Páginas: 19 y 2 Anexos

Denominación del trabajo:

Determinación de la transmitancia térmica de muros de fábrica de piezas de arcilla cocida (Modelos: Perforado de 10 y Perforado D20)



CERÁMICA UTZUBAR, S.A.

CTRA. Pamplona, km.40 31820 Etxarri Aranaz (Navarra)

Bailén, 27 de Mayo de 2019





<u>Índice</u>

1 Objeto
2 Muestras y Consideraciones de Cálculo
2.1 Conductividad Térmica
2.2 Simulación mediante Elementos Finitos
2.2.1 Software de Elementos Finitos
2.2.2 Geometría de las Piezas Base
2.2.3 Configuración de las Fábricas de Albañilería
2.2.4 Módulo de Cálculo y Simplificación
2.2.5 Arranque y Coronación de Fábricas
3 Determinación de las Características de los Materiales
3.1 Propiedades de las Piezas Base Cerámicas
3.2 Material de Formación de Llagas y Tendeles
3.3 Propiedades de los Huecos de Aire
4 Simulación mediante Elementos Finitos1
4.1 Calculo de la Transmitancia Térmica de la Sección 11
4.2 Calculo de la Transmitancia Térmica de la Sección 21
5 Caracterización Térmica de la Fábrica10
Anexo I: Validación UNE-EN 1745:2013 (Anexo D: Requisito para una adecuada metodología de cálculo)
Anexo II: Validación EN-ISO 10211:2007 (Anexo A: Validación de los métodos de cálculo)



1.- Objeto

El presente trabajo se elabora por parte de la Fundación Innovarcilla a petición de Cerámica Utzubar S.A., con el objetivo de determinar la transmitancia térmica de muros de fábrica de piezas de arcilla cocida ejecutadas con los modelos Perforado 10 y Perforado D20, con un revestimiento de 1,5 cm de yeso y un enfoscado de mortero de cemento de 1,5 cm.

Para ello, siguiendo la metodología descrita en la norma UNE-EN 1745 "Fábricas de albañllería y componentes para fábrica. Métodos para determinar los valores térmicos de proyecto", se utilizará la metodología P3 basada en la determinación de la Conductividad Térmica del material, λ_{10, dry, unit}, a través de la metodología establecida en la norma UNE-EN 12664 "Determinación de la Resistencia Térmica por el método de la placa caliente guardada y el medidor de flujo de calor" y posterior simulación mediante elementos finitos usando el software Therm, versión 7.6.1.0.

Para el objetivo descrito anteriormente es importante indicar que el alcance del trabajo se circunscribe al estudio de un segmento homogéneo y representativo de fábrica cerámica, sin incluir en el trabajo la influencia de:

- Posibles puentes térmicos como pilares embebecidos en el cerramiento o cantos de foriado.
- Otros elementos de cerramiento con distinta conductividad térmica, como huecos translucidos y puertas.
- Piezas especiales de la propia solución constructiva, que modifiquen la conductividad térmica de la configuración estudiada.
- Condiciones particulares de la edificación como soleamiento, orientación, etc.

Estos aspectos no contemplados en el presente estudio, pueden producir pérdidas de energía por la envolvente de la edificación, que influyan en su comportamiento térmico global, y por tanto en la demanda energética complementaria del edificio en cuanto a calefacción o refrigeración.

2.- Muestras y Consideraciones de Cálculo

Las piezas para fábrica de albañilería utilizadas en el presente trabajo para determinar los valores térmicos de proyecto según la norma UNE-EN 1745 se muestran en las siguientes figuras.

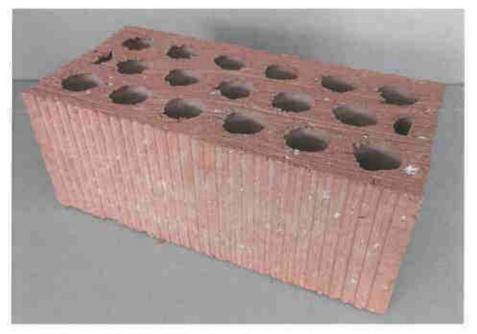


Figura 1: Perforado de 10 analizado en el presente trabajo

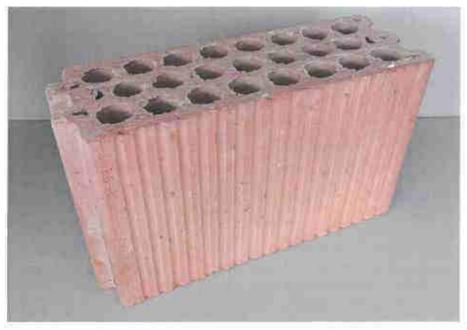


Figura 2: Perforado D20 analizado en el presente trabajo





2.1.- Conductividad Térmica

Para obtener el valor de Conductividad Térmica utilizado en el proceso de simulación posterior se ha supuesto que tanto el Macizo Perforado de 10 como el PerforadoD20 se encuentran fabricados con la misma mezcla de arcillas y bajo el mismo procedimiento de fabricación (condiciones de molturación de arcillas, de conformado mediante extrusión y temperatura de cocción). Por lo tanto, la determinación del valor de conductividad térmica se ha llevado a cabo sobre un único material, el Perforado D20, asumiendo el Perforado de 10 el mismo valor de Conductividad Térmica.

La Conductividad Térmica se ha determinado usando el equipo FOX50, de TA Instruments.

2.2.- Simulación mediante Elementos Finitos

A continuación se describe el software utilizado y las consideraciones y simplificaciones realizadas para realizar el proceso de simulación.

2.2.1.- Software de Elementos Finitos

Para acometer las simulaciones oportunas y poder resolver las distintas geometrías, se utiliza el software informático Therm versión 7.6.1.0. Therm realiza un análisis bidimensional de la transmisión de calor basado en el método de los elementos finitos. El programa está desarrollado por el Lawrence Berkeley National Laboratory de EEUU.

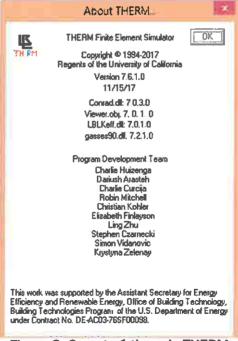


Figura 3: Características de THERM





2.2.2.- Geometría de las Piezas Base

Las diferentes configuraciones para ejecutar las fábricas de piezas de albañilería que se pueden construir con las diferentes piezas analizadas parten de las siguientes piezas base.

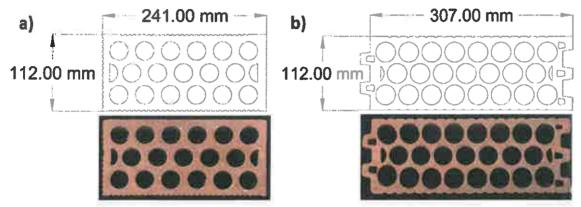


Figura 4: Pieza original y Definición Geométrico del a) Macizo Perforado de 10 y b) Macizo Perforado D20

2.2.3.- Configuración de las Fábricas de Albañilería

A continuación se presenta la configuración de la fábrica utilizada para la determinación de los valores térmicos de proyecto. Las fábricas simuladas están constituidas por los siguientes componentes:

- Espesor de la solución: 112 mm de espesor tanto para el Perforado de 10 como el Perforado D20
- Tipo de material de agarre entre piezas cerámicas (Junta continua de tendel):
 Mortero de agarre estándar M5 o M7,5.
 - Es importante indicar que en las fábricas ejecutadas con el ladrillo Perforado 10 existe junta vertical de mortero, mientras que en el caso de las fábricas ejecutadas con el ladrillo Perforado D20 la junta vertical entre las piezas cerámicas es a hueso, sin presencia de material de agarre.
- Revestimiento exterior: Enfoscado de mortero de 1,5 cm de espesor
- Revestimiento interior: Enlucido de yeso de 1,5 cm de espesor

En las siguientes imágenes se muestran la sección horizontal de las fábricas simuladas con cada una de las piezas analizadas







Figura 5: Sección horizontal de un muro sin revestimiento ejecutado con a) Perforado de 10 y b) Perforado D20

2.2.4.- Módulo de Cálculo y Simplificación

Para acometer el cálculo se realiza un corte de la sección que permita replicar la geometría de la fábrica de manera homogénea e indefinida. De esta forma, no es necesario modelar la longitud completa del muro, ya que el análisis de un módulo ya contempla todas las posibles variaciones geométricas de cada tipo de sección.

A este respecto, cabe destacar que al utilizar el módulo geométrico para el análisis de la solución quedan fuera del valor de la Transmitancia Térmica, U, los puntos singulares del proceso constructivo en una edificación, como puedan ser los encuentros con los forjados (de los que forma parte el propio arranque y coronación del muro), encuentros con huecos, etc.

Además de la obtención de estos módulos geométricos sobre la geometría original de las piezas base, también se realizan una serie de simplificaciones en el perímetro de la sección para facilitar el proceso de modelación y cálculo con el software. Dicho proceso consiste en eliminar el estriado exterior rectificando a media altura.

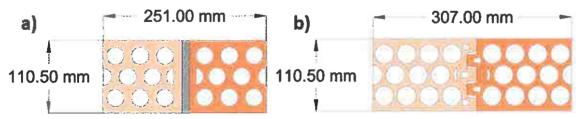


Figura 6: Sección del módulo geométrico utilizado en la simulación de la fábrica de albañilería de a) Macizo Perforado de 10 y de b) Macizo Perforado D20





2.2.5.- Arranque y Coronación de Fábricas

Los puntos singulares del muro son encuentros que en mayor o menor medida generan puentes térmicos que influyen en el valor de la transmitancia térmica de los elementos constructivos. Generalmente estos aparecen cuando existen elementos con distinta conductividad térmica en el elemento constructivo para el que se obtiene la resistencia térmica, como por ejemplo, pilares embebidos en el cerramiento exterior. También se dan cuando se produce un cambio de espesor en la sección del muro, la inclusión de piezas especiales no contempladas o en los encuentros con forjados, tanto en el arranque como en la coronación de los mismos y dependen mucho de la manera en la que se ejecute cada punto singular.

En resumen, la presencia de puentes térmicos produce pérdidas de energía e influyen, por tanto, en el comportamiento térmico del edificio y en el cálculo final del aislamiento térmico de una envolvente arquitectónica, lo que por supuesto afectará al confort térmico obtenido y a la propia demanda de calefacción y refrigeración del edificio.

El análisis de estos puntos queda fuera del alcance de este estudio, no obstante, es necesario indicar que su determinación, junto con su influencia en el cómputo global de la demanda energética de un edificio (incluyendo la implicación de los diferentes elementos constructivos intervinientes y de otra serie de condiciones ambientales), resulta de obligado cumplimiento según la reglamentación española.

3.- Determinación de las Características de los Materiales

En este apartado se muestran los resultados de la determinación de las propiedades físicas de los materiales cerámicos base para la construcción de las fábricas de albañilería (Perforado de 10 y Perforado D20), así como del resto de materiales que influyen en las propiedades térmicas de las fábricas, el mortero utilizado para la formación de llagas y tendeles y el aire ocluido en las perforaciones de las fábricas

3.1.- Propiedades de las Piezas Base Cerámicas

Los parámetros de Conductividad Térmica y Densidad Absoluta Seca del Macizo Perforado de 10 y el Macizo Perforado D20 han sido determinados mediante las siguientes metodologías de ensayo:

- Conductividad Térmica, λ₁₀, dry, unit,: La determinación de esta propiedad está basada en la norma UNE-EN 12664 "Determinación de la Resistencia Térmica por el método de la placa caliente guardada y el medidor de flujo de calor". Para cuantificar el flujo de calor que atraviesa la muestra se ha utilizado una diferencia de temperatura entre placa fría y caliente de 20°C, siendo la temperatura media de 10°C.
- Densidad Absoluta Seca: La determinación de la densidad absoluta seca se basa en la norma UNE-EN 771-13 "Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 13: Determinación de la densidad absoluta seca y de la densidad aparente seca de piezas para fábricas de albañilería (excepto piedra natural)". El valor obtenido es el valor medio de 3 repeticiones.

Tabla 1: Conductividad Térmica y Densidad Absoluta Seca de las Piezas Base

Pieza Base	Conductividad Térmica, W/mK	Densidad Absoluta Seca, Kg/m³
Perforado de 10	0 E92 W/mK	1750 Kg/m³
Perforado D20	0.582 W/mK	1750 Kg/m ³





3.2.- Material de Formación de Llagas y Tendeles

Como material de agarre entre las piezas base cerámicas se utiliza un mortero de albañilería tipo M-5. Este mortero de cemento presenta una densidad comprendida entre 1800 kg/m³ y 2000 kg/m³ y un valor de conductividad térmica de 1,3 W/m·K.

3.3. Propiedades de los Huecos de Aire

Cuando se pretende evaluar el desempeño energético que tiene una solución constructiva mediante simulación, es necesario conocer las propiedades que presentan los distintos materiales que intervienen en la hoja objeto de estudio y eso incluye los huecos de aire que puedan existir.

En el caso de la cerámica, los materiales aislantes o el mortero de agarre entre piezas, se pueden obtener sus propiedades mediante ensayo en laboratorio o mediante valores tabulados comúnmente conocidos y reconocidos en publicaciones oficiales.

En el caso de los huecos de aire existen varias opciones, siendo posible definir su geometría dentro del software de cálculo y aplicar en los mismos materiales tipo aire, que se incluyen de manera predeterminada, o bien calcular su conductividad térmica mediante la norma ISO 6946.

En el anexo B de la citada norma se describe el procedimiento para el cálculo de la resistencia térmica de espacios confinados no ventilados, distinguiendo entre espacios con una anchura y longitud 10 veces mayor que el espesor y espacios con una anchura que no llega a ser 10 veces mayor que su espesor. En las siguientes ilustraciones se pone en contexto la anchura (b) y el espesor equivalente (d) en relación con las distintas piezas base y la dirección del flujo de calor.

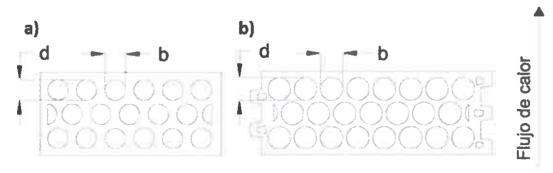


Figura 7: Relación del aspecto del huecos en función de la dirección del flujo de calor para el a) Perforado de 10 y b) Perforado D20





Teniendo en cuenta todas las tipologías de huecos presentes, se disponen de un total de 9 huecos distintos entre ambas piezas (3 para la pieza base Perforado de 10 y 6 para la pieza base Perforado D20), tal y como se muestra en la Figura 8, y todos cumplen con la relación de que su anchura no sea 10 veces mayor que su espesor.

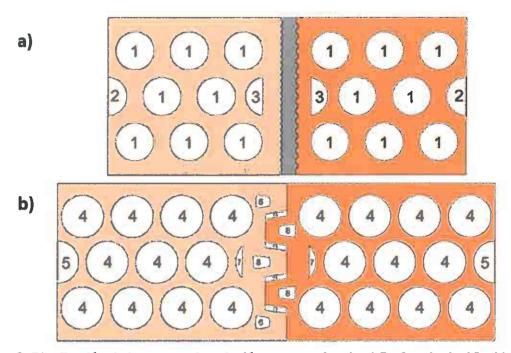


Figura 8: Distribución de huecos en la solución constructiva de a) Perforado de 10 y b)

Perforado D20

Al presentar todos los huecos una relación entre la anchura y el espesor menor a 10 unidades, las propiedades térmicas se calculan con las siguientes ecuaciones, según la norma ISO 6946:

$$R_g = \frac{1}{h_a + h_r}$$
 Ecc. 1

$$h_a = mayor(\frac{0.025}{d}, 1.25 \ para \ una \ dirección \ de \ flujo \ horizontal)$$
 Ecc.2

$$h_{r} = \frac{h_{r0}}{\frac{1}{\varepsilon_{1}} + \frac{1}{\varepsilon_{2}} - 2 + \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \frac{d^{2} - d}{b^{2} - b}}}}$$
 Ecc.3

Dónde:

Rg	es la resistencia térmica del espacio confinado	ϵ_1,ϵ_2	son las emisividades hemisféricas de las superficies adyacentes al hueco
ha d b hr h _{ro}	es el coeficiente de conducción/convección es el espesor del espacio confinado es la anchura del espacio confinado es el coeficiente de radiación es el coeficiente de radiación de una superficie de cuerpo negro	σ Tm la E	es la constante de Stefan-Boltzmann es la temperatura termodinámica media de superficie y de su entorno es la emisividad entre superficies





Tabla 2: Valores de las Propiedades Térmicas de los Huecos de la Pieza Base Cerámica Perforado de 10

Hueco	1	2	3
Área [mm²]	572,55	286,27	245,44
Anchura, b (mm)	27,00	13,50	12,00
Espesor, d [mm]	21,21	21,21	20,45
ha [W/m²K]	1,25	1,25	1,25
ε₁≔ε₂ [-]	0,9	0,9	0,9
E(H)	0,82	0,82	0,82
h₀ [W/m²K]	5,14	5,14	5,14
h-[W/m²K]	3,28	2,90	2,86
R _E [m ² K/W]	0,22	0,24	0,24
Conductividad Térmica Hueco, λ [W/mK]	0,0960	0,0881	0,0841

Tabla 3: Valores de las Propiedades Térmicas de los Huecos de la Pieza Base Cerámica Perforado D20

Hueco	4	5	6	7	8	9
Area [mm²]	705,56	352,96	81,4	77,31	98,23	60
Anchura, b [mm]	30,00	15,00	10,00	5,00	12,00	15,00
Espesor, d [mm]	23,52	23,53	8,14	15,46	8,19	4,00
h₃ [W/m²K]	1,25	1,25	3,07	1,62	3,05	6,25
€1=62 [-]	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
E [f]	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
hia [W/m²K]	5,14	5,14	5,14	5,14	5,14	5,14
h-[W/m²K]	3,28	2,90	3,26	2,64	3,36	3,80
R _e [m ² K/W]	0,22	0,24	0,16	0,24	0,16	0,10
Conductividad Térmica Hueco, λ [W/mK]	0,1065	0,0977	0,0515	0,0658	0,0525	0,0402





4.- Simulación mediante Elementos Finitos

La simulación mediante elementos finitos tiene por objetivo obtener el flujo de calor, Q, que atraviesa las distintas secciones de la solución constructiva que abarca este estudio. Una vez obtenido los distintos datos, es posible calcular la Resistencia Térmica o la Transmitancia Térmica de la solución constructiva.

Las distintas secciones que forman una fábrica de albañilería son:

- Sección 1: Sección comprendida exclusivamente por la piezas de arcilla cocida, de la cual se obtiene el valor de Resistencia Térmica R₁
- Sección 2: Sección formada por la pieza de arcilla cocida y el mortero de agarre que penetra en las perforaciones, de la cual se obtiene el valor de Resistencia Térmica R₂
- Sección 3: Sección formada por el mortero utilizado, de la cual se obtiene el valor de Resistencia Térmica R₃

Definidas las diferentes secciones, antes de realizar la simulación, se establecen las condiciones de contorno tal y como se muestra en la siguiente figura:

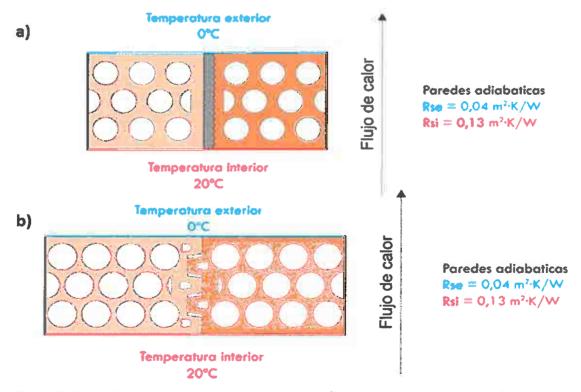


Figura 9: Condiciones de contorno del modelo de cálculo para la pieza base a) Perforado de 10 y b) Perforado D20





4.1.- Calculo de la Transmitancia Térmica de la Sección 1

Para acometer el cálculo es necesario realizar un proceso de mallado de la geometría a estudiar, permitiendo descomponer la geometría en partes más pequeñas. En las zonas de mayor complejidad la malla se vuelve más tupida, esto permite resolver las ecuaciones de formas más precisa.

Para realizar el mallado utilizado en la simulación por elementos finitos de la pieza base Perforado de 10 se han utilizado un total de 9087 mallas mientras que para el cálculo por elementos finitos de la pieza base Perforado D20 se han utilizado 15675 mallas. En las siguientes imágenes se muestran los resultados gráficos de la simulación de la sección 1 de ambas piezas mientras que en la Tabla 4 se muestran los valores obtenidos en el proceso de simulación.

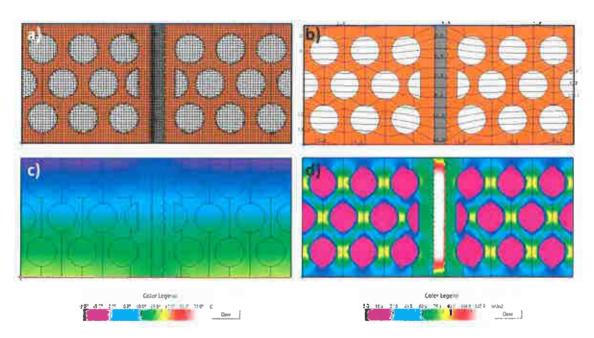


Figura 10: Simulación Térmica de la Sección 1 de la pieza base Perforado de 10. a)

Mallado, b) Líneas Isotermas, c) Distribución de temperaturas en el modelo simulado y d)

Flujo de Calor a través de la sección

Tabla 4: Valores de las Propiedades Térmicas obtenidos de la simulación de la Sección 1

Hueco	Perforado de 10	Perforado D20
Flujo de Calor, Q	10.5655 W	10.3656 W
Transmitancia Térmica*, U	2.1047 W/m²K 1.6882 W/ m²	

^{*} Sin revestimiento exterior ni interior





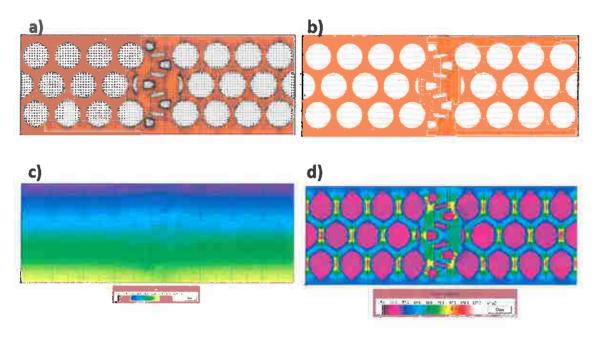


Figura 11: Simulación Térmica de la Sección 1 de la pieza base Perforado D20. a) Mallado, b) Líneas Isotermas, c) Distribución de temperaturas en el modelo simulado y d) Flujo de Calor a través de la sección

4.2.- Calculo de la Transmitancia Térmica de la Sección 2

Junto a la simulación del apartado anterior, en la que se realiza un cálculo con todos los huecos colmatados de aire, es necesario comprobar el comportamiento que ofrece la sección horizontal de muro en la que hay mortero que penetra en las perforaciones verticales. En la imagen que sigue a continuación, los polígonos de color gris representan el mortero.

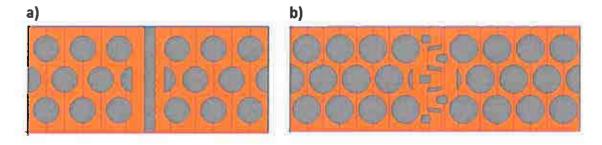


Figura 12: Geometría de la Simulación con las perforaciones rellenas de mortero en la pieza base del a) Perforado de 10 y b) Perforado D20

Realizando el mismo proceso de cálculo que en la anterior sección, los resultados gráficos obtenidos y los valores tabulados se muestran a continuación:





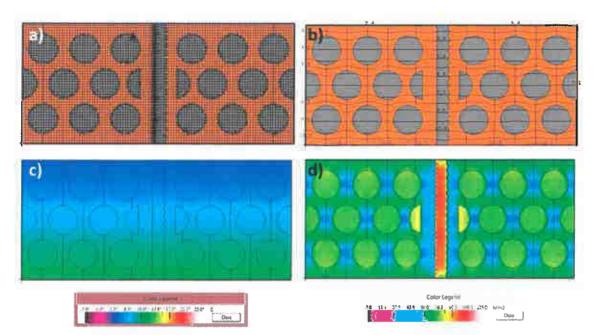


Figura 13: Simulación Térmica de la Sección 2 de la pieza base Perforado de 10. a)

Mallado, b) Líneas Isotermas, c) Distribución de temperaturas en el modelo simulado y d)

Flujo de Calor a través de la sección

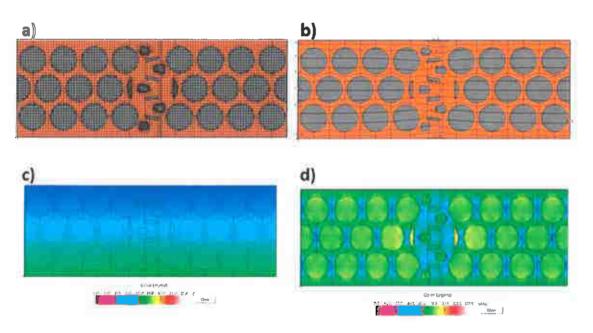


Figura 14: Simulación Térmica de la Sección 1 de la pieza base Perforado D20. a) Mallado, b) Líneas Isotermas, c) Distribución de temperaturas en el modelo simulado y d) Flujo de Calor a través de la sección

Tabla 5: Valores de las Propiedades Térmicas obtenidos de la simulación de la Sección 2

Hueco	Perforado de 10	Perforado D20
Flujo de Calor, Q	16.3241 W	20.4807 W
Transmitancia Térmica*, U	3.2519 W/m ² K	3.3356 W/ m ² K

^{*} Sin revestimiento exterior ni interior





5.- Caracterización Térmica de la Fábrica

Al conocer el valor de flujo de calor que atraviesa cada una de las secciones de la fábrica de albañilería es posible conocer la resistencia y transmitancia térmica final que ofrece el muro. Para ello utilizamos las definiciones indicadas en la norma UNE 136021:2016.

La resistencia térmica final del muro es la siguiente:

$$R = R_{fab} + R_{r1} + R_{r2}$$
 Ecc. 4

$$R_{fab} = \frac{h_1 + h_2 + h_3}{\frac{h_1}{R_{1,dise\tilde{n}o}} + \frac{h_2}{R_{2,dise\tilde{n}o}} + \frac{h_3}{R_{3,dise\tilde{n}o}}} + R_{si} + R_{se}$$
 Ecc. 5

$$R_{1,dise\tilde{n}o} = \frac{L \cdot 20}{Q_1} - R_{si} - R_{se}$$
 Ecc. 6

$$R_{2,dise\tilde{n}o} = \frac{L \cdot 20}{Q_2} - R_{si} - R_{se}$$
 Ecc. 7

$$R_{3,dise\tilde{n}o} = \frac{s}{\lambda_{mor,dis}}$$
 Ecc. 8

$$R_{r1} = \frac{e_{r1}}{\lambda_{r1}}$$
 Ecc.8

$$R_{r2} = \frac{e_{r2}}{\lambda_{r2}}$$
 Ecc. 9

Por último, para conocer la transmitancia térmica de la sección completa tenemos:

$$U = \frac{1}{R}$$
 Ecc. 10

Dónde:

R_{fab} es la resistencia térmica final del muro, sin los revestimientos

R_{r1} es la resistencia térmica del revestimiento 1

R_{r2} es la resistencia térmica del revestimiento 2

h₁ es la altura de la sección de pieza hueca

h₂ es la penetración del material de la junta en los huecos

h₃ es el ancho de la junta entre dos piezas

R_{1,diseño} es la resistencia térmica de la sección de pieza

R_{2,diseño} es la resistencia térmica de la sección de penetración de mortero

R_{3,diseño} es la resistencia térmica de la sección de la junta entre piezas





R_{si} es la resistencia superficial interior

R_{se} es la resistencia superficial exterior

L es la altura del módulo geométrico definido para la simulación

Q₁ es el flujo de calor que atraviesa el modelo con las condiciones impuestas en la simulación

 $\lambda_{\text{mor,dis}}$ es la conductividad del material de la junta

S es el espesor del modelo de cálculo

 λ_{r1} es la conductividad del material de revestimiento 1

 λ_{12} es la conductividad del material de revestimiento 2

er1 es el espesor de la capa de revestimiento exterior

e_{r2} es el espesor de la capa de revestimiento interior

R es la transmitancia térmica final del muro, incluyendo los revestimientos

Siendo los valores utilizados para el cálculo los siguientes:

h₁ 98 mm (Perforado 10)

h₁ 194 mm (Perforado D20)

h₂ 20 mm

h₃ 10 mm

L 251 mm (Perforado 10)

L 307 mm (Perforado D20)

S 110,5 mm

R_{si} 0,13 m²K/W

Rse 0,04 m²K/W

 $\lambda_{\rm m}$ 1,3 W/m·K

 λ_{r1} 1,3 W/m·K, para un enfoscado de mortero

λ₁₂ 0,57 W/m-K, para un guarnecido de yeso

er1, er2 15 mm





Aplicando las fórmulas anteriormente expuestas, se obtienen los valores térmicos de proyecto para fábricas de albañilería fabricadas con la pieza base Macizo Perforado de 10 y Macizo Perforado D20 para los casos analizados en el presente estudio

Tabla 6: Valores Térmicos de Proyecto para fábricas de Albañilería construidas con Macizo Perforado de 10 y Macizo Perforado D20

Transmitancia Térmica, U (Uso Exterior)	Perforado de 10	Perforado D20
Sin Revestimiento	2,57 W/m ² K	2,10 W/m ² K
Con Revestimiento [1.5 cm Yeso + Pieza +1.5 cm Mortero]	2,34 W/m ² K	1,94 W/m ² -K





El presente informe, nº S-TE-01073-0005-19 expedido a petición de CERÁMICA UTZUBAR, S.A., consta de una portada y 19 páginas y 2 Anexos.

Bailén, a 27 de Mayo de 2019

José Ángel Laguna

Gerente

Pal. El Cruso, Callettas Alamillos, 1

Rosendo J. Galán Arboledas

Responsable de I+D+i

Materiales - Empresas

José Pérez Fenoy

Responsable Área

Sistemas Constructivos

CLÁUSULAS DE RESPONSABILIDAD

- Los resultados, conclusiones y/o recomendaciones contenidos en este informe se han obtenido a partir de los ensayos realizados y/o de la información suministrada por el peticionario.
- No se admite ninguna responsabilidad referente a la exactitud y representatividad del muestreo a menos que éste haya sido efectuado bajo nuestra propia supervisión. Salvo mención expresa, las muestras y sus referencias han sido elegidas libremente por el peticionario.
- Reservados todos los derechos. El contenido de este informe goza de la protección que le otorga la ley. No podrá ser comunicado, transformado, reproducido o distribuido públicamente en todo o en parte, sin la autorización expresa de la Fundación Innovarcilla. La reproducción de este informe solamente está autorizada bajo forma de facsímil íntegro fotográfico, para el envío puntual y no masivo a clientes y/o proveedores del peticionario, con el único objetivo de informar y siempre citando la autoría de la Fundación Innovarcilla.
- La Fundación Innovarcilla no se hace responsable del uso que el peticionario u otra persona o entidad haga de los datos o indicaciones contenidos en el presente informe, en perjuicio o en beneficio de las marcas comerciales que el peticionario haya podido citar como identificación de las muestras sometidas a estudio.
- Este informe tiene carácter exclusivamente comercial y no podrá ser utilizado en cualquier procedimiento judicial o administrativo, ni como dictamen pericial ni como prueba documental, salvo autorización expresa de la Fundación Innovarcilla. La autorización por parte de la Fundación Innovarcilla estará condicionada, cuando así se requiera, al abono por parte del cliente, incluso con carácter previo, de los fondos necesarios para cubrir los gastos asociados a la defensa de este informe. La Fundación Innovarcilla se reserva el derecho de tomar las oportunas acciones legales en caso de incumplimiento de esta cláusula.
- La Fundación Innovarcilla podrá incluir en sus informes análisis, comentarios o cualquier otra valorización que juzgue necesaria, aun cuando ésta no hubiese sido expresamente solicitada.
- La Fundación Innovarcilla garantiza la confidencialidad del contenido del presente informe.





ANEXO A. PRIMERA VALIDACIÓN: UNE-EN 1745:2013 (ANEXO D. REQUISISTOS PARA UNA ADECUADA METODOLOGÍA DE CÁLCULO)

Con el objetivo de poder validar el programa utilizado para la realización del presente trabajo, se somete a la herramienta informática a un proceso de validación definido en la norma UNE-EN 1745:2013. Para ello es necesario realizar en el programa alguno de los casos de referencia incluidos en la citada normativa y comparar los resultados simulados en la herramienta con los valores incluidos de la norma 1745:2013, sin que exista entre ellos más de un 2% de diferencia.

Para la validación, se modela el caso 1 del anexo D. Este caso aporta los siguientes datos para introducir en el programa:

Geometría del caso: Pieza de 250 x 300.2 mm²

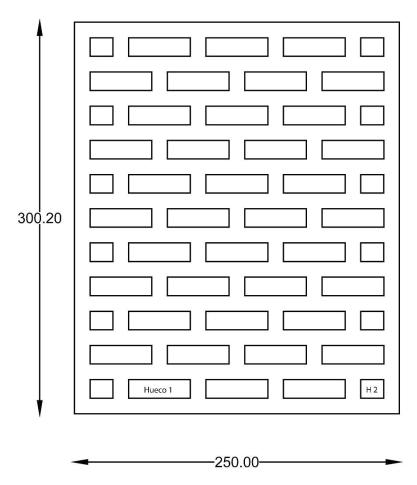


Ilustración A1. Geometría Caso 1 del anexo D UNE-EN 1745:2013

Conductividad del material: $\lambda = 0.35 \text{ W/(m\cdot K)} \text{ (Naranja}^1\text{)}$

Condiciones de contorno: Rsi = $0.13 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ (Línea roja)

Rse = $0.04 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ (Línea azul)

¹ Los colores entre paréntesis () hacen referencia a la ilustración A2. Asignación de materiales en el Software

Condiciones del hueco 1 (14.2x47.5 mm²): $\lambda = 0.082 \text{ W/(m·K)}$ (Cian)

Condiciones del hueco 2 (14.2x17.7 mm²): $\lambda = 0.074 \text{ W/(m·K)}$ (Azul)

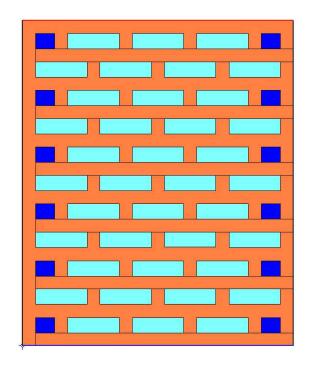
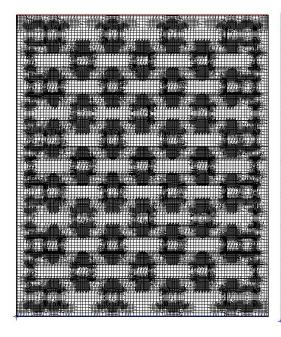
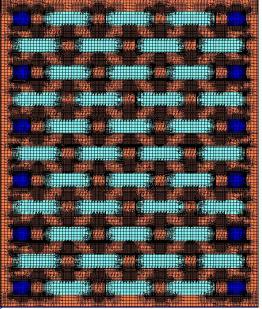


Ilustración A2. Asignación de materiales en el software

Para la discretización del modelo se ha utilizado una malla bastante tupida que consta de 76251 polígonos.





llustración A3. Proceso de mallado de la geometría, con distinción de materiales y huecos en la imagen derecha

Aplicando un diferencial térmico entre ambientes de 20°C, el programa de cálculo arroja el siguiente resultado para el flujo de calor, con el que comparar los valores de las distintas características calculadas frente a los valores referencia de la norma UNE:

Tabla A1. Flujo de calor Q (Heat Flow THERM)				
Unidad	Valor			
Q (W/m)	2.8346			

Tabla A2. Resultados THERM – Valores UNE-EN 1745:2013										
Unidad	Unidad Valor THERM Valor 1745:2013 Diferencia (%)									
U (W/m²⋅K)	0,5669	0,5656	0,233							
R _{mas} (m ² ·K/W)	1,7639	1,7680	0,233							
Rt (m²·K/W)	1,5939	1,5980	0,258							
λυ (W/m·K)	0,188	0,188	0,258							

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos y comprobando que en ningún caso se supera el 2 % de diferencia entre valores, siendo esta la máxima diferencia admisible según la UNE-EN 1745:2013, el programa de cálculo THERM queda acreditado como un método válido para poder simular las propiedades térmicas de las fábricas de albañilería y sus componentes.

Para finalizar se muestran los resultados gráficos obtenidos en la simulación de la geometría introducida.

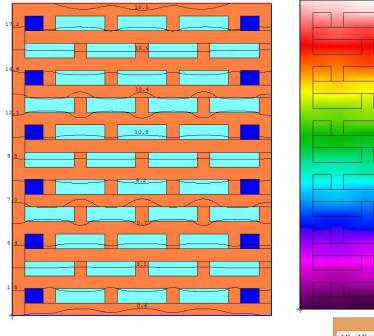


Ilustración A4. Líneas isotérmas

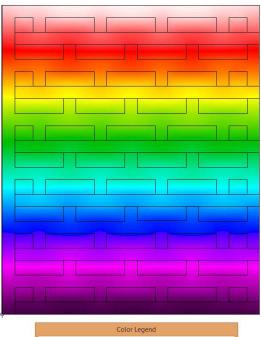


Ilustración A5. Distribución de temperaturas

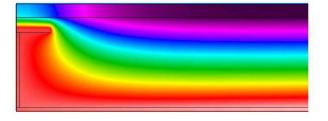
ANEXO B. SEGUNDA VALIDACIÓN: EN-ISO 10211:2007 (ANEXO A. VALIDACIÓN DE LOS MÉTODOS DE CÁLCULO)

El programa utilizado para el cálculo también queda validado aplicando el procedimiento descrito en la norma EN ISO 10211. A continuación, se adjunta la validación según este procedimiento realizado por Wouter Hilderson de Pixii.

EN 10211:2007 validation of Therm 7.4

Therm 7.4 validation according to EN ISO 10211:2007





Therm 7.4 validation according to NBN EN ISO 10211:2007

General considerations and requirements for validation of calculation methods according to NBN EN ISO 10211:2007

According to NBN EN ISO 10211:2007 - Annex A, the numerical method has to meet the following requirements to be considered a high precision calculation method:

- a) the method shall provide temperatures and heat flows
- b) the extent of subdivision of the object is not "method defined" but "user defined".

 Therefore, in the test reference cases, the method being validated shall be able to calculate temperatures and heat flows at locations other than those listed.
- For an increasing number of subdivisions, the solution of the method being validated shall converge to the analytical solution, if such a solution exists.
- d) the number of subdivisions shall be determined as follows: the sum of the absolute values of all the heat flows entering the object is calculated twice, for n nodes and for 2n nodes. The difference between these two results shall not exceed 1%. If not, further subdivisions shall be made until this criterion is met.
- e) If the system solution technique is iterative, the iteration shall continue until the sum of all heat flows (positive and negative) entering the object, divided by half the sum of the absolute values of all these heat flows, is less than 0,0001.

The subdivision of a model in Therm 7.4 is controlled by two parameters: by the "Quad Tree Mesh Parameter" which relates to the maximum size of the initial subdivision, and the "Maximum % Error Energy Norm" for iterative calculations that sets a threshold for the iteration to further divide non conforming elements.

The first parameter will relate to the maximum size, but does not allow for exact dimensioning of the subdivision. The larger the number entered, the smaller the elements of the initial subdivision will be. This parameter can be varied between 3 and 12, with standard setting of 6. The second parameter sets a threshold for the error estimator. For each node, this error estimator checks convergence of the result according to the "Maximum % Error Energy Norm". For those elements that do not yet conform, the grid is then refined and a new calculation is started.

Since the user has no exact control over the dimensions of the subdivision, the model has to be subdivided by the user when looking for temperatures and heat flows at specific locations.

NBN EN ISO 10211:2007 - Annex A provides two test cases for a two dimensional calculation method to be classified as a steady-state high precision method.

Case 1:

This case consists of a model of a half square column with known surface temperatures. Only these surface temperatures are given. The other variables are implied, or have to be chosen. The following variables are chosen:

- thermal conductivity λ = 0,10 W/mK
- geometry: BA = 200mm; BC = 400mm

As for the surface resistance, this has to be defined in Therm as part of the boundary condition in the form of a film coefficient. Therm limits the range of this film coefficient to between 0 and 99999. In order to approximate $Rs = 0 \text{ m}^2 \text{K/W}$, the highest possible film coefficient is used: 99999 W/m²K.

The analytical solution at 28 points of an equidistant grid is given. The difference between the temperatures calculated by the method being validated and the temperatures listed shall not exceed 0,1K.

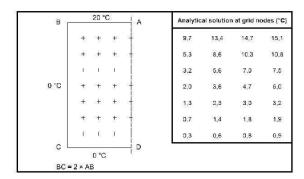


Figure 1: ISO 10211:2007 illustration of validation case 1

The model was drawn as a grid of elements, each 50mmx50mm, 4 elements wide and 8 elements high. This to ensure that Therm would calculate the temperatures at the corners of these elements.

The model is calculated using an iterative method. The default Quad Tree Mesh Parameter is set to 6 and the Maximum % Error Energy Norm is set to 10%. When calculating the model with these parameters, the resulting temperatures lie well within the tolerance of 0,1K.

To evaluate the requirements c to e, the Quad Tree Mesh Parameter is set to its standard value of 6. Requirement d specifies that with doubling number of nodes, the sum of the absolute terms of the heat flows should not differ more than 1%. Because Therm does not allow the user to exactly choose the number of nodes, an approximation is made using het Maximum % Error Energy Norm, as shown in figure 2.

In all cases, the temperature difference stays well below 0,1K.

Figure 3 shows the fulfillment of the requirements c to e. The calculated temperatures and heat flows converge, the difference as specified in d stays under 1%, and the requirement e for an iterative process stays well below the required 0,0001.

Quad 1	Free Mesh	Parameter		6		6		6		6		6	
Max.	% Error En	ergy Norm		9,7		6,34		5,89		5,54		5,4	
		#nodes		1080		1582		2809		2927		3252	
	#	felements		1048		1576		2909		3057		3432	
coördinat	e e	EN10211	Node	20		25		30		35		40	
x(mm)	y(mm)	T [°C]	nr	T[°C]	Δ τ [κ]	T[°C]	∆ T [K]	T[°C]	Δ Γ [K]	T[°C]	∆ T [K]	T[°C]	∆ T [K]
50	50	9,7	41,0	9,6600	0,0400	9,6479	0,0121	9,6591	0,0113	9,6596	0,0005	9,6590	0,0006
50			87,0	5,2429	0,0571		0,0030	5,2565	0,0106	5,2576	0,0011	5,2576	0,0000
50	150	3,2	149,0	3,1830	0,0170	3,1836	0,0006	3,1854	0,0018	3,1857	0,0002	3,1864	0,0008
50	200	2,0	217,0	2,0110	0,0110	2,0112	0,0002	2,0118	0,0005	2,0118	0,0000	2,0120	0,0003
50	250	1,3	285,0	1,2607	0,0393	1,2608	0,0001	1,2610	0,0002	1,2610	0,0000	1,2611	0,0001
50	300	0,7	353,0	0,7387	0,0387	0,7387	0,0000	0,7388	0,0001	0,7388	0,0000	0,7388	0,0001
50	350	0,3	421,0	0,3414	0,0414	0,3414	0,0000	0,3414	0,0000	0,3414	0,0000	0,3414	0,0000
100	50	13,4	83,0	13,3908	0,0092	13,3895	0,0013	13,3767	0,0128	13,3770	0,0003	13,3768	0,0002
100	100	8,6	145,0	8,6426	0,0426	8,6430	0,0004	8,6426	0,0004	8,6417	0,0009	8,6421	0,0004
100	150	5,6	213,0	5,6067	0,0067	5,6071	0,0005	5,6080	0,0008	5,6079	0,0001	5,6084	0,0004
100	200	3,6	281,0	3,6379	0,0379	3,6381	0,0003	3,6385	0,0004	3,6385	0,0000	3,6388	0,0003
100	250	2,3	349,0	2,3065	0,0065	2,3067	0,0001	2,3068	0,0002	2,3068	0,0000	2,3070	0,0001
100	300	1,4	417,0	1,3580	0,0420	1,3581	0,0001	1,3582	0,0001	1,3582	0,0000	1,3583	0,0001
100	350	0,6	479,0	0,6288	0,0288	0,6289	0,0000	0,6289	0,0000	0,6289	0,0000	0,6289	0,0000
150	50	14,7	141,0	14,7377	0,0377	14,7375	0,0002	14,7346	0,0029	14,7345	0,0001	14,7344	0,0002
150	100	10,3	209,0	10,3222	0,0221	10,3222	0,0000	10,3203	0,0019	10,3201	0,0002	10,3201	0,0000
150	150	7,0	277,0	7,0161	0,0161	7,0163	0,0002	7,0159	0,0004	7,0157	0,0002	7,0159	0,0002
150	200	4,7	345,0	4,6575	0,0425	4,6577	0,0002	4,6577	0,0000	4,6576	0,0001	4,6578	0,0002
150	250	3,0	413,0	2,9843	0,0157	2,9845	0,0001	2,9845	0,0001	2,9845	0,0000	2,9846	0,000
150	300	1,8	475,0	1,7655	0,0345	1,7656	0,0001	1,7656	0,0000	1,7656	0,0000	1,7657	0,000
150	350	0,8	521,0	0,8192	0,0192	0,8192	0,0000	0,8192	0,0000	0,8192	0,0000	0,8193	0,0000
200	50	15,1	205,0	15,0929	0,0071	15,0928	0,0001	15,0912	0,0016	15,0911	0,0001	15,0910	0,000
200	100	10,8	273,0	10,8180	0,0180	10,8180	0,0000	10,8165	0,0015	10,8163	0,0002	10,8163	0,0000
200	150	7,5	341,0	7,4685	0,0315	7,4687	0,0002	7,4680	0,0007	7,4678	0,0001	7,4680	0,000
200	200	5,0	409,0	5,0002	0,0002	5,0004	0,0002	5,0002	0,0002	5,0001	0,0001	5,0003	0,000
200	250	3,2	471,0	3,2173	0,0173	3,2175	0,0001	3,2175	0,0000	3,2174	0,0000	3,2175	0,000
200	300	1,9	517,0	1,9070	0,0070	1,9071	0,0001	1,9071	0,0000	1,9071	0,0000	1,9072	0,000
200	350	0,9	547,0	0,8855	0,0145	0,8856	0,0000	0,8856	0,0000	0,8856	0,0000	0,8856	0,0000
	Maxin	num ∆T (K)			0,0571		0,0121		0,0128		0,0011		0,0008
	m	ean AT [K]			0,0251		0,0007		0,0017		0,0002		0,0002

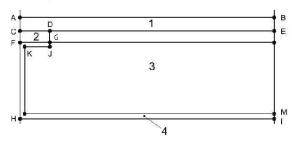
Figure 2: Calculation results for different Maximum % Error Energy Norm.

Quad Tree N	/lesh Parameter	6	6	6	6	6
Max. % Err	9,7	6,34	5,89	5,54	5,4	
	# nodes	1080	1582	2809	2927	3252
	#elements	1048	1576	2909	3057	3432
φ _{out} [W]		15,67750	15,63305	15,61369	15,61280	15,61130
φ _{in} [W]		15,67750	15,63307	15,61372	15,61280	15,61133
$ \phi_{out} + \phi_{in} $		31,355	31,26612	31,22741	31,22561	31,22263
difference acco	ording to d)		0,28%	0,12%	0,01%	0,01%
$(\phi_{out} + \phi_{in})/$	2	15,6775	15,63306	15,61371	15,6128	15,61131
φ _{in} - φ _{out}		3,82E-06	1,66E-05	3,40E-05	3,43E-06	2,91E-05
2(φ _{in} - φ _{out})/(α	$\phi_{\text{out}} + \phi_{\text{in}} $	2,44E-07	1,06E-06	2,18E-06	2,20E-07	1,86E-06

Figure 3: Calculation of the convergence and error of the calculation for varying Maximum % Error Energy Norm.

Case 2

For validation case 2, part of a wall construction is calculated. All dimensions and boundary conditions are specified.



Dimensions mm	Thermal conductivity W/(m·K)	Boundary conditions			
AB = 500	1: 1,15	AB: 0 °C with $R_{se} = 0.06 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$			
AC = 6	2: 0,12	HI: 20 °C with R _{si} = 0,11 m ² ·K/W			
CD = 15	3: 0,029				
CF = 5	4: 230				
EM = 40					
GJ = 1,5					
IM = 1,5					
FG KJ = 1.5					

Figure 4: ISO 10211:2007 illustration of validation case 2

This model is calculated, and the result has to fulfill following requirements:

- The calculated temperatures at certain points as specified in the validation case should not differ more than 0,1K from the given temperatures.
- The calculated heat flow should not differ more than 0,1 W/mK from the given heat flow.

Temperatures °C					
A: 7,1		B: 0,8			
C: 7.9	D: 6,3	E: 0,8			
F: 16,4	G: 16,3				
H: 16,8		1: 18,3			

Figure 5: ISO 10211:2007 illustration of the solution of validation case 2

The model is calculated iteratively, with a Quad Tree Mesh Parameter set to 6. The Maximum % Error Energy Norm is varied to approximate doubling the number of nodes, in order to evaluate the extra requirements c to e. Since all points where the temperature is to be calculated are present in the geometrical model, no extra points have to be drawn.

Therm outputs the calculated heat flow over the whole model as a unity of three parts: a U-factor [W/m²K], a length [m] and a temperature difference [K]. Multiplying these three results gives the heat flow [W/m].

Figure 6 shows the results of the calculations, which all lie well within the requested 0,1K difference in temperature and 0,1W/m difference in heat flow.

Figure 7 illustrates conformity with requirements c to e.

Quad Tree Mesh	Parameter		6		6		6		6		ε	
Max. % Error En	ergy Norm		7,78		4,28		2,6		1,52		0,9	
	# nodes		220		409		1018		3461		12531	
j.	felements		189		390		1031		3539		12774	
	EN10211	Node	17		22		27		32		37	
Point	T[°C]	nr	T [°C]	∆ T [K]	T [°C]	∆ T [K]	T[°C]	∆ T [K]	T[°C]	∆ T [K]	T [°C]	∆ T [K]
A	7,1	208	7,12	-0,02	7,08	0,02	7,07	0,03	7,06	0,04	7,06	0,05
C	7,9	219	7,93	-0.03	7,91	-0,01	7,90	0,00	7,90	0,00	7,90	0,03
F	16,4	207	16,40	0,00	16,41	-0,01	16,41	-0,01	16,41	-0,01	16,41	-0,01
Н	16,8	157	16,75	0,05	16,76	0,04	16,77	0,03	16,77	0,03	16,77	-0,02
D	6,3	201	6,29	0,01	6,28	0,02	6,28	0,02	6,28	0,02	6,27	0,02
G	16,3	188	16,32	-0,02	16,33	-0,03	16,33	-0,03	16,33	-0,03	16,33	-0,01
B E	0,8	17	0,76	0,04	0,76	0,04	0,76	0,04	0,76	0,04	0,76	0,00
E	0,8	11	0,83	-0,03	0,83	-0,03	0,83	-0,03	0,83	-0,03	0,83	0,00
ı	18,3	1	18,33	-0,03	18,33	-0,03	18,33	-0,03	18,33	-0,03	18,33	0,00
Maxin	num ΔT (K)			0,05	n: G	0,04		0,04		0,04		0,04
m	ean ΔT [K]			0,02		0,02		0,03		0,03		0,03
	EN10211											
Heat flow	W/m		Φ (W/m)	ΔΦ [W/m]	Φ [W/m]	ΔΦ [W/m]	Φ [W/m]	ΔΦ [W/m]	Φ[W/m]	ΔΦ [W/m]	Φ [W/m]	ΔΦ [W/m]
	9,5		9,538	-0,038	9,506	-0,006	9,497	0,003	9,493	0,007	9,492	0,008

Figure 6: temperatures and heat flow of the model calculated with different Maximum % Error Energy Norm.

Quad Tree I	6	6	6	6	6	
Max. % Er	ror Energy Norm	7,78	4,28	2,6	1,52	0,90
	# nodes	220	409	1018	3461	12531
	# elements	189	390	1031	3539	12774
φ _{out} [W]		9,53787	9,50614	9,49703	9,49329	9,49210
φ _{in} [W]		9,53790	9,50610	9,49698	9,49329	9,49211
$ \phi_{out} + \phi_{in} $		19,07576	19,01224	18,99401	18,98659	18,98420
difference acc	ording to d)	*	0,33%	0,10%	0,04%	0,01%
$(\phi_{out} + \phi_{in})$	/2	9,537882	9,506119	9,497004	9,493292	9,492102
φ _{in} - φ _{out}		2,80E-05	3,60E-05	4,60E-05	5,00E-06	8,80E-06
2(φ _{in} - φ _{out})/(-	$\phi_{\text{out}} + \phi_{\text{in}} $	2,94E-06	3,79E-06	4,84E-06	5,27E-07	9,27E-07

Figure 7: Calculation of the convergence and error of the calculation for varying Maximum % Error Energy Norm.

Conclusion

Therm 7.4 complies with all requirements of the ISO 10211:2007 Annex A to be considered a two dimensional high precision calculation method.

For a 'Quad Tree Mesh Parameter' set to 6 and a 'Maximum % Error Energy Norm' set to 10% under Options/Preferences/Therm file options (these are the standard settings) the calculation lies within the required precision, fot higher Quad Tree Mesh Parameters values and lower Maximum % Error Energy Norm values, the result will further converge to the 'optimal solution'.

Berchem, May 2016

Wouter Hilderson