses con potencial de aplicación del EE y rango horario de efectividad dentro de cada mes.
- Cálculo de los porcentajes de eficacia de EED y EEI dentro de cada mes y en el rango horario definido anteriormente (basado en un día tipo).
- Cálculo del tiempo de confort, confort extendido de EED y EEI y de dis-confort.
- Cálculo del rango de efectividad del EEC. Al no tratarse de un proceso psicrométrico puro, el potencial de efectividad no puede determinarse directamente, sino que se establecerán unos márgenes de efectividad, determinados por el potencial del EED y del EEI.

5.2. ESTUDIO DE LAS LOCALIDADES SELECCIONADAS.

5.2.1. SEVILLA.

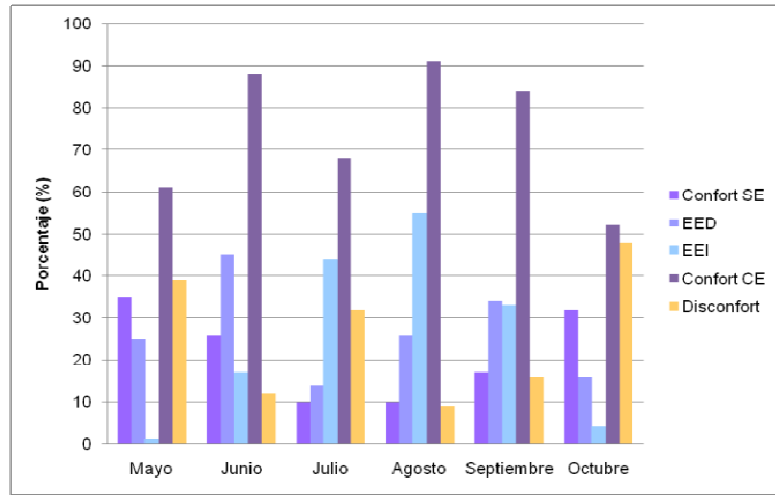
1) Temperaturas (°C) y humedades horarias (%): [Fig.12]



2) Porcentajes de eficiencia de 8:00 -23:00 h. [Tab.1]

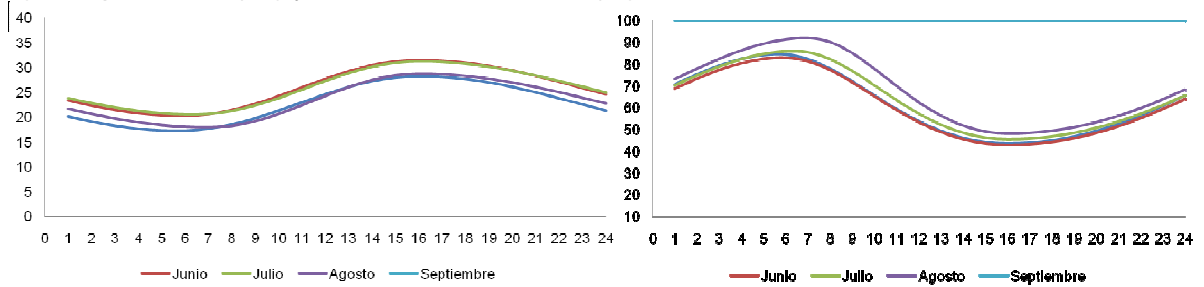
	CONFORT SE		EED		EEI		CONFORT CE		DISCONFORT		EEC
	%	horas	%	horas	%	horas	%	horas	%	horas	
MAYO	35	5h 15min	25	3h 45 min	1	0h 9min	61	9h 9 min	39	5h 51min	25-1
JUNIO	26	3h 54min	45	6h 45min	17	2h 33min	88	13h 12 min	12	1h 48min	45-17
JULIO	10	1h 30min	14	2h 6min	44	6h 36min	68	10h 12 min	32	4h 48min	14-44
AGOSTO	10	1h 30min	26	3h 54min	55	8h 15min	91	13h 39 min	9	1h 21min	26-55
SEPTIEMBRE	17	2h 33min	34	5h 6min	16	2h 24min	84	12h 36 min	16	2h 24min	34-16
OCTUBRE	32	4h 48min	16	2h 24min	4	0h 36min	52	7h 48 min	48	7h 30min	16-4

3) Porcentajes de confort: [Fig.13]



5.2.2. TARRAGONA.

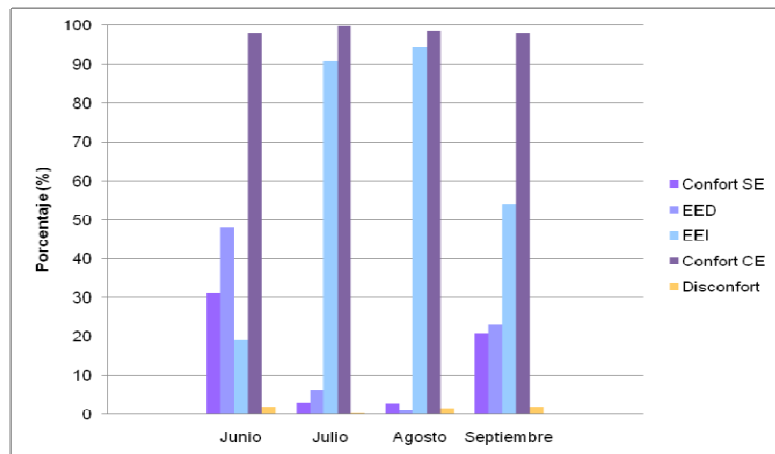
1) Temperaturas (°C) y humedades horarias (%): [Fig.14]



2) Porcentajes de eficiencia de 10:00-22:00 h: [Tab.2]

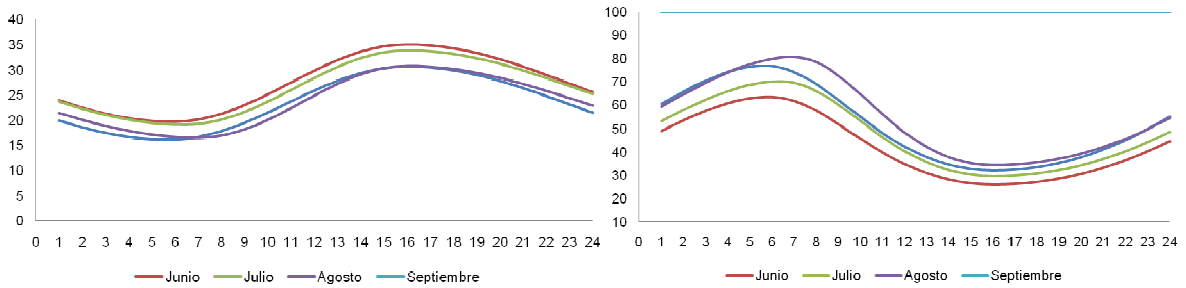
	CONFORT SE		EED		EEI		CONFORT CE		DISCONFORT		Rango %
	%	horas	%	horas	%	horas	%	horas	%	horas	
JUNIO	31	3h 43min	48	5h 46min	19	2h 17min	98	11h 46min	2	14min	48-19
JULIO	3	7min	6	43min	91	10h 53min	99,8	12h	0,2	1,5min	6-91
AGOSTO	3	20min	1	8min	95	11h 20min	98,5	11h 50min	1,5	11min	1-95
SEPTIEMBRE	21	2h 31min	23	2h 46min	54	6h 29min	98	11h 46min	2	14min	23-54

3) Porcentajes de confort: [Fig.15]



5.2.3. TOLEDO.

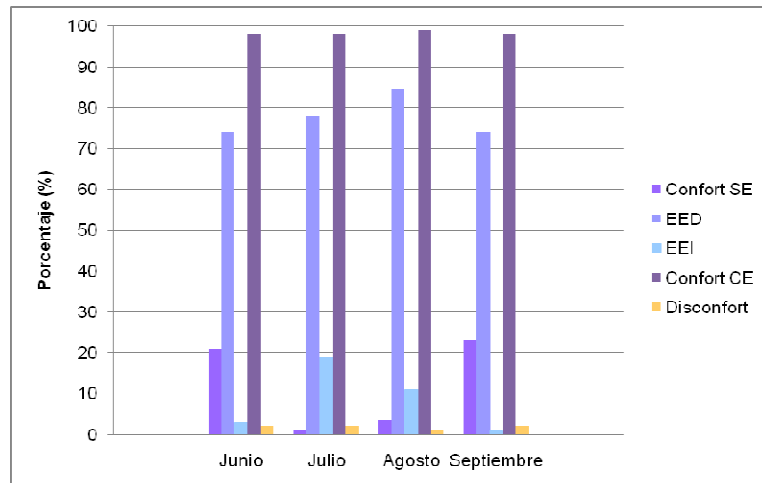
1) Temperaturas (°C) y humedades horarias (%): [Fig.16]



2) Porcentajes de eficiencia de 10:00-22:00 h: [Tab.3]

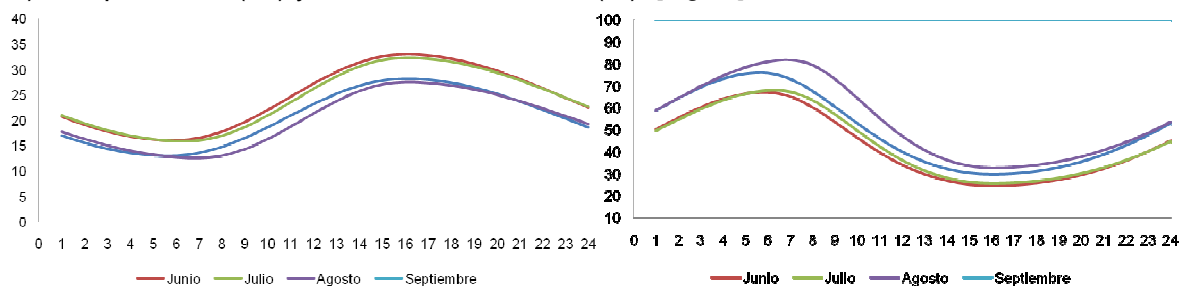
	CONFORT SE		EED		EEI		CONFORT CE		DISCONFORT		EEC
	%	horas	%	horas	%	horas	%	horas	%	horas	
JUNIO	21	2h 31min	74	8h 53min	3	22min	98	11h 46min	2	14min	74-3
JULIO	1	7min	78	9h 22min	19	2h 17min	98	11h 46min	2	14min	78-19
AGOSTO	4	25min	85	10h 8min	11	1h 19min	99	11h 53min	1	7min	85-11
SEPTIEMBRE	23	2h 46min	74	8h 53min	1	7min	98	11h 46min	2	14min	74-1

3) Porcentajes de confort: [Fig.1/]



5.2.4. MADRID.

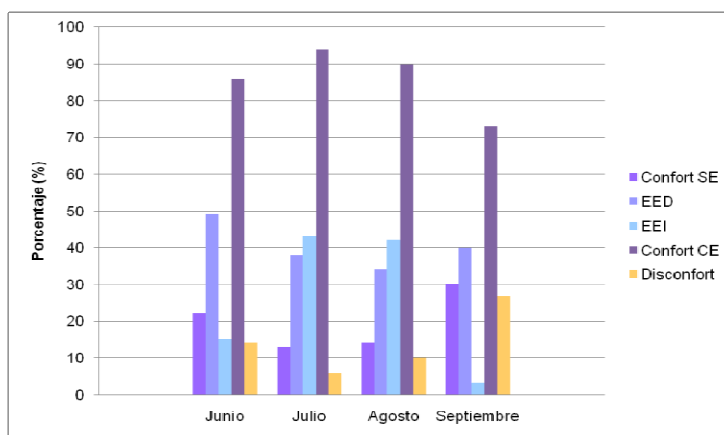
1) Temperaturas (°C) y humedades horarias (%): [Fig.18]



2) Porcentajes de eficiencia de 10:00-22:00 h: [Tab.4]

	CONFORT SE		EED		EEI		CONFORT CE		DISCONFORT		Rango %
	%	horas	%	horas	%	horas	%	horas	%	horas	
JUNIO	22	2h 39min	49	5h 53min	15	1h 48min	86	10h 19min	14	1h 41min	49-15
JULIO	13	1h 34min	38	4h 34min	43	5h 10min	94	11h 17min	6	43min	38-43
AGOSTO	14	1h 41min	34	4h 5min	42	5h 2min	90	10h 48min	10	1h 12min	34-42
SEPTIEMBRE	30	3h 36min	40	4h 48min	3	22min	73	8h 46min	27	3h 15min	40-3

3) Porcentajes de confort:
[Fig.19]



5.2.5. RANGOS DE EFICACIA DEL ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO CERÁMICO.

La siguiente tabla resume los porcentajes de eficiencia de sistemas de Enfriamiento Evaporativo Cerámico (EEC) para las distintas localidades estudiadas, según los porcentajes calculados de EED y EEI.

	EEC %			
	SEVILLA	TARRAGONA	TOLEDO	MADRID
MAYO	25-1			
JUNIO	45-17	48-19	74-3	49-15
JULIO	14-44	6-91	78-19	38-43
AGOSTO	26-55	1-95	85-11	34-42
SEPTIEMBRE	34-16	23-54	74-1	40-3
OCTUBRE	16-4			

[Tab.5] Tabla de rangos de eficiencia del ECC.

Estos porcentajes de eficiencia variarán según las variables de los 3 elementos principales del sistema que se han mencionado en el apartado 4. Por tanto, no sólo es fundamental controlar las variables sino establecer los porcentajes de eficiencia que se pueden llegar a obtener dependiendo del clima de la localidad en la que se esté aplicando el sistema.

6. ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE ENFRIAMIENTO DE PIEZAS DE CERÁMICA POROSA.

Como ya se ha reflejado anteriormente, la definición de la eficiencia de un sistema de enfriamiento evaporativo cerámico viene condicionado por siete variables principales: calidad del agua, temperatura del agua, contenido de humedad del aire, temperatura del

aire, movimiento del aire y la porosidad y red capilar del material cerámico. Variables difíciles de cuantificar de manera teórica en una misma fórmula; por lo que, llegados a este punto, se decide pasar a una fase empírica del comportamiento del material cerámico bajo unas condiciones de entorno lo más controladas posibles. Por lo que toda la fase empírica pretende fijar el mayor número de variables para poder llegar a cuantificar la capacidad de enfriamiento del material cerámico en un sistema pasivo de enfriamiento evaporativo. Buscando como aplicación final el desarrollo de un sistema integrado en la arquitectura.

6.1. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.

La fase experimental se realiza en el Laboratorio de Materiales perteneciente al Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid (Universidad Politécnica de Madrid). Localización geográfica: Latitud: 40°24' N; Longitud: 03°40' O; Altitud: 667 m.

Para la experimentación se ha utilizado equipo de laboratorio (horno de secado, báscula de precisión, recipientes calibrados de medida) e instrumentos de medición debidamente calibrados Testo 175-H2, 177-H1 y 400 (hojas técnicas fabricante Testo SA).

Se ha seleccionado el material cerámico a ensayar por su capacidad de enfriamiento; por lo tanto, se ha buscado cerámica de unas ciertas características según: obtención de la materia prima, granulometría, proceso de fabricación de la pieza (modelado, extrusión), temperatura y tiempo de cocción de la pieza (grado de vitrificación de la pieza). Tradicionalmente, la pieza cerámica que más eficazmente en sistemas de EEC es el botijo (de unas características muy concretas), pero aún así no todos son igualmente eficientes.

Finalmente, las piezas cerámicas que se van a someter a experimentación son tres:

- Botijo Rojo de Ocaña (Toledo) [BR]. El barro rojo, por sus características geomorfológicas será más poroso que el blanco. Ha sido fabricado mediante modelado con torno y cocido a una temperatura de unos 900°C.
- Botijo Blanco de Alicante [BB]. El barro blanco de Alicante, conocido a nivel nacional para la fabricación de botijos. Ha sido fabricado mediante modelado con torno y cocido a una temperatura de unos 900°C.
- Ladrillo proporcionado por “Cerámicas La Paloma” denominado “TABIQUE” [LT], de dimensiones: 400 x 200 x 50mm. Es de barro rojo de la cantera colindante a la misma fábrica en la provincia de Toledo. Está fabricado por extrusión y no lleva tratamiento hidrofugantes. Ha sido cocido a una temperatura de unos 900-950°C.

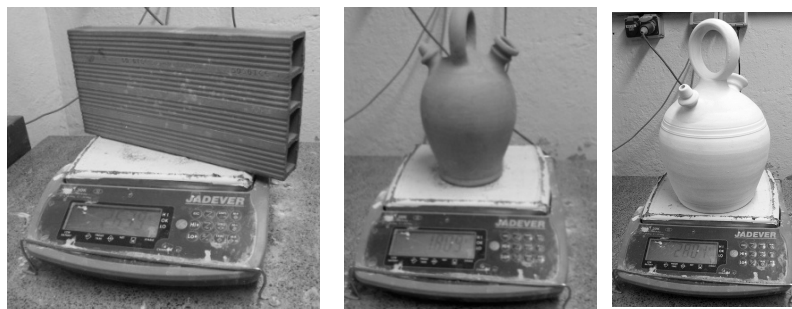
6.1.1. Caracterización del material cerámico: Ensayos de Porosidad.

El evaluar la red capilar interna de las piezas cerámicas resulta más complejo; sin embargo, evaluar la porosidad del material es un ensayo sencillo y aporta un dato bastante relevante para la caracterización de las piezas cerámicas. Es también la denominada porosidad accesible o porosidad aparente; es, en definitiva, la porosidad “útil”, la que es accesible por el agua a través de la estructura capilar de la pieza cerámica.

Puesto que la porosidad no es una característica “normalizada” de las piezas cerámicas industriales (como puede ser la resistencia mecánica o la acústica) ni debe cumplir ninguna concreta en este aspecto, no existe normativa UNE que especifique el método de ensayo de la porosidad de una pieza cerámica. Existen varias metodologías de ensayo, según libros y normativa, para medir la porosidad. Se adoptó el método de inmersión de la pieza durante 48h (norma Rilem); puesto que, tras comparar resultados, se consideró un método más preciso (variaciones entre un 0,2-0,3%). Las medidas a tomar son básicamente el peso de la pieza cerámica seca y el peso de la pieza cerámica después de la inmersión durante 48 horas.

El procedimiento del ensayo seguido (igual para cada pieza) fue el siguiente:

- 1º. Primeramente se secaron las piezas cerámicas a una temperatura de 110°C durante 24 horas, de esta manera se elimina el posible contenido de humedad que haya podido absorber del ambiente.
- 2º. Pesado de la pieza cerámica, obteniendo de esta manera el peso seco (Ps).
- 3º. Se sumergen las piezas totalmente en agua durante 48 horas, en un recipiente con suficiente volumen para que la pieza quede totalmente sumergida.
- 4º. Tras 48 horas de inmersión, la pieza se extrae del recipiente, se seca superficialmente con un paño y se pesa de nuevo, obteniendo el peso húmedo (Ph).



[Fig.20] Imágenes de las piezas cerámicas durante el ensayo.

Conocidos los pesos de las piezas, secas y húmedas, se pasa a determinar la porosidad o índice de adsorción de la pieza, mediante la ecuación:

$$\% \text{ Porosidad} = \frac{(Ph - Ps) \cdot 100}{Ps}$$

Donde: Ph Peso húmedo de la pieza (g).
Ps Peso seco de la pieza (g).

Pieza cerámica	Peso seco Ps (gr)	Peso húmedo Ph (gr)	Porosidad (%)
Botijo Rojo [BR]	1809	2148	18,7
Botijo Blanco [BB]	2801	3320	18,5
Ladrillo "tabique" [LT]	2632	2951	12,1

[Tab.6] Tabla de resultados de porosidad de las piezas cerámicas.

Se diferencia claramente como la porosidad de los dos botijos es superior a la del ladrillo, un 6,4% superior; pero, sorprendentemente, la variación de porosidad entre botijo blanco y rojo no varía tanto. De lo que se deduce que de todos los parámetros que influyen en la

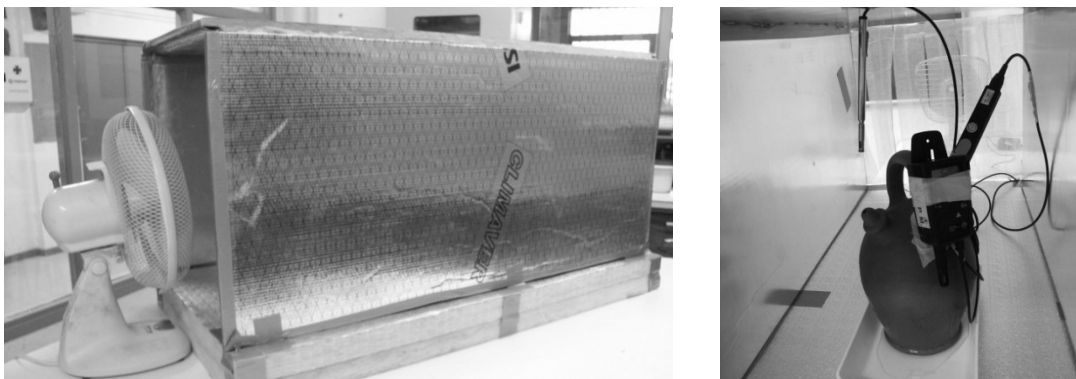
porosidad de la pieza cerámica la materia prima (se estructura geomorfológica) parece ser que es la que menos va a aceptar a la porosidad de la pieza cerámica; esto suponiendo que el resto de parámetros influyentes sean iguales o muy similares.

6.1.2. Desarrollo de los prototipos experimentales.

Los cuatro primeros prototipos consisten en el montaje de un “túnel de viento” en el que dentro se alojarán las piezas cerámicas con agua. De esta manera se consigue tener un mayor control sobre la velocidad del viento y las posibles turbulencias, con el objetivo de minimizar la alteración de las sondas durante la monitorización. El túnel consiste en un conducto de 50 x 50cm de sección y 120cm de largo en el que se tiene la pieza cerámica bajo unas condiciones ambientales próximas más controladas, experimentando únicamente las variaciones diarias de temperatura y humedad del laboratorio.

Los materiales que componen el conjunto de los prototipos son los siguientes: para el túnel: panel Climaver A2 de lana de vidrio de alta densidad, revestido por ambas caras con aluminio y malla de refuerzo (2,5x300x119 cm); L-Ventilador Sobremesa Orbegozo TF 0141; Bandejas de PE-HD, polietileno de alta densidad, (230x350x60 mm). Dentro de este túnel se van a instalar las piezas cerámicas (sobre la bandeja de PE-HD) para poder medir el agua rezumada y no evaporada.

A cada experimento realizado con cada pieza cerámica se le ha adjudicado un número, en total 6 prototipos: 4 experimentados en laboratorio (interior) y dos en exterior.



[Fig.21] Imágenes del túnel enfriador y durante la experimentación en Laboratorio.

Para la experimentación con el ladrillo lleno de agua, se procede a un sellado, no estanco a la “contención de agua” de la pieza, mediante una base de yeso y cemento que hace las veces de soporte del ladrillo y evita gran cantidad de pérdida de agua. El sistema no es lo suficientemente estanco; por lo que, en la interpretación de resultados algunos de los datos no se pueden tomar como válidos totalmente, como se verá a continuación en el siguiente apartado.

6.1.3. Monitorización: Toma de datos.

La experimentación consiste en la monitorización de cada una de las piezas cerámicas dentro del túnel de control (en el caso de las realizadas en laboratorio) y sometidas a una velocidad media constante próxima a los 0,2m/s. Las piezas cerámicas estarán llenas de agua o húmedas. Las características de cada uno de los prototipos son las siguientes:

- Prototipo 1: Pieza cerámica BR llena de agua en condiciones de laboratorio.

- Prototipo 2: Pieza cerámica LT llena de agua en condiciones de laboratorio.
- Prototipo 3: Pieza cerámica BB llena de agua en condiciones de laboratorio.
- Prototipo 4: Pieza cerámica BR húmeda en condiciones de laboratorio.
- Prototipo 5: Pieza cerámica BR llena de agua en condiciones de laboratorio.
- Prototipo 6: Pieza cerámica BB llena de agua en condiciones de laboratorio.

Se han tomado medidas (con los instrumentos de medición descritos anteriormente) en todos los prototipos de:

- La humedad relativa del laboratorio (%) representada en azul (**HR_{lab}**) en las gráficas de resultados. En los prototipos 5 y 6 corresponderán a medidas en exterior.
- La temperatura del laboratorio (°C) representada en rojo (**T^{lab}**) en las gráficas de resultados. En los prototipos 5 y 6 corresponderán a medidas en exterior.
- La humedad relativa próxima a la pieza cerámica (%) representada en naranja (**HR_{próx}**) en las gráficas de resultados.
- La temperatura de contacto en la superficie de la pieza (°C) representada en verde (**T^{contct}**) en las gráficas de resultados.
- La temperatura de inmersión dentro de la pieza cerámica, que mide la temperatura del agua (°C) representada en lila (**T^{inm}**) en las gráficas de resultados. En el prototipo 4 (pieza cerámica húmeda) se mide la temperatura interior no de inmersión.

Se realizan siempre dos pesados de las piezas cerámicas, antes y después del tiempo de monitorización, que varía dependiendo de las características del prototipo; para calcular cantidad de agua “rezumada” y cantidad de agua evaporada.

6.2. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.

6.2.1. Evolución del agua evaporada en los prototipos.

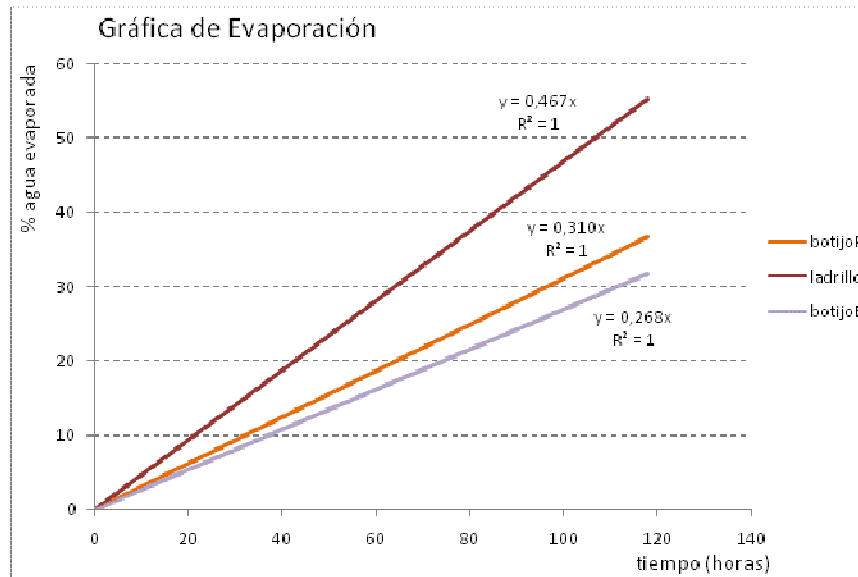
De los datos obtenidos de los pesos de los prototipos 1 a 3 (ensayados en laboratorio) antes y después del tiempo de monitorización se puede calcular el porcentaje evaporado con respecto al inicio del ensayo. En la gráfica el 0% representa evaporación cero (el inicio del experimento) y el 100% representaría la totalidad del agua evaporada (evaporación completa del agua contenida en las piezas cerámicas).

Cálculo porcentaje agua evaporada					
	TIEMPO (horas)				
	0	46	114,5	118	
Prototipo 1 [BR]	0	14,28	35,53	36,62	%
Prototipo 2 [LT]	0	21,52	53,57	55,21	%
Prototipo 3 [BB]	0	12,34	30,73	31,67	%

[Tab.7] Cálculo de agua evaporada según datos experimentales.

Por otra parte, el comportamiento de evaporación del agua dentro de las piezas cerámicas se puede aproximar a un comportamiento lineal por la homogeneidad lineal comprobada durante la fase experimental y el análisis de la representación gráfica.

Sabiendo el agua evaporada en los prototipos 1, 2 y 3 se puede estimar la ecuación lineal de evaporación según el tiempo. Con los datos obtenidos anteriormente (que se contemplan aquí en porcentaje) nos quedaría una gráfica de evaporación como la que se muestra en la siguiente página.



[Fig.22] Gráfica de los porcentajes de evaporación obtenidos.

[Anotación: El ladrillo resulta ser que es el que más agua “evapora”, contrasta con los datos de monitorización posteriores (se enfría menos) el sellado no estanco del la pieza ha podido provocar mayor pérdida de agua y de resultados no del todo acertados de evaporación]

Si no se tiene en cuenta en la valoración de resultados los obtenidos para el prototipo 2 [LT] se puede deducir que la porosidad parece que sí es una característica directamente influyente en la capacidad de enfriamiento evaporativo “cerámico”.

Además, con las ecuaciones de tendencia calculadas se puede estimar el tiempo del 100% de evaporación y por tanto obtener el “tiempo de de recarga” de agua.

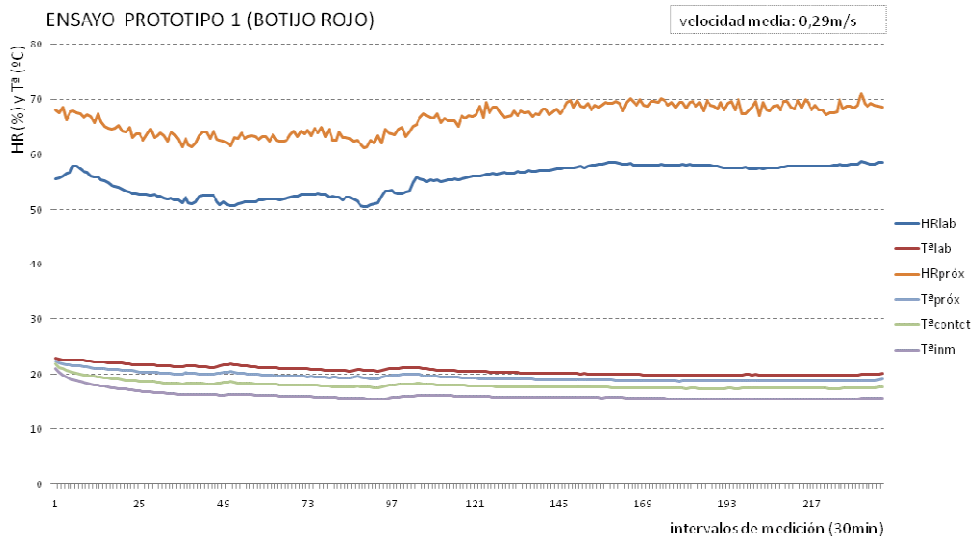
Tiempo de recarga (100% agua evaporada).			
Prot.1 [BR]	$y = 0,31x$ $x = 100/0,31$	322,6 horas	13 días
Prot.2 [LT]	$y = 0,467x$ $x = 100/0,467$	214,1 horas	9 días
Prot.3 [BB]	$y = 0,268x$ $x = 100/0,268$	373,1 horas	16 días

[Tab.8] Cálculo del tiempo de recarga de las piezas cerámicas.

En los prototipos experimentados aún queda por determinar variables de las piezas cerámicas como la cantidad de agua de la pieza como la superficie de exposición (forma). Para experimentaciones posteriores ya se están elaborando prototipos que cuantifiquen la influencia de estas otras variables de la pieza cerámica.

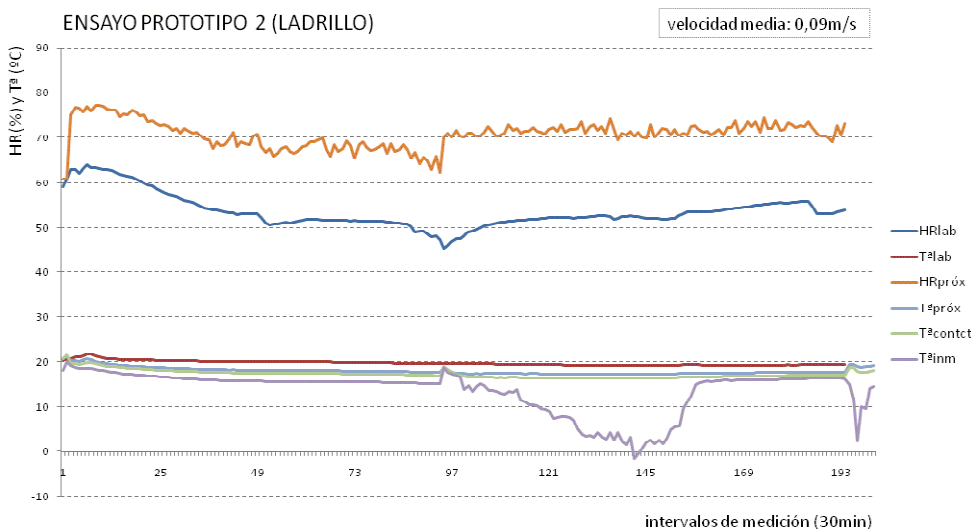
6.2.2. Lectura de resultados de la monitorización.

En una primera lectura de los resultados de monitorización, se obtienen las siguientes representaciones gráficas para los 6 prototipos experimentados.



[Fig.23] Gráfico de Tª (°C) y HR (%) respecto a tiempo para al Prototipo 1.

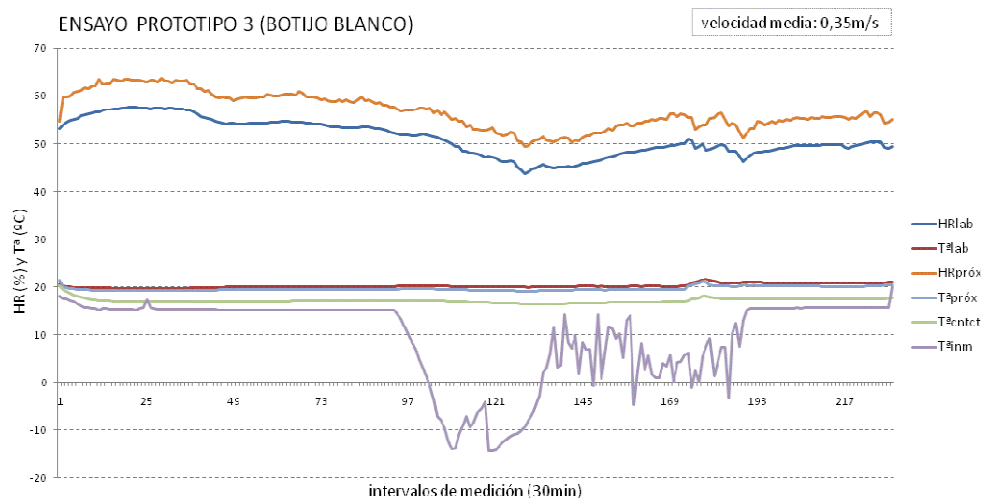
De esta primera gráfica se puede deducir que, en condiciones de laboratorio, la HR (humedad relativa) está aumentando en la proximidad del botijo un 11% y se está reduciendo en 1,5°C la temperatura próxima. La temperatura dentro de la pieza cerámica baja unos 5,5°C.



[Fig.24] Gráfico de Tª (°C) y HR (%) respecto a tiempo para al Prototipo 2.

[Anotación: Los picos de la línea lila corresponden a fallos de medición en la sonda de inmersión. No se han tenido en cuenta para la interpretación de resultados, puesto que el resto del comportamiento se mantiene estable dentro de unos valores razonables].

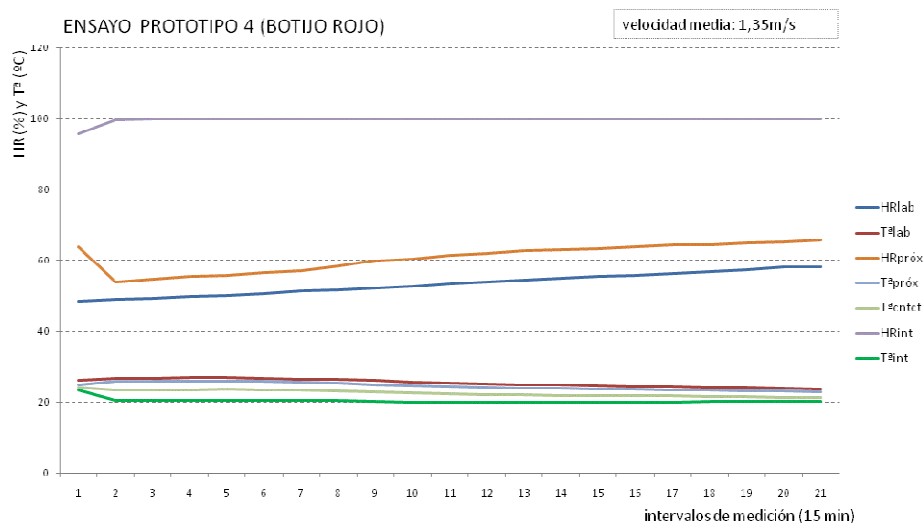
En este prototipo la temperatura interior de la pieza como de contacto no bajan tanto; en cambio, sube más la diferencia de humedad y baja más la de temperatura próxima. Puede ser debido a la superficie de exposición de la pieza o a que las mediciones no se hayan alteradas por las turbulencias próximas a la pieza, como puede pasar en la medición del resto de prototipos en los que se mide sobre una superficie esférica.



[Fig.25] Gráfico de Tª (°C) y HR (%) respecto a tiempo para al Prototipo 3.

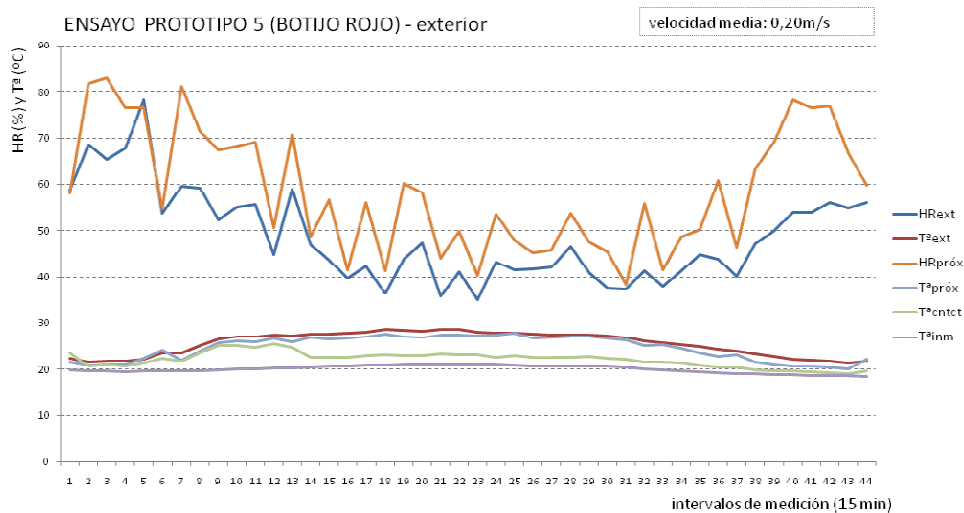
[Anotación: Los picos de la línea lila corresponden a fallos de medición en la sonda de inmersión. No se han tenido en cuenta para la interpretación de resultados, puesto que el resto del comportamiento se mantiene estable dentro de unos valores razonables].

De los valores obtenidos, se observa que el agua interior no se enfría tanto como en el prototipo 1, pero sí enfría más que prototipo 2. En cambio, la Tª de contacto es muy similar al prototipo 1, puede ser debido a que el termohigrómetro próximo medía un poco más separado de la superficie de la pieza cerámica que en el prototipo 1.



[Fig.26] Gráfico de Tª (°C) y HR (%) respecto a tiempo para al Prototipo 4.

La relevancia de este prototipo era el experimentar resultados con una pieza cerámica húmeda. El periodo de tiempo ha estado marcado por lo que ha tardado la pieza en secarse superficialmente. En la gráfica [Fig.26] se aprecia como a medida que la cerámica pierde humedad las líneas de temperaturas tienden a unirse; es decir, se agota la evaporación y por tanto el enfriamiento. Sin embargo, los valores obtenidos (aunque menos eficaces que los del prototipo 1) resultan bastante buenos para estar la pieza únicamente húmeda.



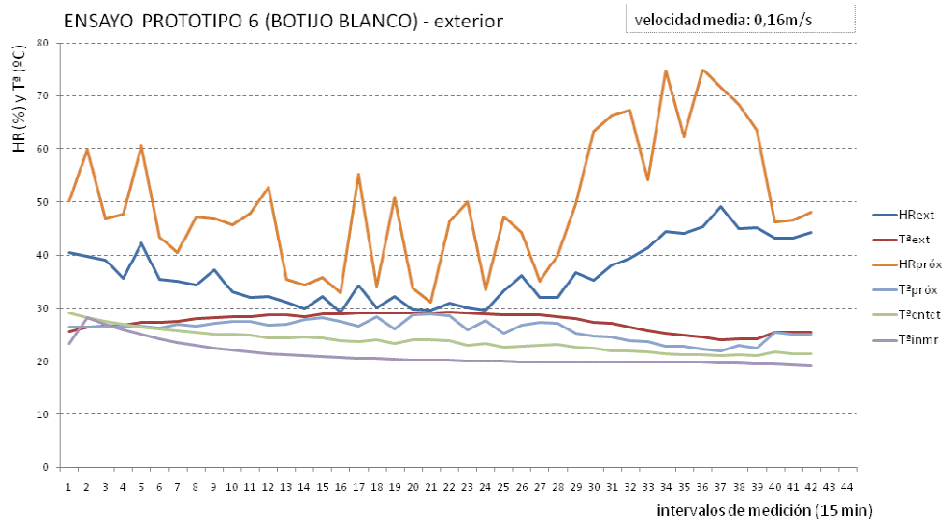
[Fig.27] Gráfico de T^a ($^{\circ}C$) y HR (%) respecto a tiempo para al Prototipo 5.

El prototipo 5 (junto con el 6) se realiza en ambiente exterior. El objetivo es poder comparar la eficiencia de la pieza cerámica llena de agua en ambiente exterior e interior; puesto que existen ejemplos construidos y prototipos experimentales que consideran esta posibilidad como una alternativa viable de enfriamiento evaporativo como acondicionamiento de espacios exteriores.

Aunque los valores obtenidos son bastante buenos para estar en un ambiente exterior, incluso la temperatura interior se reduce más, el aire próximo que se enfría es rápidamente desplazado por aire caliente que entra en contacto con la superficie de la pieza cerámica, provocando una mayor evaporación del agua contenida en la pieza y, por tanto, un enfriamiento mayor del agua alojada en el interior de la pieza. Es decir, el consumo de agua es mayor para una menor reducción de la temperatura próxima a la pieza cerámica.

Por otra parte, hay que añadir, que no se puede controlar en el exterior la velocidad de aire adecuada para el confort, sino que depende de las condiciones atmosféricas exteriores.

Por lo tanto, si se quiere encontrar la viabilidad de un sistema de EEC para exteriores, habrá que solucionar el control del movimiento del aire, tanto para estar en rangos de confort como para controlar la volatilidad del aire enfriado próximo y evitar la continua renovación por aire caliente. Habrá que buscar la generación de una estratificación o embolsamiento de aire frío que permita una aproximación a condiciones de confort.



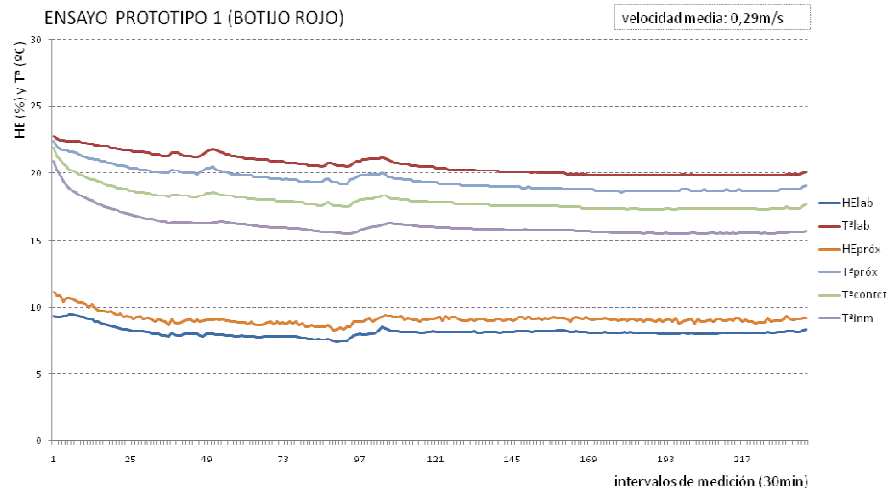
[Fig.28] Gráfico de Tª (°C) y HR (%) respecto a tiempo para al Prototipo 6.

Este ensayo también es realizado en un ambiente exterior, no sólo se cambia la pieza cerámica (con respecto al prototipo 5) sino que el inicio del ensayo se comienza con agua caliente (cerca de los 30°C) para poder evaluar tiempo de respuesta como comportamiento de enfriamiento evaporativo de la pieza. Los valores obtenidos de reducción de temperatura interior (inmersión) son los mejores hasta ahora; pueden ser debidos al efecto que el agua caliente ha tenido sobre la red capilar, dilatando y desobstruyendo los poros. Parece, por lo que se lee en la gráfica, que la mayor velocidad de evaporación del inicio ha hecho bajar la temperatura interior hasta unos valores que luego tiende a conservar a lo largo de toda la fase de experimentación. El proceso experimental ha mantenido una cierta “inercia” de funcionamiento que puede ser útil para consideraciones futuras en el diseño de sistemas o estrategias de EEC.

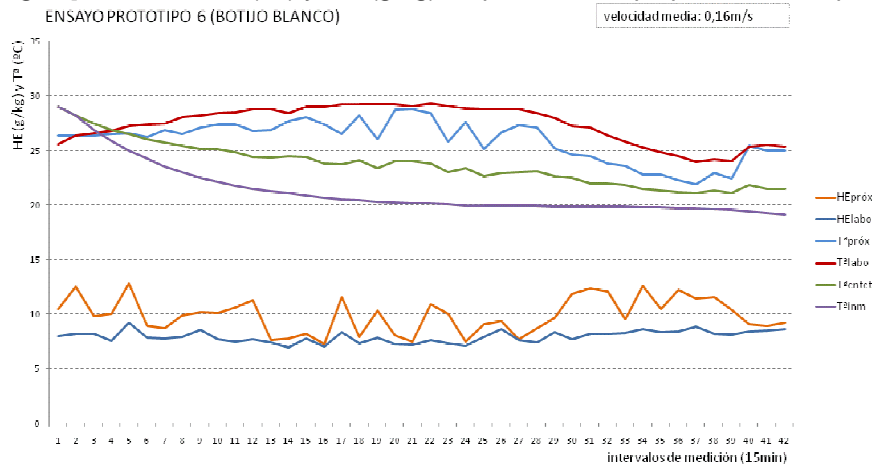
6.2.3. Discusión y análisis resultados.

Tras esta primera interpretación de los resultados obtenidos para los 6 prototipos ensayados, que corresponden a 6 situaciones distintas, se consideró necesario, para poder interpretar mejor lo que estaba pasando en algunos de los casos, realizar una segunda lectura comparando con valores de contenido de humedad (humedad específica) y de ésta con la temperatura.

Se presentan como ejemplo de esta segunda lectura el prototipo 1 y el prototipo 6, en las que se comparan las temperaturas y contenidos de humedad en el tiempo. Son similares a las anteriores pero permite realizar lecturas que antes quedaban camufladas.



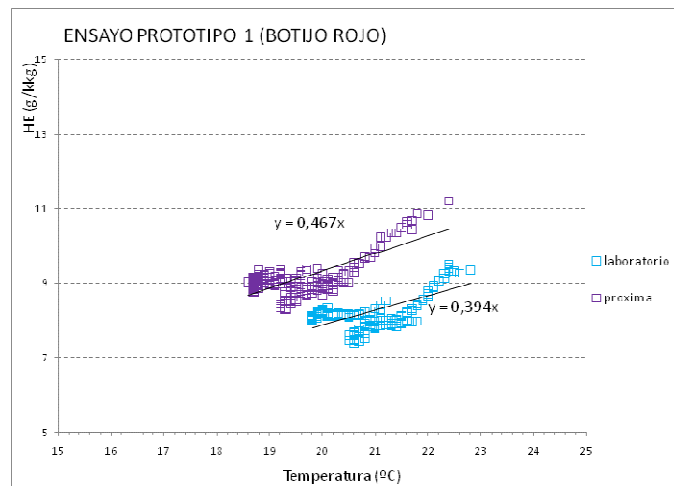
[Fig.29] Gráfico de Tª (°C) y HE (g/kg) respecto al tiempo para el Prototipo 1.



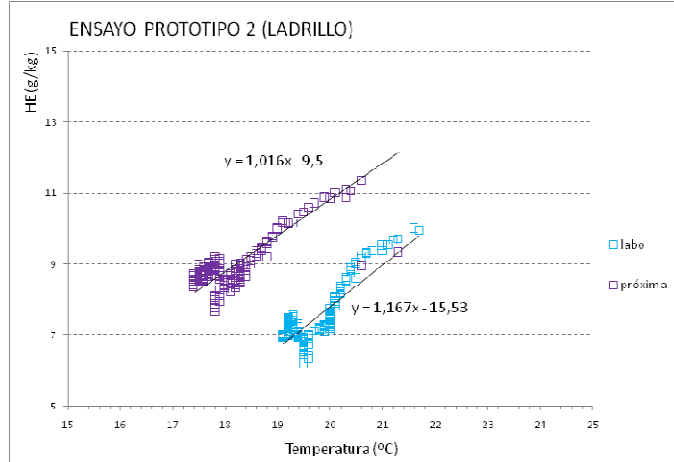
[Fig.30] Gráfico de Tª (°C) y HE (g/kg) respecto a tiempo para el Prototipo 6.

En estas gráficas se analizan mejor las variaciones de temperatura y contenido de humedad y se pueden deducir comportamientos que antes no quedaban claros. Se puede analizar como los cambios de temperatura y contenido de humedad en ocasiones van asociados y en otras no; en el caso de un ambiente interior puede suponer la existencia de cargas internas y en el caso de exteriores el aumento del movimiento del aire.

Si se compara el contenido de humedad (HE, g/kg) y temperatura (Tª, °C) en el mismo gráfico se obtiene una nube de puntos que van a indicar tendencias de comportamiento. En este caso sólo se muestran las gráficas para dos de los prototipos ensayados en laboratorio (prot.1 y prot.2) puesto que los casos en exteriores el comportamiento se haya muy alterado por las variaciones bruscas de humedad. Se ha calculado la recta de tendencia, que por aproximación, aunque el comportamiento no sea lineal, puede aproximarse un cierto patrón de comportamiento del sistema EEC en cada uno de los prototipos ensayados. Se representan, por tanto, en las gráficas siguientes [Fig.31] y [Fig.32] los datos obtenidos de Tª y HR de laboratorio (en cian) y los datos de Tª y HR próximos a la superficie de la pieza cerámica.

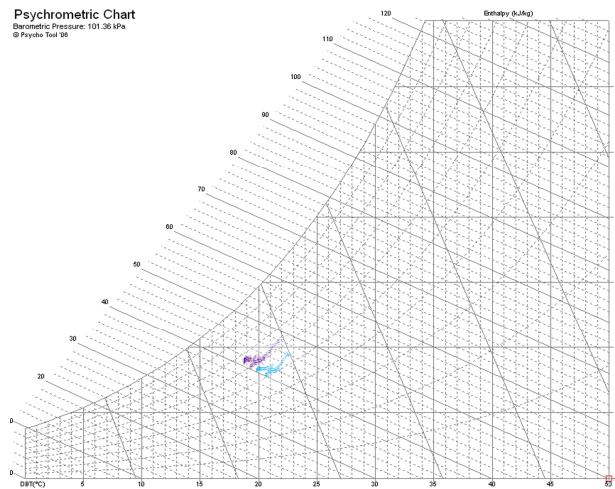


[Fig.31] Gráfico de Tª (°C) y HE (g/kg) respecto a tiempo para al Prototipo 1.



[Fig.32] Gráfico de Tª (°C) y HE (g/kg) respecto a tiempo para al Prototipo 2.

Introduciendo estos datos en un diagrama psicrométrico, se refleja lo que ya parecía intuirse, que los valores se están moviendo por unas líneas de humedad relativa determinadas. Comportamiento que corresponde a unas condiciones ambientales y sus transformaciones adiabáticas posibles. En el psicrométrico [Fig.33] se ve claramente el efecto que tiene la pieza cerámica “enfriadora” sobre el ambiente, está enfriándolo en casi 2°C y aumentando su humedad relativa en torno a un 10%; lo que provoca un aumento de contenido de humedad en el ambiente de entorno a 1gr/kg de aire seco y una reducción de temperatura asociada de entre 1,5 y 2°C. Datos que se acercan bastante a los cálculos teóricos como se verá más adelante [referencia 1]

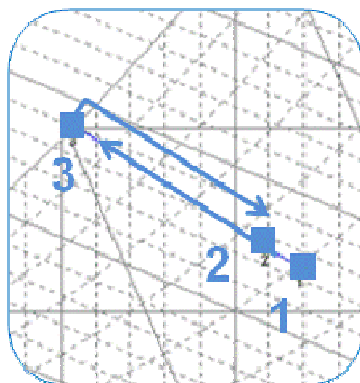


[Fig.33] Representación sobre el diagrama psicrométrico del comportamiento del Prototipo 1.

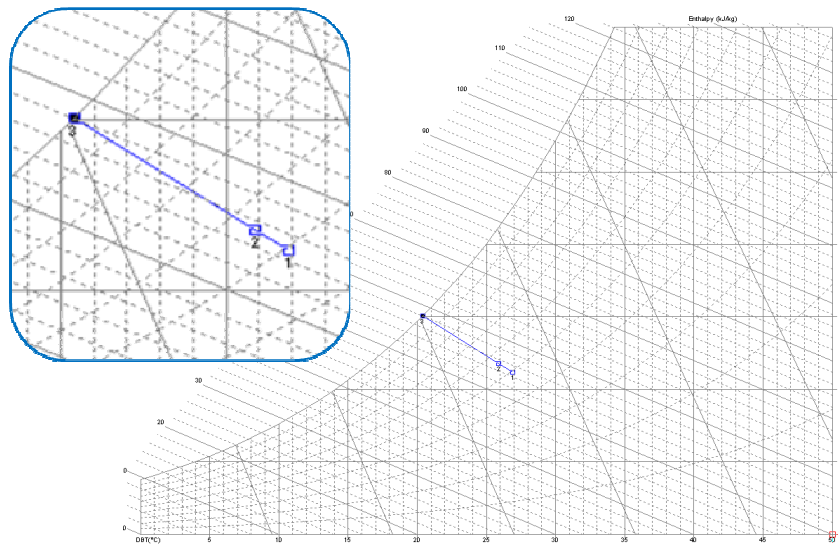
Se pueden añadir tres observaciones más:

- 1- En todos los ejemplos vistos, la temperatura superficial (de contacto) siempre va a estar a medio camino entre la temperatura de rocío y la T^a próxima.
- 2- La temperatura de dentro de la pieza cerámica siempre va a tender a ser la temperatura de bulbo húmedo de ese ambiente. [Fig.35]
- 3- A mayor temperatura del ambiente más isoentálpico es el proceso de enfriamiento; por lo tanto, mayor efectividad del sistema.

En los siguientes diagramas se representa la posición psicrométrica instantánea de los 3 puntos medidos en los prototipos. Donde el punto 1 corresponde al del ambiente (T^a y HR del laboratorio), el punto 2 al ambiente próximo (T^a y HR próximas a la superficie de la pieza cerámica) y el punto 3 al del interior de la pieza cerámica (T^a interior y HR del 100%). El proceso de enfriamiento que se está produciendo entre el valor más caliente (laboratorio) y el más frío (interior de la pieza cerámica) se puede representar en esta primera figura [Fig.34] en la que la flecha indica la transformación psicrométrica que se está produciendo. Se puede concluir de aquí que cuanto más esté el punto 2 cerca de 3 más eficiente será la solución del sistema EEC empleada.



[Fig.34] Transformación psicrométrica producida por el sistema EEC.



[Fig.35] Transformación psicrométrica producida por el sistema EEC a 27°C (laboratorio).

6.3. CONCLUSIONES EMPÍRICAS.

En estas tablas siguientes se exponen comparativamente las conclusiones numéricas de los resultados de los prototipos experimentados en laboratorio y exterior [Tab.9].

Salto diferencial	PROT.1	PROT.2	PROT.3	PROT.4	PROT.5	PROT.6
HR laboratorio y Próxima (%)	11,5 %	17,3 %	5,4 % [*]	7,6 %	10 %	13,2 %
Tª laboratorio y Próxima (°C)	1,4 °C	1,8 °C	0,6 °C [*]	0,9 °C	0,8 °C	1,5 °C
Tª laboratorio y de contacto (°C)	3,1 °C	2,5 °C	3,0 °C	2,9 °C	3,4 °C	3,7 °C
Tª laboratorio y de inmersión (°C)	5,5 °C	4,2 °C	4,9 °C	5,1 °C [**]	5,6 °C	6,3 °C

[*] Por la posición del datalogger que mide Tª y HR próximas, está más separado de la superficie de la pieza que en los otros ensayos y por eso las diferencias son menores.

[**] Es la comparativa entre la temperatura de laboratorio y la del interior de la pieza (no hay de inmersión).

[Tab.9] Tabla de resultados de los datos obtenidos en laboratorio y en ambiente exterior.

El prototipo 1 [BR] resulta ser el que más enfría el agua alojada en su interior y la superficie contenedora; en cambio, paradójicamente, la HR y Tªs próximas a la superficie no son tan bajas como en el prototipo 2 [LT]. Esto, como ya se ha comentado anteriormente, es muy probable que se deba a la “no precisión” de las mediciones de HR y Tªs próximas; ya que al estar trabajando con una superficie casi esférica y estar sometidos a una velocidad de viento próxima a los 0,2m/s las sondas se ven afectadas. Por otro lado, tenemos los prototipos 5 y 6 (de exterior), donde se refleja claramente como la diferencia entre la temperatura de inmersión y la exterior y la diferencia entre la de contacto y la exterior es mayor que en los datos anteriores. Por lo tanto, la cerámica se está enfriando más y está enfriando más el agua alojada en su interior. Pero al estar en un ambiente exterior con velocidades de aire muy variables (turbulencias) y un entorno próximo muy alterable, no se consiguen rendimientos óptimos, no baja tanto la temperatura como se cabría esperar. Aún así estamos bajando en el prototipo 6 una media de 1,5°C la temperatura próxima, que es ya un valor razonable.

Con estos resultados y con los datos obtenidos de evaporación, su representación gráfica y cálculo de ecuaciones, se puede estimar el contenido de humedad que se está aportando a un ambiente y por tanto la capacidad de refrigeración (potencia de enfriamiento) que tiene un sistema EEC con piezas cerámicas de las características ensayadas. Es decir, conociendo el calor latente de vaporización del agua (2424J/m^3) y sabiendo que en la evaporación de 1g de agua en un m^3 de aire se está reduciendo la temperatura seca de este ambiente en $2,2^\circ\text{C}$, teniendo los datos de temperatura interior y exterior o sabiendo la carga de refrigeración necesaria para ese local el cálculo sería sencillo [referencia 1]. Estos datos teóricos de cálculo, como se ha visto, son bastante próximos a los resultados empíricos obtenidos por lo que el potencial de un sistema de EEC integrado en la arquitectura tendría viabilidad controlando las variables establecidas en el apartado 4.

7. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN:

Como se expuso en el apartado 4, las variables en cada uno de los elementos del sistema que van a interesar para evaluar la eficacia del funcionamiento de sistemas de enfriamiento evaporativo poroso cerámico van a ser:

- Fluido agua: la calidad del agua y su temperatura.
- Fluido aire: Contenido de humedad, temperatura y su velocidad (movimiento).
- Material cerámico: porosidad y red capilar.

Estos porcentajes de eficiencia variarán según las variables de los 3 elementos principales del sistema que se han mencionado; por tanto, no sólo es fundamental controlar las variables sino establecer los porcentajes de eficiencia que se pueden llegar a obtener dependiendo del clima de la localidad en la que se esté aplicando el sistema.

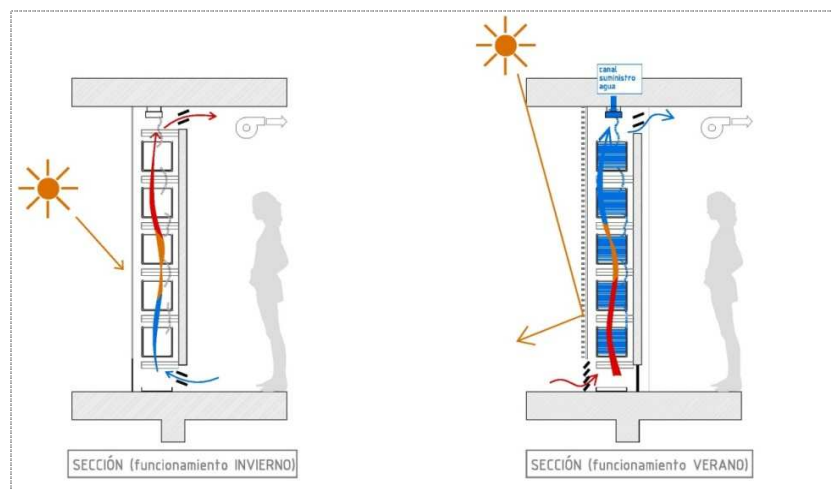
Como conclusiones finales a los resultados empíricos obtenidos de la eficiencia del EEC:

- La eficiencia va a depender de la temperatura ambiente. A mayor temperatura, mayor eficiencia.
- Las variables de la pieza cerámica que influyen son:
 - La porosidad. Es una variable determinante, se preveía y se ha demostrado empíricamente.
 - La superficie de exposición. Faltaría por determinar mejor en cuánto influye.
 - La cantidad de agua en la pieza. Ésta parece que influye pero no se ha podido determinar realmente si tiene mucha importancia, puesto que en los resultados del Prototipo 6 sí que enfriaron más pero podría ser debido a que había una mayor temperatura o que al inicio se le introdujo aire caliente.
- Influye el tiempo de exposición del aire. Por lo que el aire debe estar el tiempo justo para que se enfríe lo suficiente (que la evaporación del agua sea constante), no interesan velocidades de más de $0,15\text{-}0,20\text{m/s}$, alteraría el confort humano.
- El Enfriamiento Evaporativo Cerámico en piezas húmedas también ha resultado bastante efectivo. Por lo que puede ser otra línea de investigación.

Como futuras líneas de investigación, a partir de esta primera fase empírica, se plantean:

- Ensayos con distintas variables del sistema: viento, porosidad, formas, masa térmica...
- Viabilidad de un sistema por humectación. Aunque es complejo el mantener una pieza completamente húmeda constantemente; es decir, con toda su red capilar en saturación, la eficacia del enfriamiento se ha visto que es altamente efectiva y puede ser una solución para un sistema con mayor ahorro de agua.
- Viabilidad en un prototipo. Trasladar los resultados empíricos con las piezas cerámicas a un prototipo con integración arquitectónica inmediata.

El tercer punto expuesto se encuentra en fase de desarrollo actualmente. Conociendo el clima de la localidad a emplear el sistema EEC y controlando las variables de los 3 elementos se ha llegado a diseñar y calcular un prototipo. Es decir, la labor de investigación realizada sobre el potencial de eficacia de un sistema de enfriamiento evaporativo mediante piezas porosas cerámicas llenas de agua, ha servido para sentar las bases de diseño del primer prototipo de integración arquitectónica que será llevado a la práctica y monitorizado en un futuro no lejano. [Fig. 36]



[Fig.36] Diseño de prototipo –en desarrollo- de aplicación del EEC.

REFERENCIAS

- [1] Neila González, F. Javier. *Arquitectura Bioclimática en un entorno sostenible*. Madrid, 2004. Ed. Munilla-Leira. ISBN-84-89 150-64-8.
- [2] Bedoya Frutos, Cesar; Neila González, Fco. Javier, 1997. *Técnicas Arquitectónicas y constructivas de Acondicionamiento ambiental*. Madrid, 1997. Editorial Munilla-Lería. ISBN: 94-89150-20-6.
- [3] Givoni, B. "Passive and low energy cooling of buildings". Ed. Van Nostrand Reinhold. 1994, New York. ISBN.: 0442010761.
- [4] Olgyay, Victor. "Arquitectura y Clima" (Manual de diseño). Ed. Gustavo Gili. Barcelona, 2006 (4ª tirada). ISBN-13: 978-84-252-1488-2.
- [5] García Morales, Soledad . *METODOLOGÍA DE DIAGNÓSTICO DE HUMEDADES DE CAPILARIDAD ASCENDENTE Y CONDENSACIÓN HIGROSCÓPICA EN EDIFICIOS HISTÓRICOS*. [tesis doctoral, ETSAM, UPM. 1996]

- [6] Fernández Chiti, Jorge. "Curso práctico de cerámica". Ed. Condorhuasi. Buenos Aires, 1995. TOMOS 1 y 2.
- [7] Morales Güeto, J. 2005. Tecnología de los materiales cerámicos. Ed. Díaz Santos. ISBN: 84-7978-722-8.
- [8] C. Martín Gómez, P. López, A. Fiestas. "Instalaciones del Pabellón de España en la Expo 2008". Informes de la Construcción Vol. 61, 515, 5-22. Julio - Septiembre 2009. ISSN: 0020-0883 e ISSN: 1988-3234. doi: 10.3989/ic.08.018.
- [9] Morillón Gálvez, David. Ponencia "INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS PASIVOS DE ENFRIAMIENTO". 1 al 3 de julio de 2002 Universidad de Guadalajara, Jalisco (México).
- [10] AA.VV. "Control Climático en Espacios Abiertos. Evaluación del Proyecto Expo'92". Sevilla. Ed. Secretaría General Técnica del Ciemat. Madrid, 1995. ISBN: 84-7834-258-3.
- [11] E. Velasco Gómez, F.J. Rey Martínez, F. Varela Díez, M.J. Molina Leyva, R. Herrero Martín. "Description and experimental results of a semi-indirect ceramic evaporative cooler". International Journal of Refrigeration, nº 28 (2005) pgs. 654-662.
- [12] Schiano-Phan, Rosa. Congreso PLEA 2004 "The 21th Conference on Passive and Low Energy Architecture". Eindhoven. Ponencia: "The Development of Passive Draught Evaporative Cooling Systems Using Porous Ceramic Evaporators and their application in residential Buildings" (origen: London, Reino Unido).
- [13] Jiang He, Akira Hoyano. "Experimental study of cooling effects of a passive evaporative cooling wall constructed of porous ceramics with high water soaking-up ability". Building and Environment (2009), doi: 10.1016 / j.buildenv.2009.07.002. (origen: Tokio, Japón)
- [14] Elfatih Ibrahim, Li Shao, Saffa B. Riffat. "Performance of porous ceramic evaporators for building cooling application". Energy and Buildings nº 35 (2003) 941-949. (origen: Nottingham, Reino Unido).
- [15] S.B. Riffat, Jie Zhu. "Mathematical model of indirect evaporative cooler using porous ceramic and heat pipe". Applied Thermal Engineering nº 24 (2004) 457-470. (origen: Nottingham, Reino Unido).

Normativa:

- _NORMA UNE-EN ISO 12571: "Prestaciones higrotérmicas de los productos y materiales para edificios. Determinación de las propiedades de sorción higroscópica". Marzo 2000.
- _NORMA UNE-EN 772-11: 2001. "Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería".
- _NORMA UNE-EN 13755(AC=2004). "Método de Ensayo para piedra natural. Determinación de la absorción de agua a presión atmosférica".
- _REGLAMENTO DE INSTALACIONES TÉRMICAS DE LOS EDIFICIOS (RITE) como desarrollo de la exigencia básica HE 2 (Rendimiento de las instalaciones térmicas).
- _Código Técnico de la Edificación (Documentos Básicos HE y HS). Ed. Liteam. Madrid, 2006. ISBN: 84-95596-81-4. HE (Ahorro de Energía), Madrid, 2008. ISBN: 978-84-95596-96-3.