# FACTORES QUE DETERMINAN LA SENSACIÓN TÉRMICA DE LAS BALDOSAS CERÁMICAS

V. Sanz<sup>1</sup>, E. Sanchez<sup>1</sup>, K. Kayaci<sup>2</sup>, U. Taskiran<sup>2</sup>, B. Yazirli<sup>2</sup>, Ş.C., Genç<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Instituto Universitario de Tecnología Cerámica (IUTC), Universitat Jaume I (UJI), Castellón, España
<sup>2</sup> Kaleseramik Canakkale Kalebodur, Çan, Turquía

<sup>3</sup> Istanbul Technical University, Facultad de Minas, 34469 Estambul, Turquía

#### RESUMEN

El uso de suelos con una sensación térmica cálida aumenta el confort y contribuye al ahorro energético. Los materiales cerámicos tienen una sensación más fría que otros materiales, lo que supone una desventaja en algunos mercados.

La sensación térmica depende tanto de aspectos fisiológicos como físicos, por lo que es necesario tener en cuenta ambos para su optimización.

Por un lado, la sensación térmica depende de la posición y sensibilidad de los termorreceptores situados en la piel humana. Estos receptores no son sensores de temperatura precisos; sin embargo, son muy sensibles a los cambios de temperatura y a la comparación de señales entre ellos. La sensibilidad térmica de la piel depende de la parte del cuerpo, la edad, el sexo, la raza, los hábitos, etc., aunque la sensación de frío puede parametrizarse considerando los sensores a una profundidad de 0,5-1 mm y un umbral de excitación de 20 °C.

Por otra parte, cuando dos materiales se ponen en contacto, se produce un flujo de calor no estacionario a través de la interfaz desde el más caliente al más frío. Este flujo depende de la inercia térmica de ambos materiales y, más concretamente, de sus efusividades. La efusividad ( $\epsilon$ ) de un material, que depende de su conductividad térmica (k), su densidad ( $\rho$ ) y su calor específico (c), determina la temperatura de la interfaz.

En un contacto real de dos objetos, también debe tenerse en cuenta la resistencia térmica de contacto y, en consecuencia, una efusividad efectiva.

En el presente trabajo, se ha comprobado el efecto de la rugosidad de la superficie sobre la efusividad efectiva. La rugosidad de la superficie de las baldosas genera una capa de aire que limita la transferencia de calor y reduce significativamente la efusividad. Se ha comprobado que cuanto mayor es la rugosidad, mayor es la reducción de la efusividad efectiva.

## **1. INTRODUCCIÓN**

Las baldosas cerámicas tienen una resistencia mecánica y química excepcional y pueden decorarse fácilmente, lo que las convierte en la mejor opción para muchas aplicaciones. Sin embargo, sus propiedades térmicas, relacionadas con el confort o la eficiencia energética, no pueden compararse con las de otros materiales de naturaleza orgánica.

La sensación térmica que se produce al tocar un objeto con la piel es una percepción compleja que depende de la información combinada que envían al cerebro los termorreceptores situados en la dermis [1]. Estos termorreceptores son los corpúsculos de Krauss, las terminaciones de Ruffini y las terminaciones nerviosas libres. Los corpúsculos de Krauss son los principales responsables de la sensación de frío, aunque su sensibilidad por encima de los 20 °C es baja. El grosor de la piel varía significativamente de una parte del cuerpo a otra y con numerosos factores fisiológicos (sexo, raza, edad, ...). Los corpúsculos de Krauss están situados inmediatamente debajo de la epidermis, por lo que su distancia aproximada a la superficie puede considerarse de 0,5-1 mm.

Cuando la piel está en contacto con un objeto (baldosa cerámica), el calor (q") se transfiere a través de la interfaz por conducción (Figura 1).



*Figura 1*. Esquema del proceso de transferencia de calor entre la planta del pie y la baldosa.

Suponiendo que los dos materiales tienen dimensiones semi-infinitas [2], las ecuaciones que gobiernan el proceso son:

Piel: 
$$\frac{d^2 T_s}{dx_s^2} = \frac{1}{\alpha_s} \cdot \frac{dT_s}{dt}$$
 donde:  $T_s = T_{si}$  @  $t = 0$ ;  $T_s = T_{si}$  @  $x_s = \infty$  (ec.1.a)  
Objeto:  $\frac{d^2 T_o}{dx_o^2} = \frac{1}{\alpha_o} \cdot \frac{dT_o}{dt}$  donde:  $T_o = T_{oi}$  @  $t = 0$ ;  $T_o = T_{oi}$  @  $x_o = \infty$  (ec.1.b)

Donde se incluye la efusividad térmica ( $\alpha$ ) y los subíndices hacen referencia a la piel (s), al objeto (o) y a las condiciones iniciales (i).

Según las condiciones de contorno del sistema, en la interfaz piel-objeto el flujo de calor (q") debe ser constante. Puede calcularse a partir del cociente entre la diferencia de temperatura de las dos superficies ( $T_{ss}$ - $T_{os}$ ) y la resistencia al flujo de calor (R).

La temperatura de la superficie de la piel puede calcularse mediante la integración de las ecuaciones anteriores, lo que da como resultado la siguiente ecuación exponencial:

$$T_{ss}(t) = \frac{A}{B} \cdot \{1 - \exp(\alpha_s B^2 t) \cdot erfc[B \cdot (\alpha_s t)^{0,5}]\} \text{ (ec.2)}$$
  
siendo:  $A = -\frac{-(T_{si} - T_{oi})}{k_s R}$  y  $B = \frac{1}{k_s R} \left[1 + \frac{(k_s \rho_s c_s)^{0,5}}{(k_o \rho_o c_o)^{0,5}}\right] = \frac{1}{k_s R} \left[1 + \frac{(\epsilon_s)^{0,5}}{(\epsilon_o)^{0,5}}\right]$ 

Donde se utilizan las propiedades de los dos materiales: conductividad térmica (k), densidad ( $\rho$ ) y calor específico (c), y su efusividad ( $\epsilon$ ).

El perfil de temperatura dentro de la piel y del objeto (baldosa cerámica) también puede calcularse a partir de las ecuaciones integradas desarrolladas por Congyan [3].

La efusividad indica la capacidad de un material para intercambiar energía térmica con su entorno. No es estrictamente una propiedad del material, sino que aparece como parámetro en la integración de las ecuaciones del calor cuando se ponen en contacto dos sustancias. Físicamente, determina la temperatura de la interfaz entre los dos materiales cuando no hay resistencia de contacto:

$$T = \frac{\epsilon_s T_s + \epsilon_o T_o}{\epsilon_s + \epsilon_o} \text{ (ec.3)}$$

Según esta ecuación, la temperatura en la interfaz estará más próxima a la del material con mayor efusividad, por lo que para mejorar la sensación térmica es deseable que la baldosa tenga la menor efusividad posible.

La Tabla 1 muestra las principales propiedades térmicas de los materiales más comunes [4]. Los materiales cerámicos tienen una efusividad muy inferior a la de los metales, pero superior a la de la madera y otros compuestos orgánicos. También se incluyen las propiedades térmicas de la piel y de una baldosa cerámica tipo con la que se han realizado los cálculos térmicos.

	Conductividad térmica (W/m·K)	Difusividad térmica (mm²/s)	Capacidad calorífica específica (J/kg·K)	Efusividad térmica (W·s <sup>0,5</sup> /m²·K)
Aire	0,025	19,4	1004	6
Agua	0,607	0,145	4181	231
Madera noble	0,16	0,18	1255	380
Vidrio	1,046	0,54	837	1419
Porcelana	2,092	0,82	753	2314
Hierro	72	20,4	448	15924
Piel	0,34	0,085	3340	1167
Baldosa cerámica	1,046	0,48	837	1509

Tabla 1. Propiedades térmicas

La efusividad del aire es muy baja, por lo que la modificación de esta propiedad en cualquier material se basa en la incorporación de aire. El aire puede localizarse en el interior del material, dando lugar a materiales porosos, o en la superficie, dando lugar a materiales rugosos.

La presencia de poros en los esmaltes cerámicos es problemática [5], ya que afecta a las propiedades mecánicas y al aspecto. Algunos investigadores han conseguido buenos resultados generándolos a alta temperatura [6] y anclando las burbujas para evitar que lleguen a la superficie; sin embargo, su robustez en condiciones de cocción industrial no es lo suficientemente alta, ya que reduce la calidad global del producto.

La fabricación de materiales rugosos con efusividad reducida no se ha estudiado en la bibliografía. Sin embargo, existen referencias sobre cómo afecta la rugosidad a la transferencia de calor debido a su influencia en la resistencia de contacto. Chen [3] encontró una relación directa entre la resistencia de contacto (R) y la rugosidad media cuadrática. Zhang et al [7] también mostraron experimentalmente la influencia de la rugosidad aritmética media en la resistencia de contacto, aunque no desarrollaron un modelo empírico para su estimación.

El objetivo de este trabajo es mostrar la influencia de la topografía superficial de las baldosas cerámicas en su efusividad aparente y, como consecuencia, en la sensación térmica transmitida al tocarlas.

#### **2. EXPERIMENTAL**

#### **2.1. MATERIALES**

Se ha seleccionado un conjunto de 14 baldosas cerámicas industriales con una gama muy amplia de características. Se han utilizado soportes de gres porcelánico y de azulejo, así como esmaltes brillantes, mates, cristalinos y opacos. De este conjunto de muestras, las más relevantes, por el nivel de rugosidad y el procedimiento utilizado para su obtención, son las siguientes:

- Relieve de prensa (Muestra 4)
- Relieve de la línea de esmaltado (hidrofobización) (Muestra 6)
- Esmalte mate (Muestra 3)
- Esmalte pulido (Muestra 5)

### **2.2. TÉCNICAS**

La topografía superficial de las muestras se midió mediante un microscopio confocal Olympus, utilizando un objetivo 5x. Para obtener una superficie de estudio representativa de la rugosidad superficial, se amplió el área de análisis mediante la técnica de "mosaico", lo que permitió estudiar áreas relativamente grandes. Todos los parámetros de rugosidad utilizados se calcularon a partir de los datos del área utilizando las fórmulas habituales.

En la Figura 2 se muestran las topografías de las cuatro muestras más relevantes. El código de colores, representativo de la altura, se ha adaptado a la topografía de cada muestra.



**Figura 2.** Topografías de las muestras 4 (arriba-izquierda, relieve de prensa,  $\pm 500\mu$ m), 6 (arriba-derecha, relieve de la línea de esmaltado,  $\pm 100\mu$ m), 3 (abajo-izquierda, esmalte mate,  $\pm 50\mu$ m) y 5 (abajo-derecha, esmalte pulido,  $\pm 10\mu$ m).

El espesor medio de la capa de aire retenida entre la baldosa y el objeto en contacto con su superficie se ha calculado a partir de la curva de material (figura 3). Esta curva indica la fracción volumétrica de material entre el pico más alto y el valle más profundo. La eliminación de las fracciones volumétricas correspondientes a los picos y los valles permite analizar el volumen principal en el que se desarrolla la mayor parte de la rugosidad.

A partir de la curva de material pueden obtenerse distintos parámetros, aunque se ha comprobado que el más útil es el Volumen vacío del núcleo ( $V_{vc}$ ), ya que refleja el espesor medio de aire en la superficie retenido como consecuencia de la rugosidad.



*Figure 3.* Cálculo de la curva de material a partir de los datos topográficos (izquierda). Cálculo del Volumen vacío del núcleo (Vvc) a partir de la curva de material (derecha).

La medición de la efusividad térmica se ha realizado mediante el Método de la Fuente Plana Transitoria Modificada (MTPS) (ASTM D7984-16) [8][9]. Se trata de una mejora del Método de la Fuente Plana Transitoria que sólo requiere una interfaz de un solo lado con la muestra durante la medición de las propiedades térmicas. En este método, se genera un flujo de calor conocido mediante una resistencia y se mide la evolución de la temperatura del material. En otras palabras, al utilizar la condición de contorno (q" conocido), se elimina la ecuación de uno de los dos materiales.

Existen varios dispositivos en el mercado que utilizan esta técnica [10][11]. En el presente trabajo se ha utilizado el C-Therm con la célula de medida ESP. El rango máximo de medida de efusividad de este dispositivo es de 5-40000  $W \cdot s^{0.5}/m^2 \cdot K$ .

Las mediciones de la efusividad térmica del material se han realizado utilizando agua como material de contacto entre la baldosa y la membrana del sensor, por lo que se puede suponer que la resistencia térmica de contacto es despreciable.

Las mediciones de la efusividad aparente o efectiva se realizaron sin utilizar ningún material de contacto, por lo que el material de la interfaz era aire.

El efecto de la topografía sobre la efusividad se ha evaluado a partir de la diferencia y el cambio relativo entre la efusividad del material y la efusividad aparente.

#### **3. RESULTADOS**

La temperatura de la interfaz piel-baldosa puede calcularse mediante la ecuación 3, válida para cualquier momento, siempre que la resistencia térmica de contacto sea nula. Teniendo en cuenta los datos de efusividad de la piel y de una baldosa cerámica tipo (tabla 1), que la temperatura de la planta del pie humano es de unos 30 °C y suponiendo que la baldosa cerámica está inicialmente a unos 10 °C, la temperatura de ambas superficies sería de 18,7 °C. Este resultado no refleja el comportamiento real del sistema, ya que no tiene en cuenta la resistencia térmica de contacto, que siempre está presente, ni la ubicación de los termorreceptores de frío, situados a una profundidad de 0,5-1mm y con un umbral de sensibilidad aproximado de 20 °C.

Cuando se tiene en cuenta la resistencia térmica de contacto en la interfaz y se calcula el perfil de temperatura en el interior de la piel, el resultado cambia considerablemente (Figura 4).

Por un lado, las temperaturas de las dos superficies, correspondientes a la piel y la baldosa, dependen del tiempo y ya no son iguales. Esta diferencia de temperatura será mayor cuanto mayor sea la resistencia térmica de contacto. Por otra parte, la temperatura en las capas interiores de la piel (0,5-1mm), donde se encuentran los sensores, es más elevada que en la superficie debido al retraso de la respuesta térmica del sistema. Este retraso es tanto mayor cuanto mayor es la resistencia de contacto, debido a su influencia en el flujo de calor.



**Figura 4.** Simulación del comportamiento térmico de la baldosa y de la piel. Unidades de R, m<sup>2</sup>K/W.

Por lo tanto, el estudio del comportamiento térmico del sistema requiere la consideración de la resistencia térmica de contacto. Sin embargo, este parámetro no es fácil de medir directamente, ya que requeriría de un complicado dispositivo experimental [2], por lo que en este trabajo lo hemos medido indirectamente.

Aunque siempre existe una resistencia de contacto, se ha considerado que la efusividad obtenida utilizando agua en la interfase es representativa del material, independientemente de su topografía superficial. Esta sería la circunstancia que podría darse en un baño con los pies mojados. Los valores obtenidos para el conjunto de muestras varían entre 1280 y 1766 W·s<sup>0,5</sup>/m<sup>2</sup>·K (figura 5. izquierda), en concordancia con los datos existentes en la bibliografía para materiales cerámicos. Cabe destacar el comportamiento de las muestras 1-3, que corresponden a revestimientos porosos, donde la porosidad del soporte ha reducido la efusividad experimental. Si se calcula la temperatura de interfase en estas condiciones (ecuación 3), se obtienen siempre temperaturas inferiores a 20 °C, lo que activaría los corpúsculos de Krauss y provocaría la sensación de frío (figura 5. derecha).



Cuando se miden las efusividades efectivas, sin material de contacto, siempre se obtienen efusividades aparentes más bajas. Esta diferencia se debe a la influencia de la resistencia de contacto en la medición de la efusividad efectiva. Este sería el caso cuando se camina descalzo sobre una superficie seca. Es posible estimar la temperatura efectiva de la superficie utilizando la efusividad efectiva en la ecuación 3, ya que ésta incluye implícitamente el efecto de la resistencia de contacto (Figura 5.b). Como es lógico, la temperatura de contacto aumenta y en algunos casos supera los 20 °C, por lo que la posible sensación de frío sería moderada.



*Figura 5*. Efusividad real y efusividad efectiva del conjunto de muestras utilizado (izquierda). Temperaturas de contacto (derecha).

Aunque la resistencia térmica de contacto influye en la efusividad aparente, no existen estudios que las relacionen, por lo que se desconoce qué tipo de dependencia existe. Utilizando la efusividad del material y la temperatura media de la interfaz que se obtendría con la efusividad aparente, se ha calculado la resistencia teórica necesaria para obtener el mismo comportamiento. Los cálculos se han realizado con las ecuaciones integradas desarrolladas por Chen [3].

Las resistencias térmicas de contacto obtenidas por este procedimiento indirecto son de 0,0006-0,046 m<sup>2</sup>K/W, en línea con los valores obtenidos por otros investigadores utilizando métodos directos (Figura 6). Las resistencias obtenidas son mayores cuanto mayor es el cambio relativo de efusividad, variando según una ecuación potencial. Para valores intermedios la correlación es aceptable; sin embargo, los valores extremos se desvían de esta tendencia. En consecuencia, es factible estimar la resistencia térmica de contacto a partir de las efusividades obtenidas con y sin agente de contacto.



**Figura 6.** Correlación entre la resistencia térmica de contacto y la variación de la efusividad relativa ( $R=0,0178 \cdot \Delta \varepsilon_r^{1,27}$ ,  $r^2=0,8$ )

Mantenidas constantes las demás condiciones, la resistencia térmica de contacto suele relacionarse con la rugosidad media mediante una ecuación lineal con pendiente positiva, de modo que cuanto mayor es la rugosidad, mayor es la resistencia. En el conjunto de muestras estudiadas, se ha verificado la tendencia indicada, aunque debido al amplio rango de rugosidades utilizado, la correlación es baja. El cálculo de la rugosidad media no distingue entre superficies con muchos o pocos huecos, por lo que sólo puede utilizarse cuando la morfología de los picos/valles es la misma. En el conjunto de muestras estudiadas, las morfologías superficiales han sido muy diferentes por lo que este parámetro podría no funcionar.

Se ha comprobado que, en todo el rango estudiado, el parámetro que mejor se relaciona con el cambio relativo de efusividad es el espesor medio de aire retenido en la superficie (Figura 7). Este espesor se calcula a partir de las curvas de material obtenidas de la topografía de las muestras. Esta correlación es válida para superficies muy lisas, como esmaltes pulidos ( $\pm 10\mu$ m) o mates ( $\pm 50\mu$ m), así como para relieves de la línea de esmaltado ( $\pm 100\mu$ m) o relieves de prensa ( $\pm 500\mu$ m).

El aire tiene una efusividad muy baja, por lo que cuanto mayor sea la capa de aire retenida, menor será la efusividad. Las primeras capas de aire tienen un efecto relativo muy importante (20%), pudiendo alcanzar, con rugosidades muy pronunciadas, reducciones del 40% y del 90%.

El cálculo de los valores medios de las propiedades térmicas en esta capa superficial es muy dependiente de la microestructura formada por el material y el aire (capas paralelas, pilares, ...), por lo que su estimación no se ha considerado relevante desde un enfoque práctico.



**Figura 7.** Influencia del espesor medio del aire atrapado en la variación relativa de la efusividad ( $\Delta \varepsilon_r = 0,0947 \cdot V_{vc}^{0,419}, r^2 = 0,92$ )

#### **4. CONCLUSIONES**

La sensación térmica que sentimos al pisar una baldosa cerámica depende principalmente de su efusividad.

La efusividad de los materiales cerámicos varía dentro de unos estrechos límites, por lo que la principal forma de reducir su valor es incorporar aire al sistema. Se ha comprobado que la retención de aire en la superficie de baldosas secas es un mecanismo muy eficaz para reducir la efusividad efectiva de las baldosas cerámicas debido a su efecto directo sobre la resistencia térmica de contacto.

Aunque existen técnicas para desarrollar diferentes niveles de rugosidad (cristalizaciones, repelencia o prensado) su optimización requiere la consideración simultánea de otras propiedades, como la resistencia al deslizamiento, el desgaste o la facilidad de limpieza en el uso previsto.



# 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Reiriz, J., TEJIDOS. MEMBRANAS. PIEL. DERIVADOS DE LA PIEL, https://www.infermeravirtual.com/files/media/file/95/Tejidos%2C%20membranas%2C%20piel%20y%20de rivados.pdf?1358605323
- [2] Guo Hua Zhang, Jun Jie Bai; Research on Thermal Tactile Perception of Human Fingertips Using Temperature Control Device, Advanced Materials Research, 2012, Vols. 591-593, pp 1753-1757.
- [3] Congyan, Chen; Schichen, Ding; How the Skin thickness and Thermal Contact Resistance influence Thermal Tactile Perception. Micromachines, 2019, 10 (2):87.
- [4] [4] <u>https://thermtest.com/thermal-resources/materials-database</u>
- [5] Escardino, A., et al., Porosidad superficial de vidriados pulidos: influencia de algunas variables. Qualicer 2002.
- [6] Jovani, M., García, J., Vidriado cerámico con sensación de calidez similar a la madera. ES2843267B2.
- [7] Ping Zhang; Tengfei Cui, Qiang Li; Effect of Surface roughness on thermal contact resistance of aluminium alloy; Applied Thermal Engineering 121 (2017) 992-998.
- [8] Gilabert, J., et al, Determinación de la conductividad térmica en la industria cerámica por el método modificado de la fuente plana transitoria. Técnicas de laboratorio (2014), 397, 728-731.
- [9] Emanuel, M., Effusivity Sensor Package (ESP) System for Process Monitoring and Control.
- [10] C-Therm Technologies Ltd., How to Measure Thermal Conductivity. Method Selection Guide, www.TridentThermalConductivity.com
- [11] Thermtest Inc., TPS-EFFusivity Meter, www.thermtest.com