

Determinación de la permeabilidad del bloque de Termoarcilla de 24 cm

Determining the permeability of the 24-cm Termoarcilla block

Antecedentes

El comportamiento frente a la humedad que presentan los materiales de construcción tiene un impacto directo en los edificios. La humedad afecta a la energética del edificio, la salubridad de sus espacios y la durabilidad e integridad de sus cerramientos. La consecución de unas adecuadas condiciones de confort en los espacios interiores definidos y delimitados por los cerramientos de los edificios, requiere del establecimiento de un adecuado equilibrio higroscópico en dichos espacios. En dicho equilibrio higroscópico, el comportamiento y las prestaciones higroscópicas de los materiales empleados en los cerramientos juegan un papel fundamental.

Si bien para la mayoría de los materiales de construcción es habitual conocer sus propiedades térmicas, tradicionalmente la caracterización de sus propiedades higroscópicas y su comportamiento frente a la humedad ha sido menos investigada. Esto, entre otros aspectos, se debe a la diferencia entre el desarrollo de la teoría matemática que formula el flujo de calor frente al menor desarrollo de la formulación matemática de la teoría que explica el flujo de humedad en medios porosos, la mayor discrepancia en la selección de los potenciales que actúan como fuerzas motrices para dicho flujo, a la naturaleza bifásica de dicho flujo de humedad a través de los materiales, y a la dificultad de establecer métodos y técnicas de ensayo que permitan cuantificar los coeficientes de transporte difusivo y capilar de la humedad a través de la estructura porosa de los materiales de construcción.

Por todo ello, los valores que en muchas ocasiones se emplean para uno de los coeficientes de transporte relacionados con el flujo difusivo de vapor, el coeficiente de resistencia al flujo de vapor por difusión, μ , suele ser para una gran mayoría de materiales y fábricas igual a 10.

En este valor, se engloban por ejemplo en el CTE, una gran cantidad de fábricas de ladrillo. Este es el caso de los bloques de Termoarcilla.

En este trabajo, se determina el coeficiente de resistencia al flujo de vapor por difusión de los bloques de Termoarcilla de 24 cm. Este documento es parte de una investigación financiada por el Gobierno Vasco y el Consorcio de Termoarcilla, y se ha desarrollado con los medios materiales del Laboratorio de Control de la Calidad del Gobierno Vasco.

Introducción y objetivos

La permeabilidad al vapor de un material se obtiene experimentalmente mediante el ensayo de difusión. Los ensayos en copa para evaluar la permeabilidad al vapor de un material, en numerosas ocasiones arrojan valores no representativos del producto de construcción que finalmente se incorporará a los cerramientos de las edificaciones. Sólo las propiedades obtenidas para el material serían representativas si el producto de construcción fuese homogéneo, isótropo y no incorporase otros elementos para su acabado.

Dado que en la actualidad no existen métodos de ensayo normalizados, el interés de contar con un procedimiento para el cálculo de esta propiedad de los productos a partir de la permeabilidad de sus componentes, constituye una base importante para el diseño adecuado de cerramientos que empleen bloques de Termoarcilla, desde el punto de vista higrotérmico. En el caso de la permeabilidad al vapor equivalente de un bloque, es muy compleja la medida experimental del flujo de vapor dentro de los márgenes de fiabilidad requeridos, por lo que un primer paso para su obtención es el cálculo a través de la simulación.

Es muy habitual que la composición de los elementos constructivos de las edificaciones, -sobre todo en el ámbito geográfico y climático que abarca este estudio-, estén compuestos en alguna de sus hojas por fábrica que incorpora material de albañilería, ya sea de base cerámica u hormigón, que se engarzan y adquieren solidez por medio del pegado con morteros o pastas de albañilería.

A efectos prácticos, se hace necesario conocer las propiedades medias o equivalentes del sistema constructivo en el que se incorporan estos bloques. La geometría resultante en la configuración de los huecos y matriz de material para constituir un bloque o ladrillo, es tan variada como las aplicaciones a las que se destinan y las preferencias o tradición local de los fabricantes.

En contraste con estas reflexiones sobre las múltiples variables que afectan a las propiedades resultantes de una fábrica de bloque cerámico frente a las sollicitaciones higrotérmicas, la normativa simplifica de forma contundente las propiedades aplicables a la transferencia de vapor de agua.

Así, analizando los valores correspondientes al factor de resistencia a la difusión del vapor de agua (μ) para soluciones de albañilería, podemos observar que prácticamente no existen diferencias apreciables entre distintos montajes, y se dan valores



Los artículos técnicos son facilitados por Hispalyt (asociación española de fabricantes de ladrillos y tejas de arcilla cocida) y forman parte de los programas de investigación que desarrolla sobre los distintos materiales cerámicos y su aplicación.

muy generalistas. Esto queda lejos de la realidad para materiales ensayados en laboratorio por medio de copa seca y copa húmeda según la norma UNE-EN ISO 12572:2001.

En la norma UNE-EN 1745 de 2002, referente a la determinación de los valores térmicos de proyecto para la fábrica de albañilería y componentes para fábrica, se proporcionan valores tabulados de conductividad térmica equivalente para bloques de diferente geometría y distribución de los huecos en función de la conductividad térmica de los materiales de los elementos de la fábrica. Estos valores se han obtenido por medio de la simulación informática del proceso físico por el método de los elementos finitos. También indica esta norma de forma muy genérica, los valores para el coeficiente de difusión de vapor de agua - μ - para piezas cerámicas de arcilla cocida, que varían entre 5 y 10, valores de 5 a 25 para piezas silico-calcáreas, entre 5 y 15 para prefabricados de hormigón y 5/20 a 5/35 para diferentes tipos de morteros en función de la densidad.

Esta falta de precisión o indefinición en los valores de las propiedades de transferencia de humedad, genera inseguridad en los cálculos o en las verificaciones del cumplimiento de la normativa referente a condensaciones superficiales e intersticiales.

La carencia de métodos estandarizados para la medida de la difusión del vapor a través de sistemas compuestos de elevado espesor, hace que la utilización de métodos de cálculo alternativos o de simulación numérica, sea una posibilidad atractiva para proporcionar datos de referencia que mejoren la aproximación de los resultados.

Una vez caracterizadas las propiedades higroscópicas y la estructura porosa de la arcilla que compone los bloques de arcilla aligerada de 24 cm, se procedió a la simulación numérica de la transferencia de vapor a través del bloque conformado por huecos de aire y la matriz de material sólido.

La finalidad de esta simulación es la obtención de las propiedades de transmisión de vapor para la geometría conjunta del bloque, y poder proporcionar un valor para la permeabilidad equivalente y el factor de resistencia a la difusión del vapor equivalente de la geometría del bloque de 24 cm así como de la fábrica de dicho bloque de termoarcilla.

Para el material que conforma la matriz del bloque se han empleado los valores del factor de resistencia a la difusión de vapor obtenidos en el ensayo de difusión de vapor, para las humedades relativas de 27 %, 64 % y 80 %. La permeabilidad del aire en los huecos del bloque se ha tomado $\mu_{\text{aire}} = 1.95 \cdot 10^{-10}$ kg/smPa.

Analizando el funcionamiento higrotérmico de los componentes del edificio, nos encontramos que durante la vida "normal" de los mismos, la transferencia de humedad a través de los cerramientos verticales se produce fundamentalmente por transporte de vapor de agua a través de los materiales porosos que conforman el bloque debido a un gradiente de presión de vapor. Este transporte de vapor se caracteriza adecuadamente por el modelo de difusión, aplicando la ley de difusión de Fick modificada.

El valor de la permeabilidad varía con el contenido de humedad, por lo que teniendo en cuenta esta variación, se podrá caracterizar más rigurosamente el comportamiento higrotérmico de los materiales.

GEOMETRÍA DEL BLOQUE

Para la obtención de la geometría de ensayo, se han utilizado los planos del modelo de molde tipo base 24 de dos salidas, figura 1.

A las dimensiones iniciales de salida del molde, se le han aplicado una contracción lineal en dos dimensiones del 3%.

Se realizó la simulación con el procedimiento de los elementos finitos, con un análisis en el régimen estacionario en dos dimensiones (2D) sometiendo a cada una de las caras del bloque a una diferencia de humedad relativa correspondiente al salto de 1 Pa en el valor de la presión de vapor.

El estudio morfológico de la transferencia de vapor, se realizó para dos supuestos:

Primero: para el caso de bloque de una pieza aislada siguiendo la similitud con la normativa de transferencia térmica equivalente UNE-EN 6946

Segundo: para el caso de 2 semibloques con ajuste a tope, tomando como sistema central la propia junta y definiendo simetría axial para los semibloques empleados.

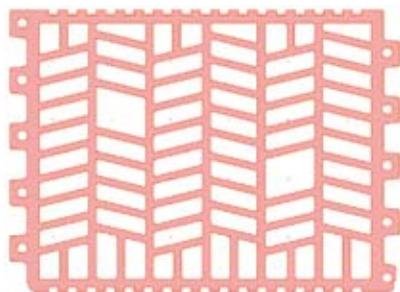


Figura 1. . Matriz sólida para simulación de bloque aislado

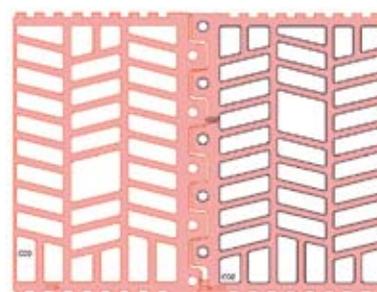


Figura 2. Matriz sólida para simulación con semibloques y simetría

* El término "normal", lo aplicamos a contenidos de humedad de los materiales en el rango higroscópico, y este contenido, solamente es sobrepasado cuando se produce un humedecimiento súbito de los mismos por alteración de las condiciones de diseño.

SISTEMA DE CÁLCULO NUMÉRICO

Se empleó el modelo de resolución para ecuaciones de difusión, transformada para aplicar la Ley de Fick al transporte de vapor de agua a través de materiales porosos.

El algoritmo empleado en la resolución de los sistemas lineales corresponde al método Directo (UMFPAC), que presenta para este problema el adecuado equilibrio entre precisión del resultado y los recursos de cálculo empleados.

El modelo de resolución elegido es no lineal, con ajustes de no linealidad de 30 iteraciones máximas y tolerancia relativa de 1E-6. Para los parámetros de amortiguamiento el programa trabaja con valor de 10 para la restricción de la actualización del tamaño de paso, con un factor de amortiguamiento mínimo de 1E-4 y factor de amortiguamiento inicial de 1.0.

El método empleado para manipulación de las restricciones es la eliminación, alternando con multiplicadores de Lagrange. En la resolución matricial, se empleó el método automático proporcionado por el programa de cálculo por elementos finitos Comsol®, con un tamaño de ensamblaje del bloque de 5000.

El control de convergencia se realizó manualmente tras la intervención en la reducción de error. Esto se puede visualizar de forma gráfica durante el periodo de resolución.

MALLADO

Por el tipo de geometría del bloque, se eligió una estructura de malla de elementos triangulares, y como en la sección del bloque se presentan encuentros entre las nervaduras de radio variable, interesa dar a la estructura de mallado un refinamiento adaptativo de malla, atendiendo especialmente a las superficies frontera entre materiales y fluido. En las figuras 5 y 6 se presenta el mallado así generado.

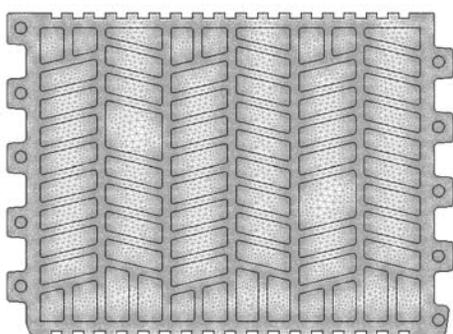


Figura 3. - Mallado adaptativo a la geometría con 94.719 elementos triangulares. Bloque aislado

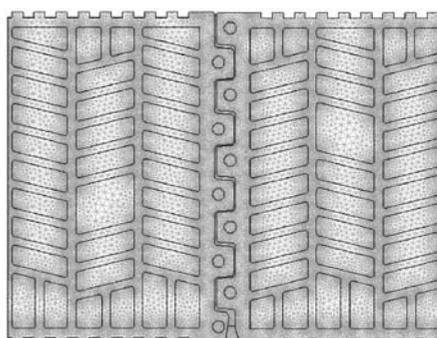


Figura 4. Distribución de malla adaptativa resultante de 99.247 elementos triangulares. Junta con simetría de bloque

Resumen datos de la simulación

Datos geométricos del Bloque

Bloque de termoarcilla estructura de matriz con 3% de retracción

Sección transversal = 0.034612 m²

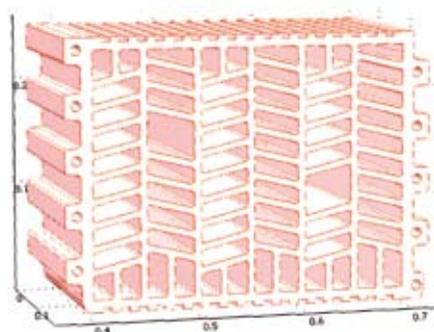
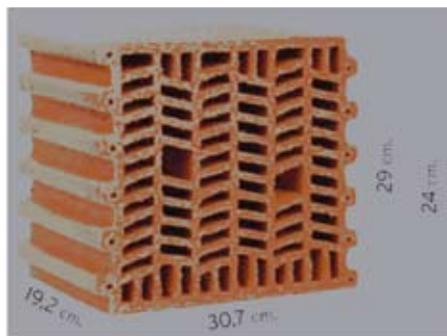
Perímetro = 8.953151 m

Altura del bloque = 0.192 m

Longitud (anchura bloque) = 0.328 m

Área expuesta aire = 8.953151 * 0.192 = 1.719 m²

Peso seco = 0.034612 * 0.192 * 1767 = 11.63 kg



Datos geométricos de la matriz

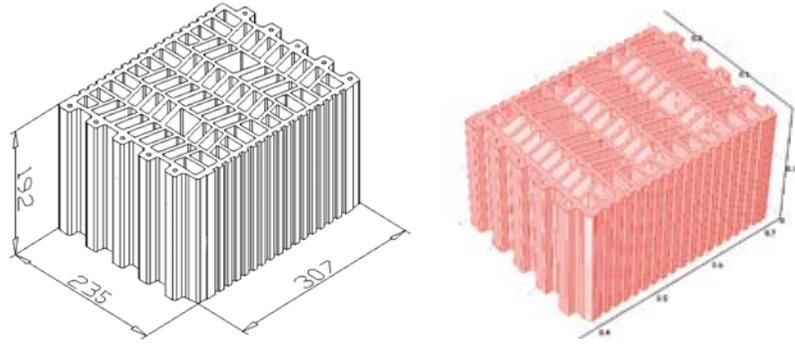
Área material: 0.036786 m²

Perímetro: 9.230054 m

Área huecos de aire: 0.042911 m²

Perímetro: 7.607962 m

Densidad del material: 2645 kg/m³



Cálculos:

Ecuación de cálculo de flujo por difusión, en régimen permanente y condiciones de contorno estáticas:

$$\nabla(-\delta \nabla(Pv)) = 0$$

Condiciones de frontera:

x = 0; x = L g = 0 (condición de aislamiento)
 y = 0; y = H $\Delta Pv = 1 \text{ Pa}$

donde **g** = **-δ (grad Pv)**

Materiales: $\delta_{\text{aire}} = 1.95e-10 \text{ kg/smPa}$; $\mu_{\text{aire}} = 1$

$\mu_{\text{cerámica}} (27 \%) = 57.0$
 $\mu_{\text{cerámica}} (64 \%) = 45.4$
 $\mu_{\text{cerámica}} (80 \%) = 59.3$

siendo Pv (Pa)
 g (kg/m²s)
 δ (kg/smPa)

SIMULACION PARA BLOQUE AISLADO

En la figura 12 se observa las diferentes condiciones de contorno fijadas para la simulación numérica:

- Rojo:** Presión de vapor Pv = 0
- Celeste:** Presión de vapor Pv = 1
- Negro:** Aislamiento
- Azul:** Contornos interiores. Continuidad

Tras fijar la geometría del bloque, las propiedades de transferencia de vapor de la matriz sólida y de los huecos de aire, y las condiciones de contorno específicas para el bloque, se procede a la simulación.

Los parámetros del solver están ajustados a la estructura de malla elegida y se fijaron las condiciones de convergencia, proporcionando el programa la solución y los resultados en régimen permanente.

En el post-procesado de la solución, se representan los valores y los perfiles de distribución de los diferentes parámetros en el bloque.

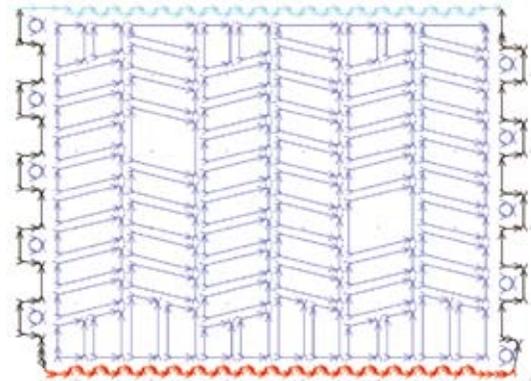


Figura 12. Superficies con condiciones de contorno definidas

RESULTADOS de la simulación del bloque aislado

POSTPROCESADO

En los siguientes gráficos (fig. 5) se presenta la solución para la distribución de los perfiles de presión de vapor y del flujo de humedad para la geometría de bloque aislado de 24 cm.

A continuación, se detallan los perfiles de distribución de presión de vapor en diferentes secciones del bloque (fig. 6 y 7).

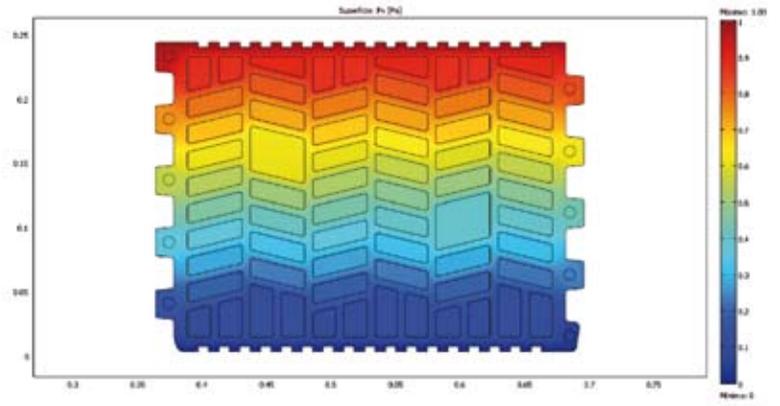


Figura 5.- Gráfico de superficie representando la presión de vapor para el bloque aislado. $\Delta P_v = 1Pa$

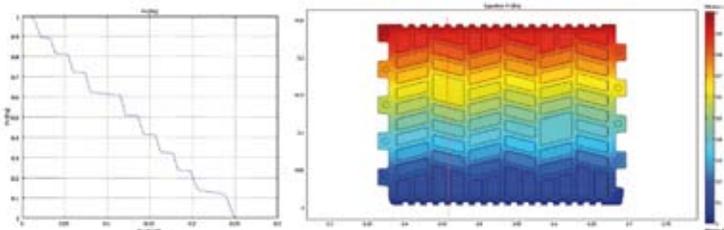


Figura 6.- Detalle gráfico del perfil de presiones de vapor . Transversal a huecos 2ª fila (Pa)

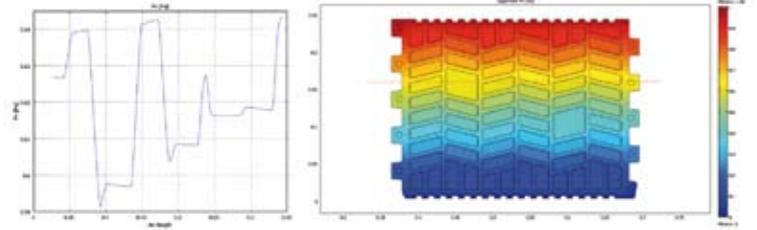


Figura 7 Detalle gráfico del perfil de presiones de vapor. Sección longitudinal (Pa)

En los siguientes gráficos se presenta la solución para la distribución de la densidad de flujo de humedad en el bloque para la geometría de bloque aislado de 24 cm.

A continuación, se detallan los perfiles de densidad de flujo de humedad en diferentes secciones del bloque.

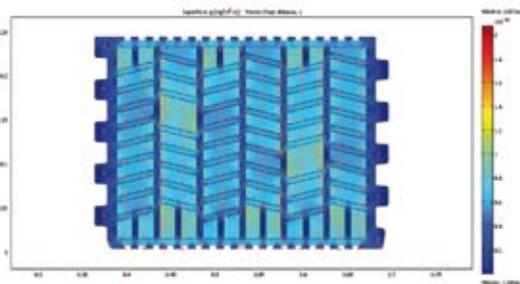


Figura 8. Gráfico de superficie representando el flujo de humedad para el bloque aislado. Presentación $\Delta P_v = 1Pa$. (kg/sm²). Detalles de vector direccional.

Figura 9.- Detalle de flujo de humedad en la sección marcada. Presentación para $\Delta P_v = 1Pa$. (kg/sm²).

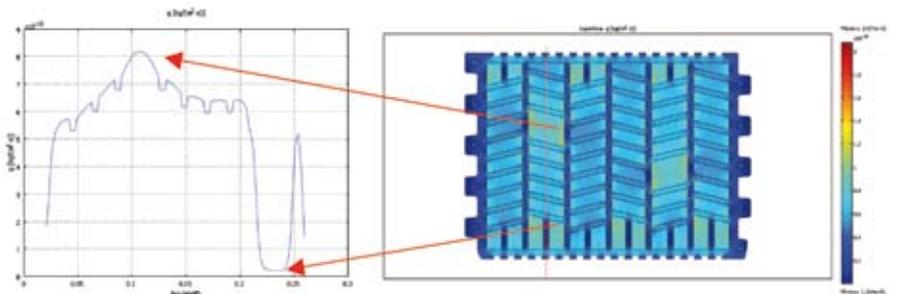


Figura 10.- Detalle de flujo de humedad en nervio central. Presentación para $\Delta P_v = 1Pa$. (kg/sm²).

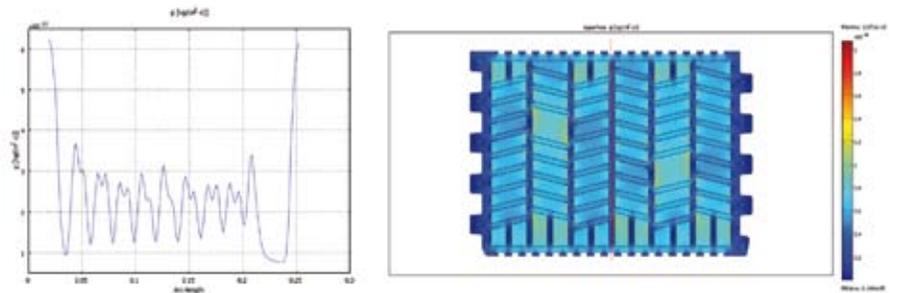
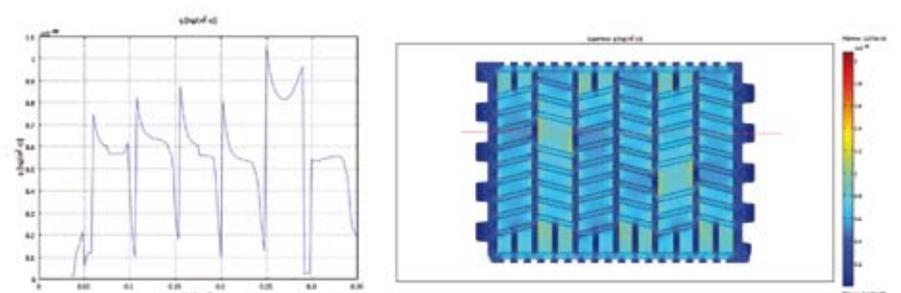


Figura 11.- Detalle de flujo humedad en la sección marcada. Presentación para $\Delta P_v = 1Pa$. (kg/sm²).



Permeabilidad equivalente del bloque aislado

La permeabilidad equivalente δ_{eq} del bloque de Termoarcilla de 24 cm, es el valor de permeabilidad que presentaría un bloque **homogéneo** del mismo espesor y dimensiones, que ofreciera la misma resistencia al flujo de vapor que el bloque de termoarcilla estudiado.

De la misma forma, podemos definir el valor del factor de resistencia a la difusión del vapor equivalente para el bloque cerámico, μ_{eq} como el factor resultante para un bloque hipotético de la misma geometría de material **homogéneo** con permeabilidad uniforme en toda su estructura.

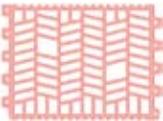
Con objeto de calcular el valor de la permeabilidad equivalente del bloque, mediante el postprocesado de la solución numérica de la simulación, se procede a la medición del flujo medio superficial sobre una de las caras del bloque ("Bloque con huecos de aire" en la tabla ...) y se compara con el flujo medio que resultaría sobre la misma geometría compuesta exclusivamente por aire ("Bloque Aire").

Como ejemplo ilustrativo del proceso de cálculo y obtención de la permeabilidad equivalente del bloque aislado, se ha resuelto a continuación el caso para una μ correspondiente al 64 % de humedad relativa.

Tabla 1. Permeabilidad de los materiales

| Permeabilidad | [kg/(s·m·Pa)] | [m·g/MNs] |
|---------------------|-----------------------|----------------------|
| $\delta_{material}$ | $4.34 \cdot 10^{-12}$ | $4,34 \cdot 10^{-3}$ |
| δ_{air} | $1.95 \cdot 10^{-10}$ | $1.95 \cdot 10^{-1}$ |

Tabla 2. Resultados para bloque aislado

|  | Bloque con huecos de aire | | Bloque Aire | |
|--|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | Integral de flujo Pv = 0Pa | Integral de flujo Pv = 1Pa | Integral de flujo Pv = 0Pa | Integral de flujo Pv = 1Pa |
| | [kg/(ms)] | [kg/(ms)] | [kg/(m*s)] | [kg/(ms)] |
| | 1.600475e-11 | 1.600675e-11 | 2.326625e-10 | 2.331956e-10 |
| | Media: 1.601e-11 | | Media: 2.329e-10 | |
| | $\mu_{eq} = 14.55$ | kg/(s·m·Pa) | m·g/MNs | |
| | $\delta_{eq} =$ | $1.340 \cdot 10^{-11}$ | $1.340 \cdot 10^{-2}$ | |

SIMULACION PARA BLOQUE CON JUNTA VERTICAL

Para tener en cuenta el cálculo sobre fábrica de bloque de Termoarcilla, se realizó también la simulación del dos mitades de bloque unidas por encaje del machihembrado según se coloca en obra. A continuación se muestran los resultados de dicha simulación.



Figura 12. Representación espacial del modelo utilizado para simulación de fábrica de bloque de Termoarcilla

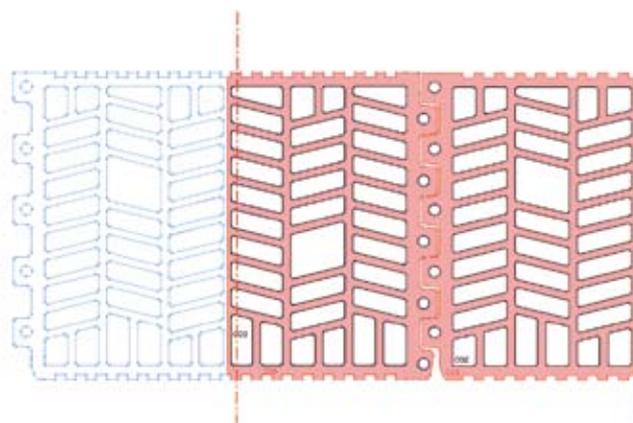


Figura 13. Simetría axial en la junta. Detalle de planos de simetría

RESULTADOS de la simulación del bloque con junta vertical

POSTPROCESADO

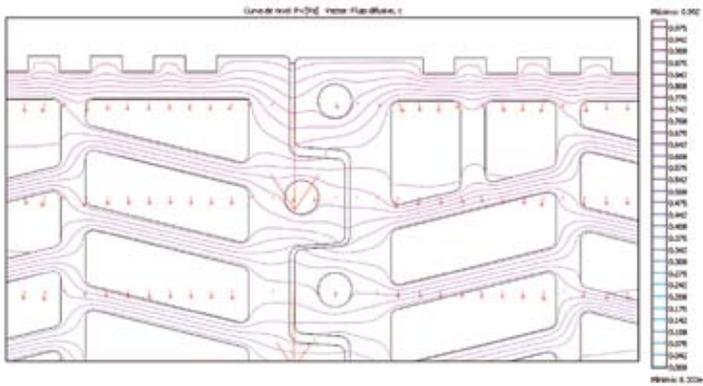


Figura 14. Detalle de líneas isóbaras de presión de vapor y vector direccional de flujo de humedad.

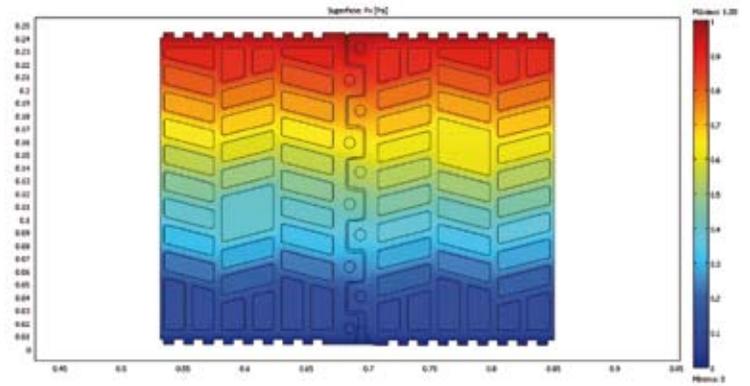


Figura 15.- Gráfico de superficie representando la presión de vapor para junta de bloque. Presentación $\Delta P_v = 1 Pa$

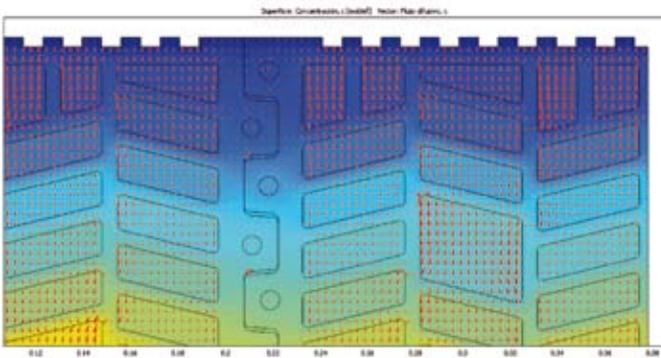
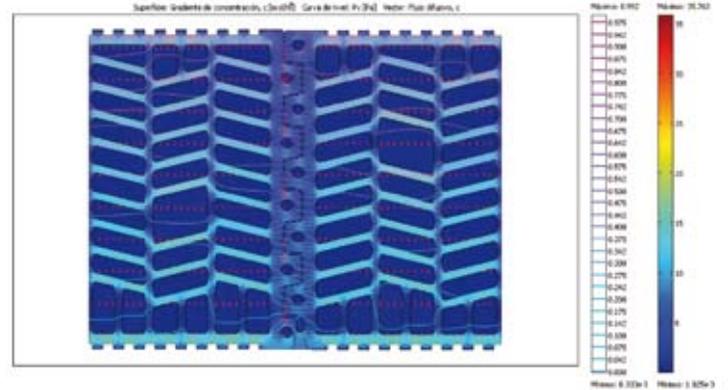


Figura 16. Detalle de flujo difusivo direccional. Bloque de 24. Color: Campo de presión de vapor (Pa).



Permeabilidad equivalente del bloque para geometría de semibloques

A efectos comparativos con el caso calculado previamente de bloque aislado, se presenta continuación el cálculo de la μ equivalente de disposición en semibloques para μ del material de la matriz correspondiente a 64 % de humedad relativa.

Se puede apreciar que la diferencia en el valor resultante de $\mu_{equivalente}$ entre ambas disposiciones es muy pequeña, y prácticamente irrelevante (14,55 frente a 14,79).

Tabla 3. Permeabilidad de los materiales

| Permeabilidad | [kg/(s·m·Pa)] | [m·g/MNs] |
|---------------|-----------------------|----------------------|
| material | $4.34 \cdot 10^{-12}$ | $4.34 \cdot 10^{-3}$ |
| air | $1.95 \cdot 10^{-10}$ | $1.95 \cdot 10^{-1}$ |

Tabla 4. Resultados para geometría de semibloques

|  | Bloque con huecos de aire | | Bloque Aire compacto | |
|---|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | Integral de flujo Pv = 0Pa | Integral de flujo Pv = 1Pa | Integral de flujo Pv = 0Pa | Integral de flujo Pv = 1Pa |
| | [kg/(ms)] | [kg/(ms)] | [kg/(ms)] | [kg/(ms)] |
| | 1.765409e-11 | 1.707811e-11 | 2.486716e-10 | 2.423604e-10 |
| | Media: 1.737e-11 | | Media: 2.455e-10 | |
| | $\mu_{eq} = 14.79$ | kg/(s·m·Pa) | m·g/MNs | |
| $\delta_{eq} =$ | $1.380 \cdot 10^{-11}$ | $1.380 \cdot 10^{-2}$ | | |

Simulación para bloque con junta horizontal (montaje vertical)

En este epígrafe se presentan los resultados de la simulación de la transferencia de humedad siguiendo el paralelismo con la normativa específica de AENOR: **REGLAMENTO PARTICULAR DE LA MARCA AENOR PARA PIEZAS DE ARCILLA COCIDA PARA FÁBRICAS A REVESTIR, RP-34.14**, desarrollada para el análisis de la transferencia de calor.

Por aproximación y para facilitar la interpretación de los resultados respecto a una referencia de cálculo ya usada y conocida en este tipo de fábrica de Termoarcilla, se ha adaptado el método propuesto en este reglamento para proporcionar el valor de la resistencia equivalente de un muro de fábrica de arcilla aligerada de 24 cm, teniendo en cuenta el comportamiento del modelo de flujo paralelo que se produce en las discontinuidades provocadas por diferentes tipos de montajes de la fábrica de bloques.

Este reglamento propone un método simple de análisis sobre las propiedades equivalentes de la fábrica sin revestir formada por bloques de arcilla aligerada y junta horizontal de pegado.

Sin embargo, el fenómeno de transporte de calor y de vapor a través del bloque de arcilla no es exactamente igual en cuanto a naturaleza de las fuerzas motrices, a las leyes que lo rigen y a la naturaleza del fenómeno físico de transporte y almacenamiento; por ello, esta paralelismo en el cálculo de la permeabilidad del bloque es una aproximación y como tal debe considerarse; para obtener valores realmente más precisos sería necesario realizar una simulación 3D.

El objetivo de emplear el citado procedimiento en este informe, no es otro que el de facilitar, como se ha dicho, la interpretación de los resultados y sentar unas bases respecto a las que poder comparar futuras mediciones y cálculos de dicha resistencia a la difusión de vapor.

Se utiliza el método de los elementos finitos aplicado a la geometría 2D resultante del corte por planos horizontales en el área de la junta vertical entre dos semibloques. Se resuelven los flujos de vapor en cada una de las composiciones resultantes de bloque con huecos de aire, bloque con penetración de mortero y la estructura de junta tendel efectiva en cada caso. Con estos resultados, se calcula el valor de la resistencia a la difusión del vapor equivalente (Z) para cada sección analizada (el espesor de esta sección equivalente es constante e igual a la del bloque, 24 cm). Por claridad en la evaluación, se presentan los resultados parciales en valores de factor de resistencia a la difusión equivalente de cada plano (μ).

Con los valores obtenidos se ha ponderado el efecto del tendel y la resistencia equivalente del muro conformado, en función del espesor (h) asignado a cada tipo de sección y una composición de resistencias en paralelo. El esquema y la expresión de cálculo resultante son los siguientes:

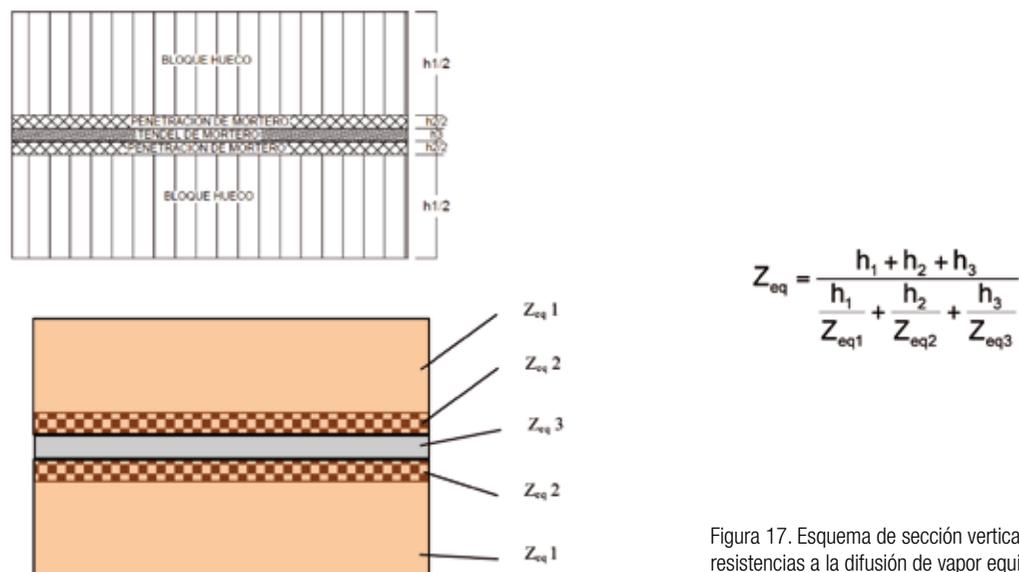


Figura 17. Esquema de sección vertical del muro y sus resistencias a la difusión de vapor equivalentes

Casos calculados

Se han calculado los siguientes montajes descritos en el anexo E del RP-34.14, en función de las tipologías de junta tendel posibles:

Ejecución de muro con junta de mortero de agarre continua. Altura 10 mm (caso E.4.1. del RP-34.14)

Ejecución de muro con junta de mortero de agarre interrumpida de 30 mm de espesor. Altura 10 mm. (caso E.4.2.)

Ejecución de muro con junta de mortero de agarre interrumpida por banda de material aislante de 30 mm de espesor. Altura 10 mm (caso E.4.3.)

Ejecución de muro con pieza rectificadora y junta continua delgada de 3 mm de altura. Sin penetración (caso E.4.4.)

Se supone una penetración (h_2) del mortero en la junta de 10mm (en el caso de haberla).

Todas las simulaciones se realizan sobre bloque de 192 mm de altura.

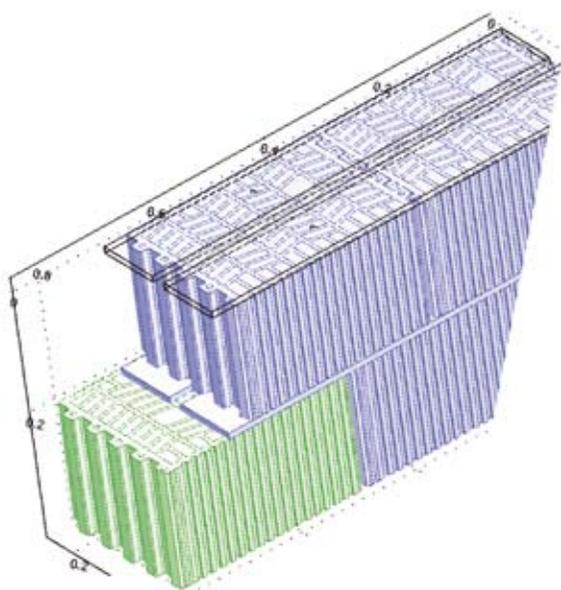


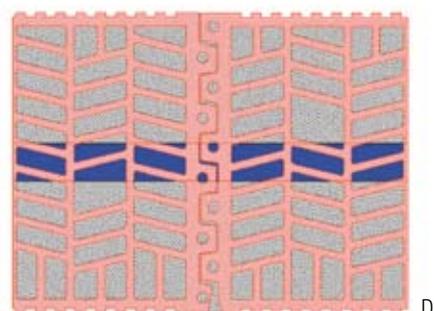
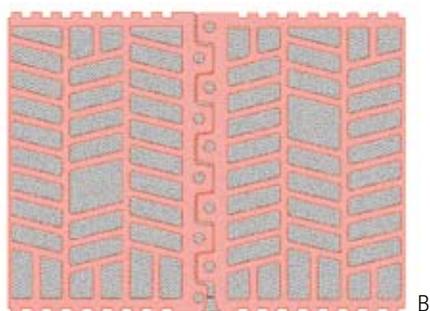
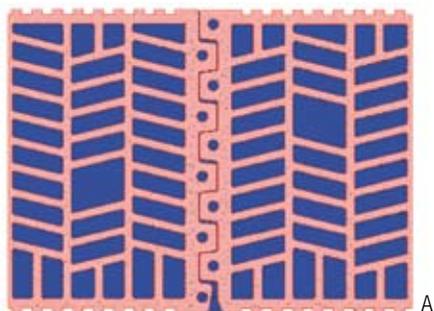
Figura 18. Representación espacial del modelo de junta analizado. Tipología de tendel con junta de agarre interrumpida (caso E.4.2).

Además del aire y de la arcilla, para los materiales de tendel, sea cemento o aislante, las propiedades empleadas en el cálculo están tomadas de las bases de datos reconocidas, excepto la permeabilidad del material de los bloques de Termoarcilla, que ha sido lógicamente la obtenida mediante esta investigación (ver Parte 1, ensayo HE4 de este informe).

Tabla 5. Permeabilidad de los materiales.

| Permeabilidad | [kg/(s·m·Pa)] |
|-------------------------------------|-----------------------|
| $\delta_{\text{material cerámica}}$ | $4.34 \cdot 10^{-12}$ |
| δ_{air} | $1.95 \cdot 10^{-10}$ |
| δ_{mortero} | $1.30 \cdot 10^{-11}$ |
| $\delta_{\text{aislante PU}}$ | $3.90 \cdot 10^{-12}$ |

Los valores de las diferentes resistencias en función de la disposición de montaje seleccionada (anexo E del RP-34.14) son combinaciones de las siguientes resistencias equivalentes (se designa cada tipo de resistencia con una letra de la A a la F):



TIPO A. Material cerámico con huecos rellenos de aire

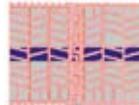
TIPO B. Material cerámico con huecos rellenos de mortero

TIPO D. Material cerámico con aire en la banda y mortero en el resto

TIPO E y F. Tendel discontinuo con huecos rellenos de aire (E) o aislante (F)

Se ha remallado la geometría para dar lugar a la simulación de todos los tipos de junta propuestos y calcular para cada una las Z_{eq2} y Z_{eq3} . En el caso de penetración de mortero con junta discontinua o interrumpida, el procedimiento caracteriza los huecos parcialmente, como se indica en la solución D, con propiedades del aire donde coincide la banda de interrupción.

Tabla 6. Permeabilidad equivalente para diferentes juntas en función de la humedad relativa media.

| | | Humedad relativa media | | |
|--|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | | 80% | 64% | 27% |
| δ_{material} cerámica [kg/(s·m·Pa)] | | 2.984·10 ⁻¹² | 4.343 ·10 ⁻¹² | 3.293·10 ⁻¹² |
| δ_{air} [kg/(s·m·Pa)] | | 1.95 · 10 ⁻¹⁰ | | |
| δ_{mortero} [kg/(s·m·Pa)] | | 1.30 · 10 ⁻¹¹ | | |
| δ_{aislante} PU [kg/(s·m·Pa)] | | 3.90 · 10 ⁻¹² | | |
| Tipo A  | μ_{eq} | 19.03 | 14.79 | 18,33 |
| | δ_{eq} [kg/(s·m·Pa)] | 1.027·10 ⁻¹¹ | 1.321·10 ⁻¹¹ | 1.066·10 ⁻¹¹ |
| Tipo B  | μ_{eq} | 30,70 | 26.41 | 30.00 |
| | δ_{eq} [kg/(s·m·Pa)] | 6.364·10 ⁻¹² | 7.458·10 ⁻¹² | 6.5129·10 ⁻¹² |
| Tipo C  | μ_{eq} | 15.00 | | |
| | δ_{eq} [kg/(s·m·Pa)] | 1.300·10 ⁻¹¹ | | |
| Tipo D  | μ_{eq} | 26.86 | 24.88 | 26.08 |
| | δ_{eq} [kg/(s·m·Pa)] | 7.260·10 ⁻¹² | 7.838·10 ⁻¹² | 7.476·10 ⁻¹² |
| Tipo E  | μ_{eq} | 13.33 | | |
| | δ_{eq} [kg/(s·m·Pa)] | 1.463·10 ⁻¹¹ | | |
| Tipo F  | μ_{eq} | 19.66 | | |
| | δ_{eq} [kg/(s·m·Pa)] | 3.833·10 ⁻⁹ | | |

Una vez calculadas todas las posibles resistencias, se pondera en función de su altura en la fábrica de bloque de Termoarcilla

Ponderación :
 Penetración Junta 2 → 1 + 1cm cm
 Bloque: 1 → 19.2-2=17.2 cm
 Junta 3 → 1 cm

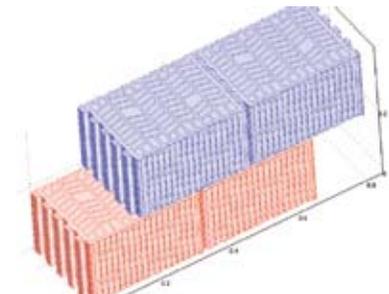
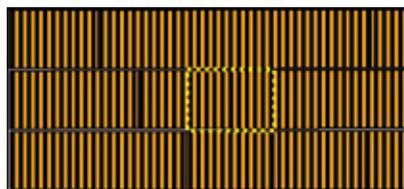


Figura 20. Representación espacial del modelo de junta tipología rectificado, capa fina de mortero continuo sin penetración (caso E.4.4.).

Una vez obtenida la simulación base para las diferentes soluciones constructivas, se realizó el cálculo con diferentes contenidos de humedad. La permeabilidad del material del bloque se ve afectada por el contenido de humedad. Los ensayos de difusión de vapor realizados para el material, nos proporcionan los valores de permeabilidad para tres humedades relativas medias: 27, 64 y 80%

Tabla 7. Comparativa de resultados para diferentes tipos de junta y humedad relativa media.

| Bloque de 24. Modelo TM-EF. | | | | | |
|---|--------|-------|--|---|---|
|  | | | Tendel de mortero discontinuo (30 mm aire) caso E.4.2. | Tendel de mortero discontinuo (30 mm aislante PU) caso E.4.3. | Rectificado. Capa fina de mortero continuo (3 mm sin penetración) caso E.4.4. |
| | | | Tendel de mortero lleno caso E.4.1. | | |
| Factor de resistencia a la difusión del vapor equivalente (muro) | HR (%) | | | | |
| | 27 | 18.80 | 18.55 | 18.30 | 18.74 |
| | 64 | 15.47 | 15.26 | 15.04 | 15.39 |
| | 80 | 19.50 | 19.21 | 19.06 | 19.46 |

$$\mu_{eq} = \frac{h_1 + h_2 + h_3}{\frac{h_1}{\mu_1} + \frac{h_2}{\mu_2} + \frac{h_3}{\mu_3}}$$

Conclusiones

De los resultados obtenidos, se observa, como era de esperar, que el factor de resistencia a la difusión de vapor de los bloques de Termoarcilla, no es un valor constante, sino que depende de la humedad relativa media a la que se encuentre el mismo.

El máximo valor de las μ obtenidas corresponde a la máxima humedad relativa de ensayo, 80%. Esto se explica debido a la existencia de condensación capilar (no confundir con condensación intersticial) que se produce en los poros de la arcilla empleada en los bloques cuando la humedad es en torno al 80%, dentro del rango sobre-higroscópico.

Estas "islas" de condensación microscópica en los poros dan como resultado una mayor tortuosidad a la difusión de vapor a través del material y redundan en una mayor resistencia al flujo de vapor por difusión a través del bloque.

La fábrica de boque de 24 cm de Termoarcilla estudiado presenta un factor de resistencia de difusión al vapor de agua superior al asignado en las bases de datos de la normativa de aplicación, donde se le asigna un valor de 10, y los resultados arrojan un valor de hasta 19,50 en altas humedades relativas.

Es importante conocer las propiedades higroscópicas "reales" de los materiales de construcción empleados, ya que las bases de datos actuales ofrecen valores genéricos que en ocasiones discrepan sustancial entente con el comportamiento real del material en cuestión frente a la humedad.

Iñaki Gómez Arriaran
 Doctor Ingeniero Industrial

Bibliografía

[1] Gomez, Iñaki; Millán. J.A.; Sala, J.M.; Moisture Storage Properties. (2008) Moisture Storage Properties of Multi-Slotted Light-weight Ceramic Blocks. Comparison Between Two Manufacturers Journal of Building Physics 31 (3); 225

[2] Lewis Greenspan, 'Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions', J. of Research, National Bureau of Standards, 81A (1977) pp 89-96

[3] Douglas M. Burch. Building and fire Research Laboratory NIST, National Institute of Standards and Technology. U.S.A.1997.

[4] Determination of the Moisture Capacity of Porous Building Materials. Roels Staf, Carmeliet, Jan. Journal of Building Physics January 2002 vol. 25 no. 3 209-237

[5] Krus, M.: Moisture Transport and Storage Coefficients of Porous Mineral Building Materials. Theoretical Principles and New Test Methods. Fraunhofer IRB Verlag, 1996

[6] Kumaran, M.K. Moisture Diffusivity of Building Materials from Water Absorption Measurements Journal of Building Physics April 1999 vol. 22 no. 4 349-355

[7] Gómez, I., Millán, J.A., Sala J.M. (2007). Characterization of Moisture Transport Properties for Lightened Clay Brick . Comparison Between Two Manufacturers. Journal of Building Physics; 31; 179

[8] AENOR: Reglamento particular de la marca AENOR para piezas de arcilla cocida para fábricas a revestir, RP-34.14

Determining the permeability of the 24-cm Termoarcilla block

Iñaki Gómez Arriaran
Doctor Ingeniero Industrial

The action of moisture on construction materials affects the thermal insulation of the building, the healthiness of its spaces and the durability of its enclosures; in short, the comfort within the walls that make up the internal volume of the building.

While it is customary to know the thermal properties of most construction materials, less research has been conducted on the characterisation of their hygroscopic properties and their performance against moisture. This is due, among other aspects, to the fact that the mathematical theory on heat flow is much more developed than the mathematical formula that explains the flow of moisture in porous medium and to the difficulty of establishing testing methods and techniques that enable coefficients on the transport of moisture through the porous structure of construction materials to be quantified.

Because of this, the values that are often used in one of the transport coefficients in relation to the vapour diffusion flow –the resistance coefficient of the vapour diffusion flow -m- is usually 10 for most materials and factories.

A large number of bricks are assigned this value, for instance, in the CTE (Technical Building Code), as are Termoarcilla blocks.

This work determines the resistance coefficient of the vapour diffusion flow of 24-cm Termoarcilla blocks. This document is part of a research project that was financed by the Basque Government and the Termoarcilla Consortium, and was developed using the material resources of the Basque Government's Quality Control Department.

Introduction and objectives

In experiments, a material's vapour permeability is determined using a diffusion test; however, the resulting properties can only be considered representative if the construction product is homogenous and does not contain other elements in its finish.

Given that standard testing methods do not currently exist, having a procedure for the calculation of this property of a product based on the permeability of its components would be an important starting point for the effective design of enclosures made of Termoarcilla blocks from a hygrothermal perspective. In the case of the vapour permeability of a block, it is very difficult to obtain accurate and reliable measures of the vapour flow in experiments; therefore a first step would be to calculate this through simulation.

It is very common for building construction elements -particularly in the geographical and climate areas covered in this study- to contain masonry materials on one side of the brick, whether ceramic or concrete-based, which join and become stronger when stuck with mortar or masonry paste.

For practical purposes, it is necessary to know the average or equivalent properties of the construction system in which these blocks are used. The resulting geometry in the configuration of the hollows and matrix material making up a block or brick is as varied as the uses it is put to and the preferences and local traditions of manufacturers.

In contrast to our reflections on the many variables affecting the properties of a ceramic block compared to the hygrothermal requirements, the regulation greatly simplify the properties that apply to the transfer of vapour.

Therefore, when analysing the resistance factor values of water vapour diffusion (m) for masonry enclosures, we can see that there are no appreciable differences between different assemblies and that the values are very general. This has little bearing on the findings for materials tested in laboratories in accordance with standard UNE-EN ISO 12572:2001.

This lack of precision or ambiguity in the values of the moisture transfer properties creates uncertainty in calculation and in verification of compliance with the regulation on superficial and interstitial condensation.

A lack of standard methods for the measurement of the diffusion of vapour through thick compound systems means that the use of alternative calculation or numerical simulation methods is an attractive possibility for obtaining reference data to improve the approximate results.

Once the hygroscopic properties and the porous structure of the clay in the 24-cm lightweight block had been characterised, a numeric simulation of the transfer of vapour through a block comprised of air gaps and a solid matrix material was performed.

The objective of the simulation was to obtain the vapour transmission properties of the whole block geometry, to obtain a value for the equivalent permeability and the resistance factor to vapour diffusion of the geometry of a 24-cm block, in addition to the brickwork of the Termoarcilla block in question.

Conclusions

As was to be expected, the findings showed that the resistance factor of the Termoarcilla block to vapour diffusion is not a constant value, but depends on the average relative humidity to which the block is exposed.

The maximum value obtained for "m" corresponds to the maximum relative humidity of the test, 80%. This is due to the capillary condensation (not to be confused with interstitial condensation) that occurs in the pores of the clay used in the blocks when humidity is around 80%, within the over- hygroscopic range.

These "islands" of microscopic condensation in the pores give greater tortuosity to the diffusion of vapour through the material and provide greater resistance to vapour diffusion through the block.

The 24-cm Termoarcilla block studied has a higher resistance to water vapour diffusion than the value assigned to it in the databases of the current regulation, which is 10, and the results of our tests yielded a value of up to 19.50 in high relative humidities.