

CAPÍTULO VI

EFFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DEL NUTRIENTE TECNOLÓGICO EN LA CAPACIDAD DE AISLAMIENTO TÉRMICO DEL MATERIAL

Acorde con la metodología establecida para medir la conductividad térmica, flujo (lineal transitorio de calor), se procedió a realizar las medidas para los cerámicos elaborados con los materiales MA100 y MA90 a diferentes temperaturas de cocción. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 36.

Tabla 36. Variación de la conductividad térmica de MA100 and MA90 con incremento de temperatura

Temperatura (°C)	Conductividad térmica (W/m.K)		
	MA100	CT90	CAb (5%)
900	0,336±0,02	0,376±0,01	0,277±0,01
1.000	0,407±0,02	0,488±0,03	0,375±0,01
1.100	0,691±0,01	0,548±0,01	0,462±0,01
1.150	0,777±0,02	0,594±0,03	0,473±0,01

De la tabla 36 es posible observar cómo la conductividad térmica del cerámico varía en función de la temperatura de cocción. Se evidencia que, a pesar de que el valor de esta variable se incrementa en los dos materiales, la velocidad de cambio es más marcada para el material MA100 después de sobrepasar los 1.000 °C. Por debajo de este valor de temperatura se evidencia que la conductividad térmica es más baja para el material elaborado con solo material arcilloso (MA100), es decir que el uso del 10% de ceniza volante como material sustituto no trae

ningún beneficio si lo que se busca es obtener un cerámico de construcción para cerramiento (que se fabrique por debajo de los 1.000 °C) que reduzca el flujo de calor.

Ahora, en temperaturas de cocción arriba de 1.100 °C el panorama es distinto, pues se logra una reducción de hasta el 23,5% en 1.150 °C con respecto al material de referencia. Sin embargo, es importante recordar que los valores de las demás propiedades tecnológicas de MA90 se ven desmejoradas respecto a MA100. Aun así, cumplen con los parámetros propuestos en la tabla 34 para uso como revestimiento y pisos de uso residencial y comercial. En cualquier caso, debe considerarse que esta mejora, aunque no sea de una magnitud elevada, es un elemento positivo más que añadir a las ventajas que supone el uso de las cenizas volantes como sustitutivo parcial de la arcilla cocida en la fabricación de cerámicos.

Estos cambios evidenciados sobre la conductividad térmica podrían estar asociados a muchos aspectos. A bajas temperaturas, podría tener relación con el grado de compactación del material y la microestructura presente en el cerámico. Sobre el efecto de la compactación, esta proposición se plantea debido al menor tamaño de grano de la ceniza volante, la cual podría favorecer el proceso de compactación acorde con los modelos propuestos en la literatura (empaquetamiento de granos, deformación plástica/elástica, entre otros) (Naciones Unidas, 1998). En cuanto a la microestructura en la literatura (ISO 14025:2006; Tiles & Bricks Europe, 2014; NTC 6033; EN 15804:2012), se ha evidenciado que algunas fases tanto cristalinas como amorfas pueden aumentar o reducir la conductividad térmica del material. Este caso resalta la presencia de mullita, cuarzo, fase amorfa de la ceniza y la misma materia orgánica residual presente en la ceniza y en el análisis de calorimetría diferencial de barrido presentado. Arriba de los 1.100 °C este cambio posiblemente esté muy asociado a las diferencias en la porosidad debido a la recristalización y a la oxidación de la materia orgánica residual, tal como se evidencia en los resultados de absorción de agua presentados en la tabla 30.

Como un aspecto complementario, se ha querido mostrar los resultados de conductividad térmica obtenidos para el cerámico elaborado con el material CC5, que fue el cerámico que mostró junto a MA90 los mejores comportamientos en cuanto a las propiedades tecnológicas del cerámico se refiere. Los valores se presentan en la tabla 37.

Tabla 37. Variación de la conductividad térmica (en probetas cilíndricas) de los cerámicos elaborados con el material CC5 al incrementar la temperatura de cocción

Temperatura (°C)	Conductividad térmica (W/m.K)
	CC5
900	0,257±0,01
1.000	0,325±0,02
1.100	0,347±0,01
1.150	0,360±0,01

De la tabla 37 se puede evidenciar que en el caso de la pasta CC5 (presencia de cisco de café) los valores de conductividad son más bajos que los obtenidos con el material de referencia (MA100), llegando a alcanzar una reducción de la conductividad térmica de hasta el 54% en 1.150°C.

La reducción de la conductividad térmica de los cerámicos obtenidos (MA90 y CC5) puede llegar a ser un aspecto de gran interés para el sector de la construcción en la zona de influencia de las empresas ladrilleras de la región. La zona metropolitana de Cúcuta se caracteriza por ser un territorio con un ambiente cálido donde la temperatura promedio está en torno a los 27 °C, pero con valores máximos durante el día que superan los 33 °C como producto de las características propias de la zona y de la cantidad de brillo solar de esta, la cual es de 185 horas por mes, es decir, cerca de seis horas al día. Los datos estadísticos no muestran muchas variaciones durante el año (Amell *et al.*, 2016).

Bajo estas condiciones, la población que habita en esta región se ve inmersa en un ambiente caluroso dentro de sus hogares y centros de trabajo, lo que obliga a que exista la necesidad del uso de sistemas de refrigeración y ventilación mecánica a fin de disminuir la sensación de calor. Bajo este panorama, el desarrollo de materiales de construcción para cerramientos o revestimientos exteriores que posean una baja conductividad térmica permitirá que el proceso de conducción de calor (de las paredes expuestas al sol) hacia el interior de las construcciones sea menos eficiente, logrando así disminuir la temperatura en el interior de los recintos. De igual manera los sistemas de refrigeración podrán llegar a ser más eficientes bajo el mismo principio.

24. Simulación del comportamiento de un bloque hueco de arcilla con adición de cascarilla de arroz, cenizas volantes y cisco de café

Se realizó la validación del programa de simulación (ANSYS16®). Los datos de conductividad térmica suministrados para los materiales de fabricación del bloque son:

- $k_{\text{Arcilla}} = 0,691 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$.
- $k_{\text{Cenizas volantes}} = 0,548 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$.
- $k_{\text{Cascarilla de arroz}} = 0,462 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$.
- $k_{\text{Cisco de café}} = 0,347 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$.

Los datos de las condiciones del entorno de Cúcuta se toman del IDEAM para el mes de septiembre, y son:

- Temperatura máxima promedio = $33 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Radiación solar máxima promedio = $796,80 \text{ W.h/m}^2$.
- $\Delta t = 12:00 \text{ horas a } 13:00 \text{ horas} = 1 \text{ hora}$.
- $Q_{\text{Solar}} = 796,8 \text{ W/m}^2$.
- Velocidad promedio del viento = 4 m/s .

24.1 Datos calculados

El coeficiente de transferencia de calor por convección es el valor que depende de la velocidad del viento y las condiciones de temperatura y presión en las que se encuentra.

$$h = \frac{\text{Nu} \cdot k}{L_c} \quad (1)$$

Donde:

h : Coeficiente de transferencia de calor por convección.

Nu : Número de Nusselt.

k : Conductividad térmica del aire.

L_c : Longitud característica asumida de 20 cm .

El número de Nusselt es un valor adimensional que describe el aumento en la transferencia de calor sobre una superficie. Para la sección transversal rectangular y flujo cruzado, es:

$$Nu: 0,102Re^{0,675}Pr^{1/3} \quad (2)$$

Donde:

Re: Número de Reynolds.

Pr: Número de Prandtl.

El número de Reynolds es un valor adimensional que describe el comportamiento del flujo de aire sobre la superficie del bloque.

$$Re = \frac{\rho * V * L_c}{\mu} \quad (3)$$

Donde:

ρ : Densidad del aire.

V: Velocidad del viento.

μ : Viscosidad dinámica del aire.

Las propiedades del aire a temperatura de 33 °C se toman de la tabla A-15 la cual se encuentra en el libro de transferencia de calor y masa) (Cengel, 2007):

ρ : 1,1526 kg/m³.

V: 0,026102 W/m²°C.

μ : 0,000018858 kg/m.s.

Pr: 0,72736.

Reemplazando los valores en orden de las ecuaciones (3), (2) y (1), se obtiene como resultado un coeficiente de transferencia de calor por convección de $h = 17,5154 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, que se aplicará a la sección exterior de la geometría, donde tiene efecto la velocidad del viento.

Para las superficies que no están encerradas, como cámaras de aire internas, se asume un coeficiente de transferencia de calor por convección natural de $h = 5 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, teniendo en cuenta los valores de la tabla A-15.

24.2 Procedimiento

- Diseño asistido por computador (CAD)

Con el software SOLIDWORKS 2017 se ajusta el CAD del bloque H10 y se guarda en extensión parasolid, para posteriormente importar en ANSYS R16.

- Ingeniería asistida por computador (CAE)

Se utiliza el método de los elementos finitos (FEM) para realizar la simulación del bloque con el software ANSYS R16.

- *Project Schematic*

Cada simulación se solventa en siete pasos:

1. *Analysis System Type*: Se realiza el esquema del proyecto conformado por *Analysis System* del tipo *Steady State Thermal*, donde se trabaja una sola geometría, que posteriormente se relaciona a los análisis donde la variable es el material de fabricación y, por lo tanto, su conductividad térmica:
 - a) Bloque H10.
 - b) Arcilla.
 - c) Cenizas volantes.
 - d) Cascarilla de arroz.
 - e) Cisco de café.
2. *2Engineering Data*: Se introducen las propiedades de los materiales en la base de datos de ANSYS R16 utilizando el *Engineering Data Source*.
3. *Geometry*: Se realiza la importación del CAD del bloque en el *Design Modeler* y se optimiza la geometría al realizar limpieza de la superficie con corrección de caras y bordes.
4. *Model*: A partir de este paso se trabaja en la interfaz *Mechanical* de ANSYS R16. Inicialmente se realiza la asignación de material. El siguiente paso es realizar el mallado de las pizas. Se configura la malla para que utilice el tipo de preferencia física CFD y el solucionador *Fluent*.
5. *Setup*: Las condiciones a las que está sometido el bloque H10. En la cara frontal se aplica la condición exterior de viento y radiación solar, y en la cara trasera se aplica la condición interior de convección natural:
 - A: Convección ($5 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$).
 - B: Convección ($17,5154 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$).
 - C: Flujo de calor ($796,8 \text{ W/m}^2$).

6. *Solution:* Para el análisis de los bloques se aplican las dos soluciones más relevantes:
- » Distribución de temperatura.
 - » Flujo total de calor.
7. *Results.*

24.3 Resultados

Los resultados para comparar los diferentes materiales de fabricación del bloque H10 se observan en la tabla 38, según los resultados de la distribución de temperatura obtenida en las simulaciones. Para la tasa de transferencia de calor por conducción a través de los puentes térmicos se usa la ecuación:

$$Q_{\text{conducción}} = k_{\text{material}} \cdot A_{\text{transversal}} \cdot \frac{(T_{\text{exterior}} - T_{\text{interior}})}{l}$$

En donde el área transversal se halla con la longitud del bloque (30 cm) y el espesor del puente térmico (6 mm). Adicionalmente, se toma la distancia entre las caras interior y exterior como la distancia de conducción del calor (l).

Además:

$Q_{\text{conducción}}$: Tasa de transferencia de calor por conducción.

K_{material} : Conductividad térmica del material.

$A_{\text{transversal}}$: Sección transversal del puente térmico.

T_{exterior} : Temperatura exterior.

T_{interior} : Temperatura interior.

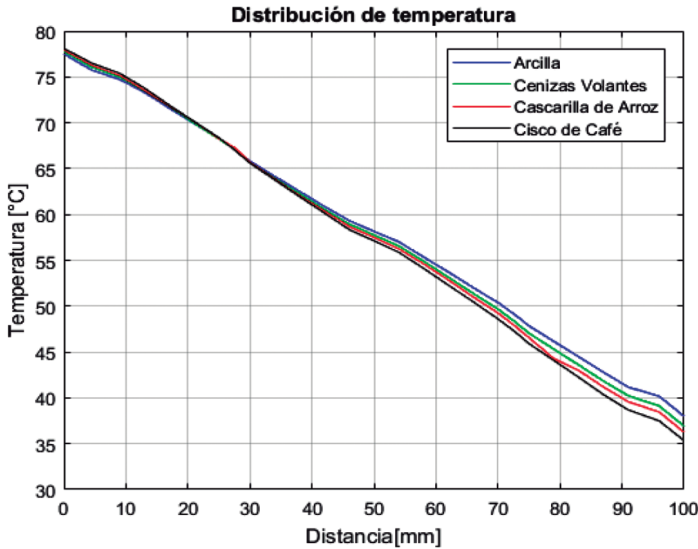
l : Distancia de conducción del calor.

Tabla 38. Temperatura exterior e interior

Material	Temperatura exterior (°C)	Temperatura interior (°C)	$Q_{\text{conducción}}$ (W)
Arcilla	77,50	37,99	0,49
Cenizas volantes	77,76	36,92	0,40
Cascarilla de arroz	77,91	36,25	0,35
Cisco de café	78,10	35,34	0,27

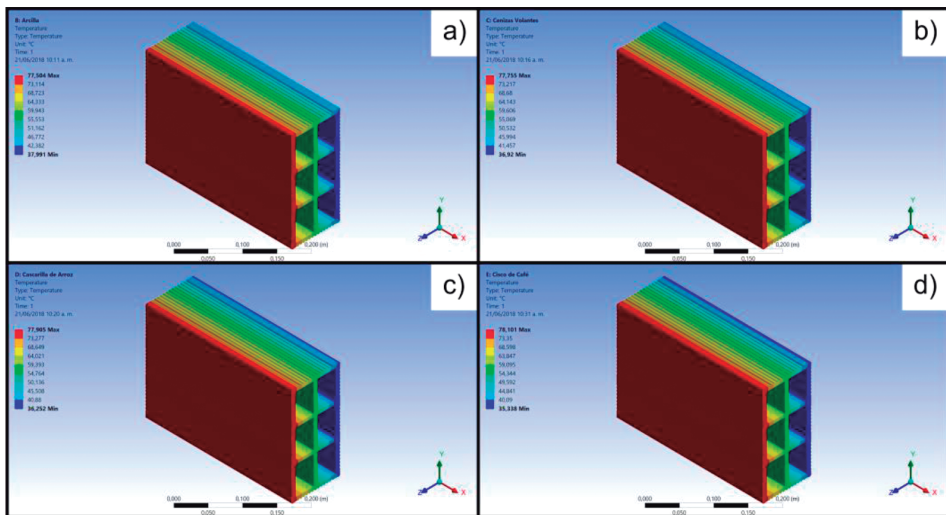
En la figura 54 se observa con detalle la comparativa de la distribución de temperatura promedio en los puentes térmicos del bloque H10 para los diferentes materiales.

Figura 54. Distribución de temperatura a lo largo de los puentes térmicos



A continuación se presenta la figura 55, correspondiente a la distribución de temperatura comparando los casos utilizados.

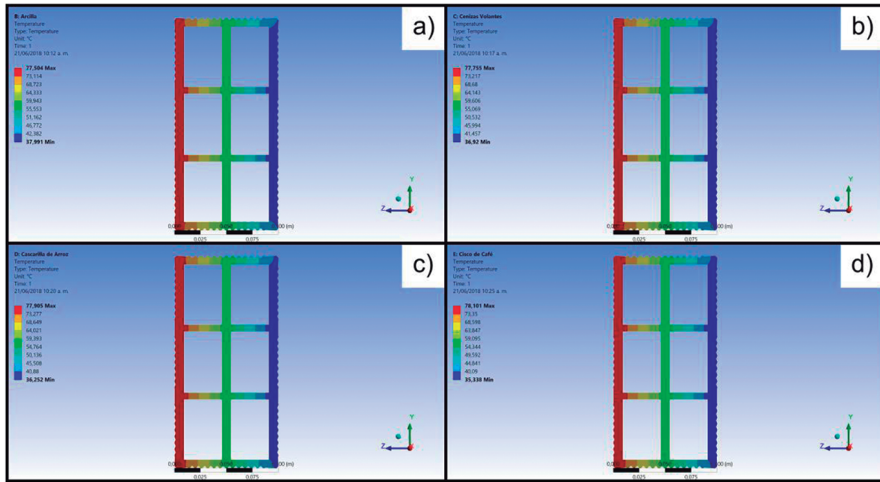
Figura 55. Vista isométrica: a) arcilla; b) cenizas volantes; c) cascarilla de arroz; d) cisco de café



De la figura 55 se puede determinar que, bajo las condiciones de simulación, la adición del cisco de café disminuye la transferencia de calor a través del bloque hueco más que los otros nutrientes tecnológicos.

A continuación se puede observar, en la figura 56, el comportamiento del perfil de temperaturas en la vista lateral del bloque para cada uno de los casos estudiados. Cabe destacar que se utilizó el mismo rango de temperaturas para que se pueda percibir la variación que existe entre cada uno de los estudios realizados.

Figura 56. Vista lateral: a) arcilla; b) cenizas volantes; c) cascarilla de arroz; d) cisco de café



En las figuras 57 a la 59 se observa el comportamiento del flujo total de calor en diferentes vistas del bloque para cada uno de los casos estudiados.

Figura 57. Vista isométrica: a) arcilla; b) cenizas volantes; c) cascarilla de arroz; d) cisco de café

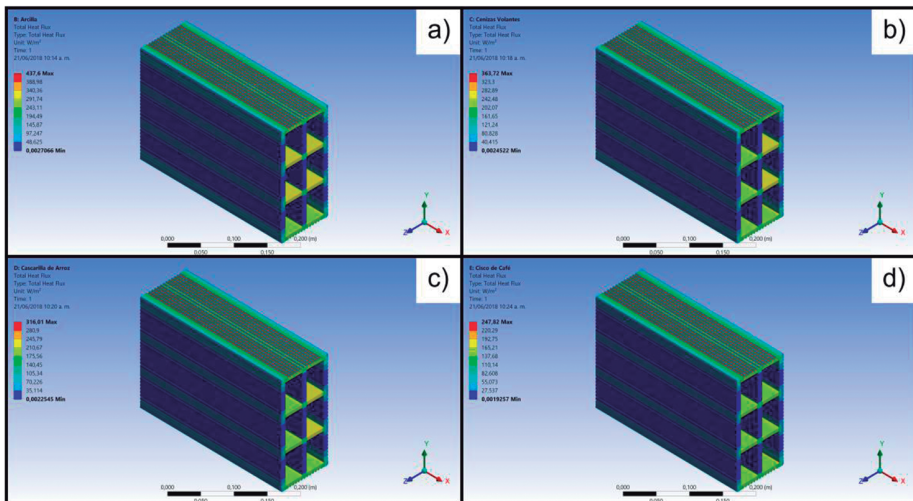


Figura 58. Vista lateral: a) arcilla; b) cenizas volantes; c) cascarilla de arroz; d) cisco de café

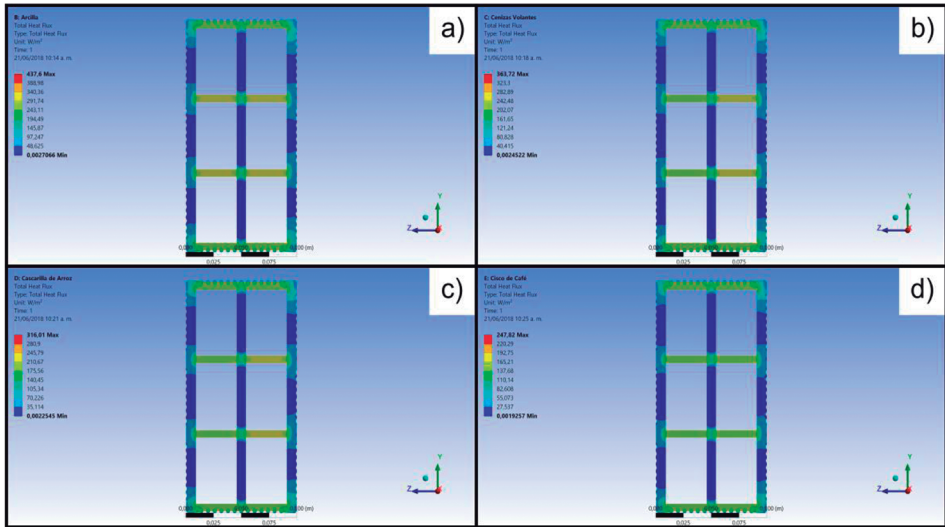


Figura 59. Vista superior: a) arcilla; b) cenizas volantes; c) cascarilla de arroz; d) cisco de café

