

REIA #06 / 2016  
200 páginas  
ISSN: 2340-9851  
www.reia.es

---

## David Palomar Aguilar

Universidad San Pablo CEU / davidpalomaraguilar@hotmail.es

## Consolación Ana Acha Román

Universidad Politécnica de Madrid. ETSAM

## Soledad García Morales

Universidad Politécnica de Madrid. ETSAM

### *Determinación del flujo energético en el interior de una cámara ventilada de mortero de cal mediante el principio de flotabilidad / Energy flux calculation by buoyancy principle in a lime mortar ventilated cavity*

La fachada ventilada mejora significativamente el aislamiento térmico en condiciones climáticas cálidas respecto a soluciones equivalentes de una sola hoja. Al emplear acabados de baja absorptancia se reduce la carga por radiación térmica, sin embargo las implicaciones sobre el tiro convectivo no han sido estudiadas en determinados materiales.

El siguiente artículo estudia la convección natural en el interior de la cámara ventilada sobre prototipos con distintos acabados. A través de las propiedades psicrométricas del aire se obtienen las densidades dentro y fuera de la cámara. Mediante el principio de flotabilidad se calcula el empuje, que permite determinar la dirección e intensidad de la corriente de aire con gran resolución en condiciones exteriores reales.

Los ensayos sobre paneles de mortero de cal muestran corrientes en sentido descendente de forma generalizada, al contrario que en la mayoría de fachadas ventiladas.

Ventilated façades substantially improve thermal insulating in hot climates in comparison to similar one layer solutions. The use of low absorptance finishings reduces the thermal radiation load, but the implications in the stack effect are not studied on certain materials.

The following paper studies natural convection inside the ventilated air duct with different prototypes of finishings. The densities inside and outside the cavity are achieved with the psychometrics properties of the air. The thrust is calculated by means of the buoyancy principle, allowing the accurate determination of the airflow direction and intensity in real external conditions.

The tests with lime mortar panels show descending currents widely, unlike most of ventilated façades.

---

Fachada ventilada, tiro convectivo, principio de flotabilidad, prefabricado de cal, sostenibilidad, ahorro energético /// Ventilated façade, stack effect, buoyancy principle, precast lime, sustainability, energy saving

Fecha de envío: 02/09/2015 | Fecha de aceptación: 10/11/2015

the 1990s, the number of people with diabetes has increased in all industrialized countries. In the Netherlands, the prevalence of diabetes is estimated to be 10% in 2000, with a projected increase to 15% by 2010 (1).

Diabetes is a chronic disease with a high prevalence and a high burden of complications. The most common complications are cardiovascular disease, nephropathy, retinopathy, and neuropathy. The prevalence of these complications is high, and the burden of complications is increasing (2). The most common complication is cardiovascular disease, which is the leading cause of death in people with diabetes (3).

The burden of complications is increasing because of the increasing prevalence of diabetes and the increasing duration of the disease. The burden of complications is also increasing because of the increasing prevalence of risk factors for complications, such as obesity, hypertension, and hyperlipidemia (4). The burden of complications is also increasing because of the increasing prevalence of comorbidities, such as heart failure and chronic kidney disease (5).

The burden of complications is also increasing because of the increasing prevalence of complications themselves. The prevalence of cardiovascular disease is increasing, and the prevalence of nephropathy, retinopathy, and neuropathy is also increasing (6). The burden of complications is also increasing because of the increasing prevalence of complications themselves (7).

The burden of complications is also increasing because of the increasing prevalence of complications themselves (8). The burden of complications is also increasing because of the increasing prevalence of complications themselves (9). The burden of complications is also increasing because of the increasing prevalence of complications themselves (10).

The burden of complications is also increasing because of the increasing prevalence of complications themselves (11). The burden of complications is also increasing because of the increasing prevalence of complications themselves (12). The burden of complications is also increasing because of the increasing prevalence of complications themselves (13).

The burden of complications is also increasing because of the increasing prevalence of complications themselves (14). The burden of complications is also increasing because of the increasing prevalence of complications themselves (15). The burden of complications is also increasing because of the increasing prevalence of complications themselves (16).

The burden of complications is also increasing because of the increasing prevalence of complications themselves (17). The burden of complications is also increasing because of the increasing prevalence of complications themselves (18). The burden of complications is also increasing because of the increasing prevalence of complications themselves (19).

## 1. Introducción

El sector de la edificación debe implementar las medidas de ahorro energético para alcanzar el objetivo de edificios de energía casi-nula acordados para el 2020. Sin embargo el modelo vigente para calcular el flujo energético a través de la envolvente presenta limitaciones y sus resultados se desvían de la realidad (RODRÍGUEZ et al. 2014).

La fachada ventilada se caracteriza por una hoja exterior que actúa como primera barrera contra los agentes atmosféricos y como acabado de la envolvente. Está separada de la hoja principal por una cámara de aire que sirve de colchón térmico (WARTZECK et al. 2010). Cuando la radiación solar incide sobre el elemento exterior, la hoja exterior irradia a su vez hacia la cámara de aire, y la energía es disipada por la convección del aire en dicha cámara. Este aire de inferior densidad asciende por la cámara.

La fachada ventilada activa es una envolvente de dos hojas transparentes u opacas, que se emplea en climas fríos para precalentar el aire antes de introducirlo en el edificio, o devolverlo al exterior cuando no existe demanda de calefacción. En edificios de oficinas situados en zonas climáticas C1, C2 y C3, el potencial de ahorro en calefacción puede llegar al 20% (kWh/m<sup>2</sup>) para edificios lineales (IRULEGI et al. 2012); mientras que para zonas con inviernos muy fríos tipo D3, el ahorro sería del 10% según los mismos autores.

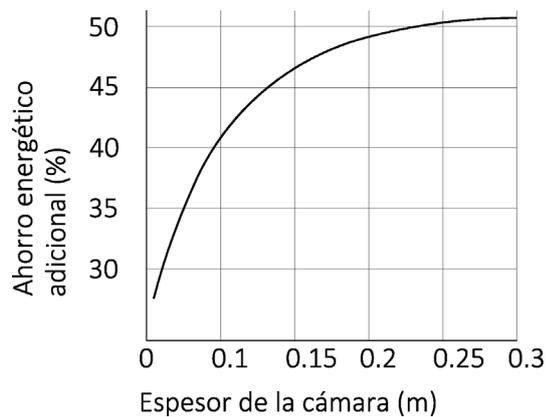
Mediante simulaciones de muros trombe (GAN 1998) observa las máximas velocidades en el interior de la cámara ventilada con espesores entre 0,2 y 0,3m.

En climas cálidos, la renovación del aire del interior de la cámara evita el sobrecalentamiento de la fachada, mejorando su eficiencia del 25 al 40% respecto a fachadas con el mismo aislamiento pero de una sola hoja (MONTERO 2007), (CIAMPI et al. 2003). Según las simulaciones de (MORA et al. 2011), puede suponer reducciones en la demanda de refrigeración de hasta el 58,7%. Otra de las características estudiadas en la bibliografía científica es que la temperatura del aire de esta cámara se incrementa progresivamente con la altura (MORA et al. 2011), GIANCOLA. (2010) y depende de factores como el material y masa de la hoja exterior o la altura y el espesor de la cámara.

Fig. 1. Gráfica de la variación del ahorro energético en relación al espesor de la cámara ventilada, redibujado a partir de (CIAMPI et. al 2003).

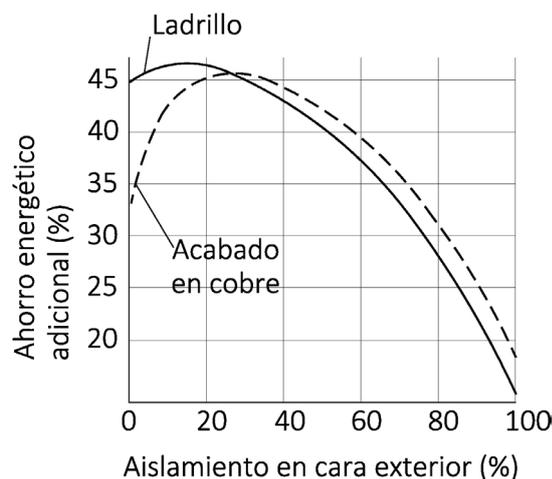
Fig. 2. Gráfica de la variación del ahorro energético en relación al porcentaje de aislamiento trasladado a la cara exterior de una cámara ventilada. Redibujado a partir de (CIAMPI et. al 2003).

Influencia del espesor de la cámara ventilada para evitar el sobrecalentamiento:



(CIAMPI et. al 2003) experimenta como el ahorro energético aumenta con el espesor. A partir de 0,3m carece de sentido incrementar la cámara y propone 0,15m como el óptimo.

Aislamiento en la hoja exterior:



La disposición de una fracción del aislamiento total en la hoja exterior puede incrementar la eficiencia del conjunto de la fachada. Los experimentos de (CIAMPI et al 2003) trasladan distintos porcentajes del aislamiento de la cara interna a la externa. El ahorro energético puede superar el 10% para acabados como el cobre, poliéster o aplacados cerámicos, pero inferior al 5% para hojas exteriores de ladrillo. Dependiendo del material de acabado, el máximo ahorro se produce para porcentajes de aislamiento del 15 al 30% trasladados a la cara exterior.

Si la corriente convectiva asciende por la cámara ventilada es por estar a una mayor temperatura que el aire exterior (principio de flotabilidad). La hoja exterior actúa como cuerpo radiante por efecto de la exposición al sol conforme a la *Ley de Stefan-Boltzmann* que relaciona la densidad de flujo de energía radiante emitida con la temperatura del cuerpo emisor (ESPULGAS et al. 2005).

La naturaleza de la radiación tiende a atravesar aquellos cuerpos de menor densidad como el aire. Los aislamientos reflectivos, colocados bajo cubierta o en las cámaras ventiladas, compensan este efecto. Sin embargo los materiales metálicos pulidos, a pesar de reflejar una gran cantidad de energía solar se calientan bajo la radiación solar, puesto que su emisividad es baja (BERDAHL 1995).

Otra vía es reflejar el máximo de energía en el acabado exterior del edificio. (TAHA et al. 1988) estudian el efecto del albedo sobre las cargas térmicas de los edificios y sobre la isla de calor urbana. (BARBERO 2011, 2014) estudia las propiedades térmicas de los morteros de cal como *superficies selectivas frías*. Estas se caracterizan por su baja absorción de la radiación en onda corta y alta emitancia en onda larga a temperatura ambiente.

En función de la longitud de onda pueden distinguirse:

Radiación de onda corta o *infrarrojo cercano*. Es la que proviene del sol de forma directa o difusa (400-3.000 nm) (GOFORTH et al 2002). Está condicionada por la localización, orientación, inclinación, condiciones climáticas y propiedades de la superficie del material.

Radiación de onda larga o *infrarrojo lejano*. Se produce entre los cuerpos y la bóveda celeste. (3.000-50.000 nm) (GOFORTH et al 2002). En el caso de fachadas, estas pueden radiar hacia el suelo u otros edificios si existe una diferencia de temperatura. El flujo de calor depende de la absorción de la superficie estudiada y las temperaturas del cuerpo, el cielo (BERDAHL et al. 1982) y el suelo, así como de los ángulos visibles de uno u otro desde la superficie estudiada.

Como la radiación solar en el espectro de onda larga es despreciable frente al intercambio de energía con la bóveda celeste, puede lograrse un enfriamiento pasivo radiante con materiales de gran emitancia pero que reflejen la onda corta (JOHNSON et al 2003).

Si se emplean este tipo de materiales *selectivos fríos* como acabado de fachada ventilada es previsible que se reduzca la temperatura de la hoja exterior, pero no está suficientemente estudiado el desarrollo de la corriente convectiva en el interior de la cámara de aire y las consecuencias sobre la transmitancia de este tipo de envolventes.

## 2. Objetivo de la investigación

*2.1 La investigación se encuadra en la búsqueda de materiales y soluciones constructivas de fachada que mejoren las prestaciones térmicas para climas cálidos*

Se propone un experimento que tiene por objetivo determinar el flujo energético instantáneo de un panel de mortero de cal analizando el tiro térmico que se produce en la cámara ventilada.

*2.2 Modelo teórico:*

Fig.3. Hipótesis de relación entre propiedades selectivas de los materiales, flujo energético y movimiento del aire en la cámara ventilada en los prototipos 1, 2 y 3.

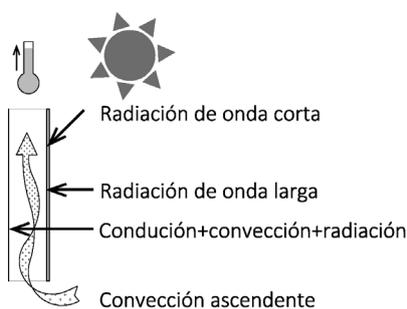
El intercambio de calor en una fachada es un problema complejo en el que confluyen intercambios por conducción, convección, radiación, condicionantes atmosféricos, así como la geometría y características de los materiales.

Sin dejar de considerar el aislamiento de la envolvente como la principal medida de ahorro energético, se busca un material de acabado económico, de baja tecnología y permeable al vapor de agua que limite el ingreso de calor en la edificación gracias a sus propiedades *selectivas frías*. Tradicionalmente se ha empleado la cal para este fin.

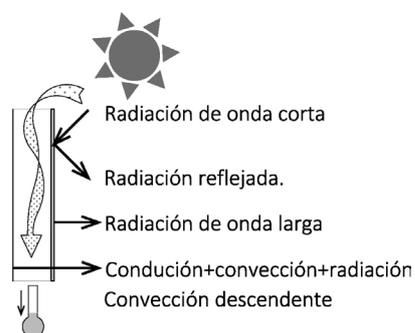
La hipótesis es combinar este material con el sistema de fachada ventilada, demostrando la idoneidad energética para climas cálidos de un panel de mortero de cal como acabado exterior. El método para determinarlo es analizar el tiro térmico, cuantificando el empuje que se produce en el interior de la cámara.

Una superficie fría debería de radiar mayor cantidad de energía de la que absorbiese. Al disponerlo como acabado de un panel de fachada ventilada se mantendría por debajo de la temperatura ambiente, enfriando a su vez el aire situado en el interior de la cámara. Este verá incrementada su densidad y por el principio de flotabilidad iniciará un movimiento descendente. El estudio se completará con un prototipo de referencia a base de chapa de acero pintada que actuará como *cuerpo gris*. El comportamiento de cada prototipo se representa en el siguiente esquema:

Prototipo P3 acabado metálico:



Prototipos P1 y 2 de mortero de cal:



Un anemómetro situado en la cámara ventilada nos indicaría la velocidad, pero no la dirección; invalidándolo como único método de análisis.

El experimento contempla medir la temperatura y humedad relativa tanto en el interior de la cámara ventilada como en el exterior. Mediante las propiedades psicrométricas se determina la densidad del aire y mediante el principio de flotabilidad se calcula el empuje.

### 2.3 Validación del modelo teórico mediante el ensayo experimental

#### Psicrometría:

La psicrometría estudia las propiedades del aire húmedo por medio de las leyes termodinámicas, estableciendo relaciones fundamentalmente entre temperatura ( $\theta$ ), humedad relativa ( $HR.$ ) y presión ( $P$ ).

Densidad del aire húmedo ( $\rho_h$ ):

Es la suma de las masas del aire seco ( $m_a$ ) más la de vapor de agua ( $m_v$ ), dividida entre el volumen total de la mezcla ( $v_h$ ).

$$\rho_h = \text{masa total} / \text{volumen total} = m_a + m_v / v_h = (1/v)(1+W) \text{ (ASHRAE 1997).}$$

Donde:

$\rho_h$ : es la densidad del aire húmedo en ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$v$ : es el volumen específico del vapor de agua por kg de aire seco en ( $\text{m}^3/\text{Kg}$ )

$W$ : es la humedad absoluta en ( $\text{kg}_w/\text{kg}_{as}$ )

Fuerza de empuje en el interior de la cámara ventilada ( $F$ ):

Es la fuerza resultante del incremento de densidad; equivalente al peso de de aire que alberga el volumen comprendido en el interior de la cámara ventilada, en las condiciones de humedad y temperatura exteriores, menos el peso de ese mismo volumen en las condiciones interiores.

Como:

$$F = m \cdot a, \text{ y } m = V \cdot \rho$$

Entonces:

$$F = (\rho_{ex} \cdot V \cdot g) - (\rho_{1,2,3} \cdot V \cdot g)$$

Donde:

$F$ : es la fuerza de empuje en ( $\text{kg} \times \text{m}/\text{s}^2 = \text{N}$ )

$\rho_{ex}$ : es la densidad del aire exterior, varía con la temperatura, humedad y presión atmosférica.

$\rho_{1,2,3}$ : Son las densidades del aire en el interior de las cámaras ventiladas de los paneles 1, 2 y 3 respectivamente. Varía con la temperatura, humedad y presión atmosférica.

$V$ : es el volumen de del tramo de cámara ventilada. Se ha considerado  $1\text{m}^3$  en todos los casos para poder comparar la convección entre los distintos prototipos.

$g$ : es la gravedad terrestre ( $9,8\text{m}/\text{s}^2$ ).

Los valores de esta fuerza serán positivos cuando la corriente sea ascendente, indicando que la hoja exterior absorbe mayor energía de la que es capaz de disipar y negativos en caso contrario.

### 3. Método de experimentación

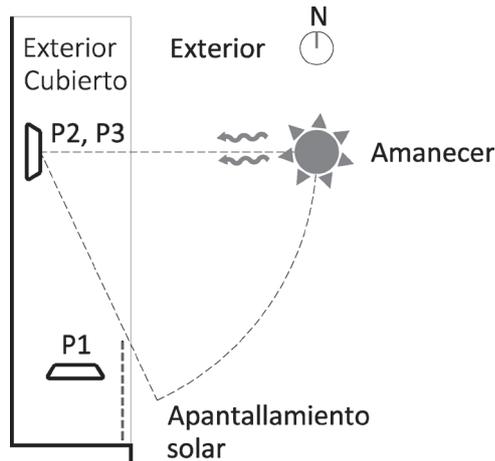
#### 3.1 Diseño del banco de experimentación

Todos los ensayos son realizados en un entorno exterior cubierto sin oclusión solar por parte de otros edificios en la localidad de Madrid y con cielos despejados.

Fig. 4. Planta de posición de prototipos y esquema de trayectoria solar.

Fig. 5. Irradiancia media horaria sobre los prototipos P1 y P2 (Julio, latitud 40° N).

Disposición de prototipos:



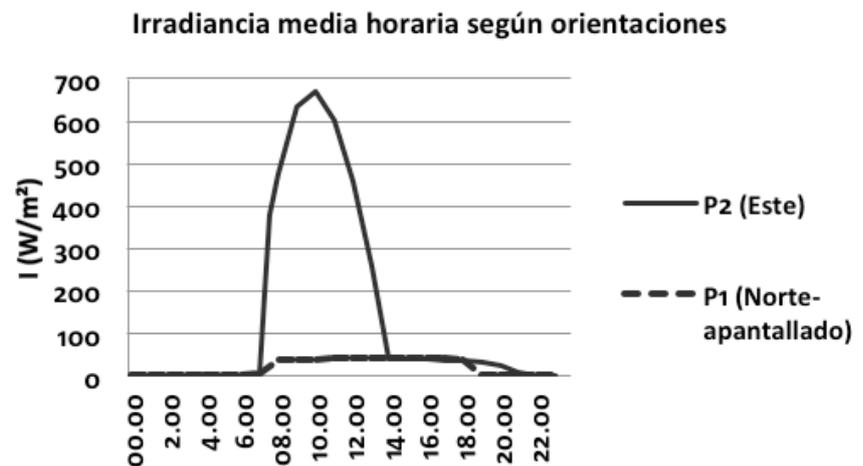
El área de ensayo comprende dos orientaciones según la planta de la figura 4. Una expuesta al sol con orientación Este y otra en sombra con orientación Norte, permitiendo separar el efecto de la radiación solar sobre los prototipos.

La zona de orientación Este recibe radiación solar directa. En ella se sitúan los prototipos 2 y 3.

La zona de orientación Norte dispone de un apantallamiento solar que suprime toda radiación directa. En ella se sitúa el prototipo 1.

Irradiancia solar:

Es la potencia de la radiación incidente por unidad de superficie ( $W/m^2$ )



La gráfica ha sido elaborada a partir de los datos de (NEILA 2004), se ajusta a la hora legal para facilitar la interpretación de los ensayos. El panel orientado al Norte recibe únicamente radiación difusa.

### 3.2 Métodos de medida

Se monitoriza la temperatura y humedad relativas ambientales así como en el interior de la cámara ventilada de los prototipos 1, 2 y 3. La frecuencia de medición son 30'.

La presión atmosférica es recopilada a partir de los datos publicados por AEMET.

Condiciones exteriores:

Temperatura y humedad relativa ambientales mediante estación termohigrométrica modelo: *TFA Klimalogg Pro 30.3039.IT*.

Prototipos:

Temperatura y humedad relativa en el interior de las cámara ventiladas de los prototipos 1,2 y 3 mediante sondas termo-higrométricas modelo: *TFA* para exteriores.

Rango y precisión de los equipos:

Rango de humedad: 1-99% precisión:  $\pm 1\%$ rH

Temperatura:  $-36'6$ - $+59'9$  °C precisión:  $\pm 0'1$  °C

### 3.3 Prototipos empleados en el experimento

Se construyen 3 prototipos; uno metálico y dos de mortero de cal. El objetivo es estudiar la influencia del material así como de la radiación solar de forma separada.

Prototipos de mortero de cal (P1 y P2):

Los prototipos *P1* y *P2*, son idénticos, variando únicamente su orientación:

P1: Orientado al Norte

P2: Orientado al Este

Los paneles cuentan con una serie de planos interiores que triangulan su estructura y dividen la cámara ventilada en canales verticales. Los 3 canales frontales permiten el paso del aire mientras que los 4 interiores están cegados en su base.

Dimensiones:

Altura: 0,35m, anchura: 0,474m, fondo: 0,115 m, dimensiones interiores de la cámara ventilada: 0,07m, espesor de la hoja exterior: 0,015m.

La cara posterior se aísla con EPS de 0,04m de espesor.

Los prototipos se elevan sobre el suelo para permitir la circulación del aire a través de la cámara ventilada.

Fig. 6. Vista frontal acotada de los prototipos 1 y 2 de mortero de cal.

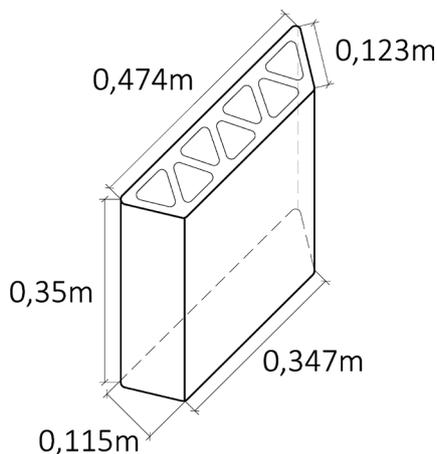


Fig. 7. Representación de la circulación del aire en los canales sobre fotografía del prototipo 1.



Mortero cal empleado: *Morcem estuco grueso* para interior y exterior armado con malla de fibra de vidrio.

Ficha técnica según fabricante:

Aspecto	Blanco
Resistencia al fuego	A1
Densidad del polvo	1,4±0,2 g/cm <sup>3</sup>
Densidad de la masa	1,7±0,2 g/cm <sup>3</sup>
Agua amasado	21±1%
Clasificación según UNE EN 998-1	CR CSII W2
Conductividad térmica según EN-998-1:2010:	0.76 W/m×K (Valor tabulado)

Propiedades físicas:

Material de la hoja exterior:	Mortero de cal
Masa:	24 (kg/m <sup>2</sup> )
Calor específico (C <sub>e</sub> ):	1.100 (J/Kg×K)
Difusividad térmica:	0,49 (m <sup>2</sup> /s)
Efusividad térmica:	1.237 (s <sup>1/2</sup> ×W/m <sup>2</sup> ×K)
Emisividad ξ:	0,91 (entre 10-90°C)
Albedo á:	0,9-0,93 (Radiación directa) 0,75-0,81 (Radiación indirecta)
Rugosidad (mm):	0,5

Prototipo metálico (P3). Orientación Este:

Sirve de referencia para su comparación con los prototipos 1 y 2 de mortero de cal. Está formado por una chapa de acero inoxidable pintada en color gris plomo. El objetivo de la pintura es aumentar la emisividad del metal para que la hoja exterior de referencia se asemeje a un *cuerpo gris*. El color de la pintura tiene una gran relevancia en el albedo, pero no así en la emisividad. A 20 ºC, Un panel de acero puede pasar de una emisividad de 0,55 (BLESÁ 1994) a 0,80 tras pintarlo de blanco, y a 0,95 si se trata de una pintura gris plomo acrílica (ALCHAPAR et al. 2012).

Fig. 8. Vista acotada del prototipo 3.

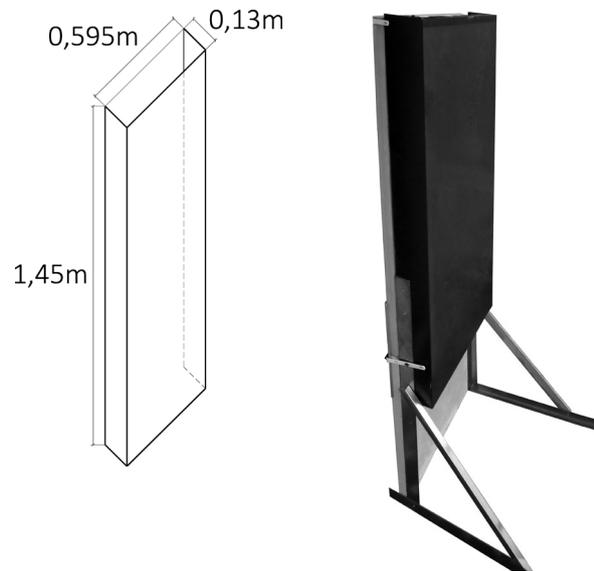
Fig. 9. Fotografía del prototipo 3.

### Dimensiones:

Altura: 1'45m, anchura: 0'595m, espesor 0,001m, dimensiones interiores de la cámara ventilada: 0'13.

La cara posterior queda cerrada y aislada con EPS de 0,04m de espesor.

El prototipo se eleva sobre el suelo mediante bastidores 0,6m. para permitir la circulación de aire a través de la cámara ventilada.



### Propiedades físicas

Material de la hoja exterior:	Acero inoxidable
Densidad aparente ( $\rho$ ):	7.900 (kg/m <sup>3</sup> )
Masa:	7,9 (kg/m <sup>2</sup> )
Calor específico ( $C_e$ ):	460 (J/Kg×K)
Conductividad térmica aparente ( $\lambda$ ):	17 (W/m×K)
Difusividad térmica:	4,68×10 <sup>-6</sup> (m <sup>2</sup> /s)
Efusividad térmica:	7.860 (s <sup>1/2</sup> ×W/m <sup>2</sup> ×K)
Emisividad $\xi$ :	0,550-0,610 (sin tratamiento)
Albedo $\hat{\alpha}$ :	0,32 (pintura gris plomo)
Rugosidad:	0,046 (mm)

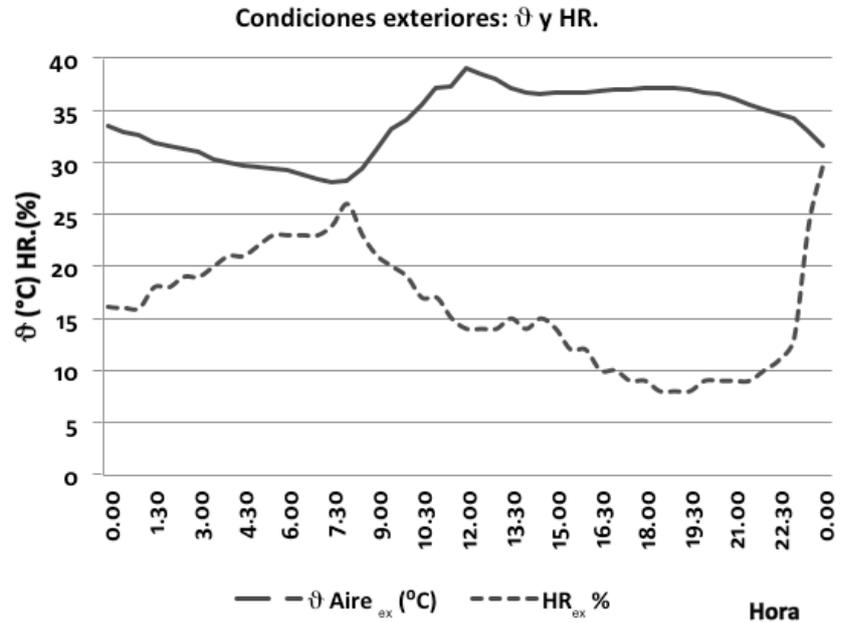
Fig. 10. Condiciones exteriores:  $T^{\circ}$  aire HR(%) (8/7/2015).

Fig. 11. Empuje por  $m^3$  de cámara de fachada ventilada con acabado en acero inoxidable color gris plomo orientado al Este.  $\alpha=0,32$ .

### 3.4 Desarrollo del experimento

Los prototipos fueron monitorizados durante 24h en el mes de julio.

Condiciones exteriores:



Los ensayos se realizaron en periodos de tiempo estables, con cielos despejados, baja humedad relativa y altas temperaturas. No se registraron brisas significativas.

Medias diarias: Temperatura: 34 ( $^{\circ}\text{C}$ ), HR: 16%, P: 940 hPa.

## 4. Resultados y discusión

### Prototipos

Prototipo P3, acabado metálico, (orientación Este):

Conocidas las temperaturas, humedades relativas y presión atmosférica se determinan las densidades del aire dentro y fuera de la cámara ventilada. Mediante el principio de flotabilidad obtenemos cómo varía fuerza de empuje en cada instante.

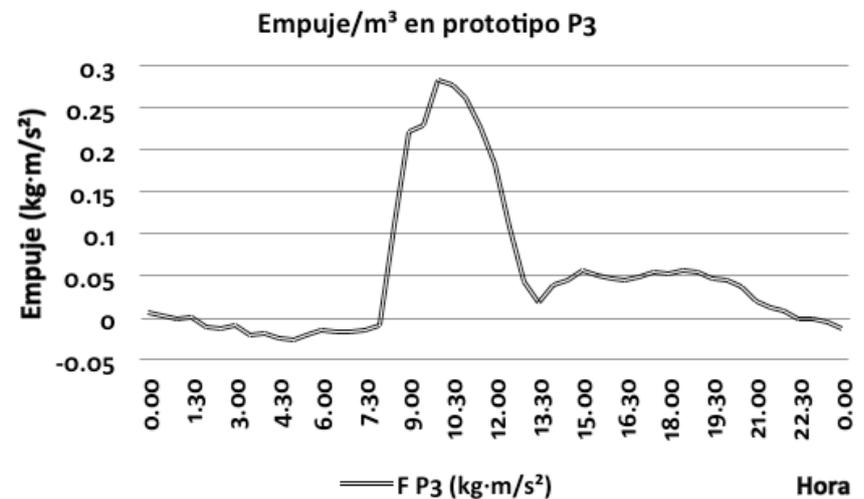


Fig. 12. Empuje por m<sup>3</sup> de cámara en prototipos de fachada ventilada de mortero de cal P1(Norte) y P2 (Este). 8/7/2015.

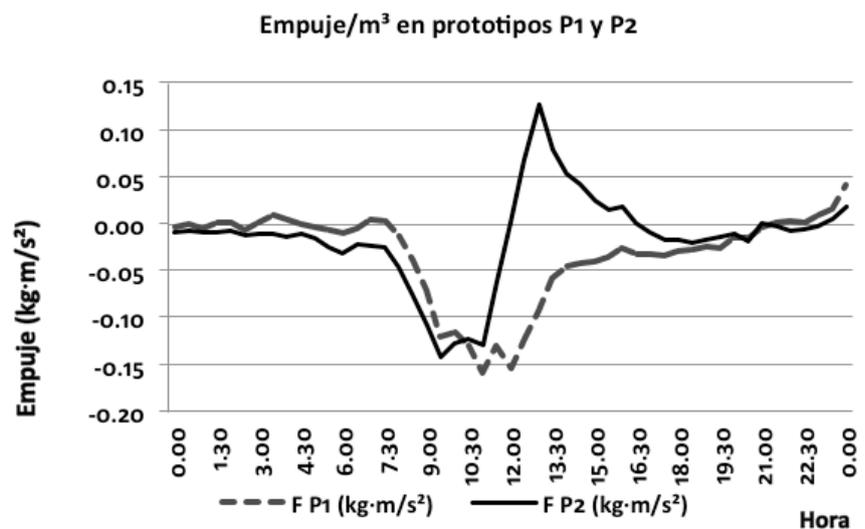
El empuje presenta valores predominantemente positivos, lo que implica una corriente de aire ascendente por el interior de la cámara. El sistema de fachada se comportaría endotérmicamente.

El movimiento del aire responde a la superposición de dos patrones: Oscilación diaria de las temperaturas, de carácter sinusoidal, con mínimos antes del amanecer.

Radiación solar directa. La orientación Este del ensayo permite diferenciarla del patrón anterior, al registrarse su máximo durante la mañana, cuando los rayos solares inciden perpendicularmente a la hoja exterior.

Nótese que el mínimo alcanza valores negativos durante la noche. Esto significa que el flujo de aire llega a invertirse, descendiendo en lugar de ascender por la cámara ventilada. Implica que el aire de la cámara ha de ser mas denso, y por lo tanto mas frío que el exterior. En un edificio puede suceder por un aislamiento insuficiente, pero en el prototipo ensayado se debe únicamente al enfriamiento radiante, es decir, la radiación de la hoja exterior hacia la bóveda celeste.

Prototipos P1 (orientación Norte) y P2 (orientación Este). Acabado en mortero de cal:



P1(Norte):

El empuje presenta valores predominantemente negativos, lo que implica una corriente de aire descendente por el interior de la cámara. El sistema de fachada se comportaría exotérmicamente. El mortero de cal se comporta como un material selectivo, radiando mayor cantidad de energía de la que absorbe. La gráfica no es simétrica respecto al cero, por lo que no puede atribuirse los resultados únicamente al efecto de la inercia térmica.

Los resultados obtenidos se ajustan a la hipótesis tanto en la metodología como en el comportamiento del prototipo.

P2 (Este):

Al monitorizar simultáneamente los dos prototipos con orientaciones

distintas se distingue como el empuje máximo aparece en el prototipo orientado al Este por efecto de la radiación solar.

El empuje presenta valores tanto negativos como positivos, lo que implica que la corriente de aire por el interior de la cámara varía a lo largo del día. El sistema de fachada alternaría flujos endotérmicos y exotérmicos.

El movimiento del aire es inferior al prototipo 3. El gran albedo del mortero de cal implica un menor calentamiento bajo la radiación solar. El empuje es próximo a cero durante la mayor parte del día con mínimos durante la mañana. Durante este periodo recibe la mayor cantidad de energía por la radiación solar. Sin embargo el mortero de cal se calienta mas lentamente que el aire exterior, dando lugar a una corriente descendente. Tras 4h de asoleo la tendencia se invierte y la hoja exterior del prototipo comienza a ceder energía hacia el interior, registrando un pico máximo muy breve debido a que para entonces la incidencia del sol es tangencial.

A partir de las 16:30 los valores del empuje toman valores entorno a cero. Al compararlo con el prototipo 3 situado en la misma posición, vemos como el mortero de cal refleja la energía solar difusa.

Los resultados obtenidos se ajustan a la hipótesis relacionando el movimiento de aire en la cámara con el flujo energético. Sin embargo el prototipo expuesto al sol no es capaz de neutralizar por completo el calentamiento por radiación solar directa y será necesario adoptar medidas adicionales.

## 5. Conclusiones

La metodología descrita puede aplicarse tanto en investigación como en rehabilitación, permite cuantificar los efectos de los materiales selectivos como acabados de fachada ventilada y es un método de diagnóstico alternativo para detectar defectos o insuficiencias en el aislamiento.

La combinación de las propiedades psicrométricas del aire unidas al principio de flotabilidad resulta un método sencillo, eficiente y de gran resolución para explicar el movimiento del aire en interior de fachadas ventiladas.

La dirección de la corriente convectiva y por lo tanto el flujo energético de una fachada ventilada depende, además del aislamiento y su distribución, de la hoja exterior en factores como el material, la masa y su emitancia. Respecto a su superficie, influye su albedo, geometría y rugosidad.

La intensidad de la corriente convectiva en el interior de la cámara ventilada influye en el flujo energético de las fachadas ventiladas y otros elementos constructivos. En cámaras bufas permitiría determinar la capacidad de desecación o el volumen de agua que abandona el muro en un determinado periodo de tiempo. Su estudio y comparativa entre distintos modelos resulta de utilidad para el diseño, a diversas escalas, de geometrías más eficientes.

El empleo de superficies selectivas frías y en concreto el mortero de cal, presenta buenas prestaciones térmicas como envolvente en climas cálidos. Su empleo como hoja exterior de una fachada ventilada ha demostrado un comportamiento térmico superior al de referencia para fachadas soleadas y presenta un comportamiento claramente exotérmico en ausencia de radiación solar directa.

## 6. Bibliografía

- ALCHAPAR N. L., CORREA E. N., CANTÓN M. A. “Índice de reflectancia solar de revestimientos verticales: potencial para la mitigación de la isla de calor urbana”. *Ambiente construido*, V.12 n3 p 107-123. ISSN 16788621. Porto Alegre. (2012)
- ASHRAE. “*Fundamentals Handbook*” SI Edition. ISBN: 1883413443. (1997).
- BARBERO M. M. “*Mejora del comportamiento térmico de los morteros de cal aditivados y su empleo en la rehabilitación de inmuebles*”. Tesis doctoral. UPM. Madrid. (2011)
- BARBERO M. M., CAMPOS-ACOSTA J., NEILA F. J. “*Reflectance properties analysis of mineral based mortars for renders: Research of their energy performance*”. *Energy and Buildings*, 76. Elsevier B. V. p.615-621. (2014).
- BLESA R. “*Conocimientos fundamentales sobre climatización*”. CEAC. p.76. Barcelona (1994).
- BERDAHL P., FROMBERG R. “*The thermal radiance of clear skies, Solar Energy*”, Vol 29-4. P. 299–314 (1982)
- CIAMPI M, LECCESE F, TUONI G, “*Ventilated façades energy performance in summer cooling of buildings*”. *Solar Energy* N. 75.. P 491–502. (2003).
- ESPULGAS S. CHAMARRO M. E. “*Fundamentos de transmisión de calor*” Publicacions i Edicions de la Universitat de Barcelona (2005).
- GAN G. “*A parametric study of Trombe walls for passive cooling of buildings*”. *Energy and Buildings*, V. 27, p. 37-43. (1998).
- GIANCOLA, E. “*El comportamiento energético de una fachada ventilada de juntas abiertas*”. (Tesis doctoral) Madrid. ETSAM., 219p (2010)
- IRULEGI O., SERRA A., HERNÁNDEZ R., RUÍZ-PARDO A., TORRES L. “*Fachadas ventiladas activas para reducir la demanda de calefacción en los edificios de oficinas. El caso de España*”. *Informes de la construcción*, V: 64, p. 575-585, ISSN: 00200883. (2012).
- MONTERO E. “*Manual básico Fachadas ventiladas y aplacados. Requisitos constructivos y estanqueidad*”. Consejería de Obras Públicas, Vivienda y Transporte de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. 13p. (2007).
- MORA M, LÓPEZ G, BENGOCHEA M. A, LÓPEZ P. A. “*Cuantificación de la eficiencia de la fachada cerámica ventilada mediante técnicas de la mecánica de fluidos computacional*” *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. Vol. 50. 104p. (2011).
- NEILA F. J. “*Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible*”. Munilla-Lería. Madrid. (2004).
- NORMA UNE-EN 998-1:2010 “*Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 1: Morteros para revoco y enlucido*”. (2010).
- RODRÍGUEZ B., DOMÍNGUEZ J., PÉREZ J. M., DEL COZ J. J. “*Review of international regulations governing the thermal insulation requirements of residential buildings and the harmonization of envelope energy loss*”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, p. 78-90. (2014).
- TAHA H., AKBARI H., ROSENFELD A., HUANG J. “*Residential cooling loads and the urban heat island - The effects of albedo*”. *Building and environment*, V.23 n°4, p. 271-283. (1988)
- WARTZECK S., HERRMANN E. M., KRAMMER M, STURM J., “*Enclose | Build: Walls, Facade, Roof*” Birkhauser Verlag AG. p. 176 ISBN: 9783034602075. Basilea. (2010)

