

Utilización de materiales aligerantes en la fabricación de bloques de Termoarcilla®.

Influencia sobre la conductividad térmica y el comportamiento en el proceso.

J. García-Ten, G. Silva, V. Cantavella, M.Lorente

En el presente texto se resumen los resultados más importantes obtenidos en el trabajo de investigación que el Instituto de Tecnología Cerámica realizó para el Consorcio Termoarcilla durante el año 2004, con el objetivo de conocer la viabilidad de reducir la conductividad térmica del material cerámico del que están formados los bloques de arcilla aligerada.

1 Introducción

La conductividad térmica de los materiales utilizados en edificación es una característica recientemente incluida en el ámbito de la normativa que regula estos productos.

La aprobación del nuevo Código Técnico de la Edificación, que está prevista a lo largo del 2005, va a suponer un incremento de las prestaciones térmicas de los cerramientos. Así, en la sección HE1 "Limitación de la demanda energética" apartado VI "Requerimientos básicos" se establecen los límites máximos para el coeficiente de transmisión térmica U de los diferentes tipos de cerramientos de un edificio en función de su región climática.

La adaptación de los bloques de arcilla aligerada a esta nueva normativa puede suponer en algunos casos una importante disminución en su conductividad térmica. Uno de los procedimientos más efectivos para reducir esta propiedad en el material cerámico consiste en modificar su microestructura mediante la introducción de aditivos aligerantes. Por ello, en el presente trabajo se estudia la viabilidad de reducir la conductividad térmica del material cerámico que forman estos bloques mediante la modificación de las composiciones arcillosas utilizadas en la actualidad.

2 Experimentación

El trabajo consistió en adicionar diferentes materiales aligerantes en distintos porcentajes a una mezcla de arcillas (A), exenta de aditivos, empleada habitualmente en la fabricación de bloques de Termoarcilla®. Estas composiciones se han extrudido, secado y cocido a escala de laboratorio, estudiándose su comportamiento durante estas etapas del proceso, así como las propiedades del producto final, en particular la conductividad térmica. También se incluyen los resultados obtenidos con una composición empleada industrialmente para fabricar bloques de Termoarcilla® (STD) obtenida por adición de Orujillo y Poliestireno a la mezcla de arcillas A.

2.1 Materiales

Para realizar el trabajo se utilizó la mezcla arcillas (A) y una serie de aditivos que fueron seleccionados en función de su coste, distribución geográfica y compatibilidad con el material cerámico. Los aditivos aligerantes ensayados en el presente trabajo fueron los siguientes:

- Residuos agrícolas: Orujillo (OR)
- Residuos de la industria papelera (PPL)
- Serrín (SRN)
- Coque (CK)

2.2 Procedimiento experimental

Conformado de las probetas

Las muestras de arcilla se procesaron con un tamaño inferior a 1 mm. Las muestras de Orujillo y Serrín se tamizaron empleando respectivamente la fracción inferior a 4.0 mm y 1.2 mm. El residuo de Papel se secó, homogeneizó y se molturó vía seca hasta un tamaño máximo de 0.5 mm. El coque utilizado se encontraba micronizado (10% sobre tamiz de 63 µm).

Para la preparación de las composiciones se mezclaron vía seca las distintas materias primas en los porcentajes adecuados (tabla 1). Los porcentajes de cada aditivo se han definido, en la medida de lo posible, de tal modo que se alcancen valores de la conductividad térmica del material cerámico inferiores a 0.43W/mK, valor necesario para reducir la conductividad del bloque a 0.20W/mK (para la geometría B1 3.7/1.6 UNE-EN 1745). Este material se amasó, y se dejó reposar durante 24 horas con el objeto de homogeneizar la humedad. En la composición con 15% de Serrín, como consecuencia de la dificultad de obtener probetas sin defectos (principalmente grietas) fue necesario aumentar el agua de amasado.

Con estas masas se conformaron probetas por extrusión, de 75 mm de longitud, 100 mm de anchura y 10 mm de espesor, en una extrusionadora de hélice de laboratorio, con cámara de desgasificación.

| Composición | A | OR7 | OR15 | PPL 15 | PPL 30 | CK 10 | CK 20 | SRN 7 | SRN 15 |
|--------------------|-----|-----|------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|
| Mezcla de arcillas | 100 | 93 | 85 | 85 | 70 | 90 | 80 | 93 | 85 |
| Orujillo | - | 7 | 15 | - | - | - | - | - | - |
| Residuo Papel | - | - | - | 15 | 30 | - | - | - | - |
| Coque micronizado | - | - | - | - | - | 10 | 20 | - | - |
| Serrín | - | - | - | - | - | - | - | 7 | 15 |

Tabla 1. Composiciones ensayadas (% en peso).

Caracterización de las probetas crudas

Las probetas obtenidas se secaron al ambiente durante 24 horas y posteriormente en estufa a 110°C hasta pesada constante. Una vez secas, las probetas se pesaron y se calculó la densidad aparente por el método de inmersión en mercurio, así como la contracción de secado y el agua de amasado.

Cocción de las probetas

La cocción se efectuó en un horno eléctrico de laboratorio, con una velocidad de calentamiento de 2 °C/min y con un tiempo de permanencia a la temperatura máxima (1000°C) de 60 minutos. El enfriamiento se realizó por convección natural, siendo la duración total del ciclo de cocción de 14 horas.

Caracterización de probetas cocidas

Una vez cocidas, las probetas se pesaron de nuevo, determinándose su densidad aparente por el método indicado anteriormente. La contracción de cocción se evaluó por diferencia entre el empuje en seco y en cocido, definiéndose este parámetro en base seca. La absorción de agua se calculó midiendo la ganancia de peso experimentada por las probetas al introducirlas en agua en ebullición por un período de dos horas.

Medida de la conductividad térmica

La medida de la conductividad térmica se realizó mediante un procedimiento basado en la norma ISO 8894-2 Refractory material - Determination of thermal conductivity. Part 2: Hot-wire method (parallel) - método del hilo caliente-. Este método es aplicable a materiales refractarios con una conductividad térmica inferior a 20 W/(m K). En la figura 1 se muestra un detalle del montaje utilizado

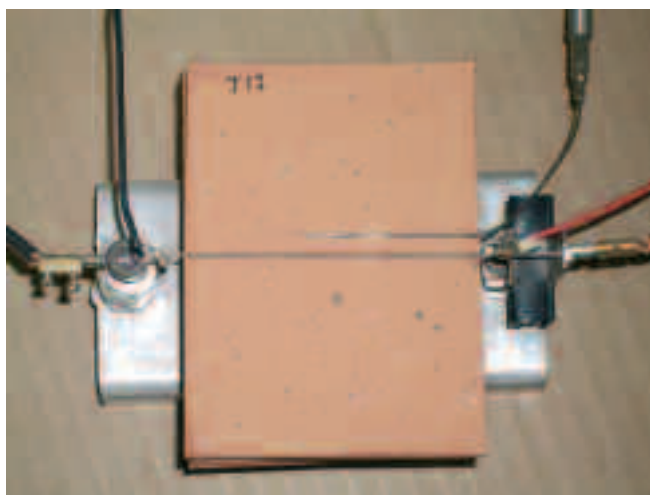


Figura 1. Detalle del montaje con el hilo caliente y el termopar

3 Resultados y discusión

3.1 Propiedades de las piezas crudas

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 2 y en las figuras 2 y 3. En la figura 2 se muestra la evolución del agua de amasado necesaria para alcanzar la consistencia de trabajo en función del contenido en peso de cada uno de los aditivos ensayados. Se observa que, a excepción del Coque que no presenta una variación significativa, para el resto de aditivos el agua de amasado aumenta a medida que se incrementa el contenido de aditivo. Este aumento es muy similar para el Orujillo y Papel, y muy elevado

para el Serrín. El notable aumento del agua de amasado que produce el Serrín se debe a que fue necesario disminuir su consistencia al objeto de conformar las piezas adecuadamente, ya que de lo contrario se producían grietas durante la extrusión.

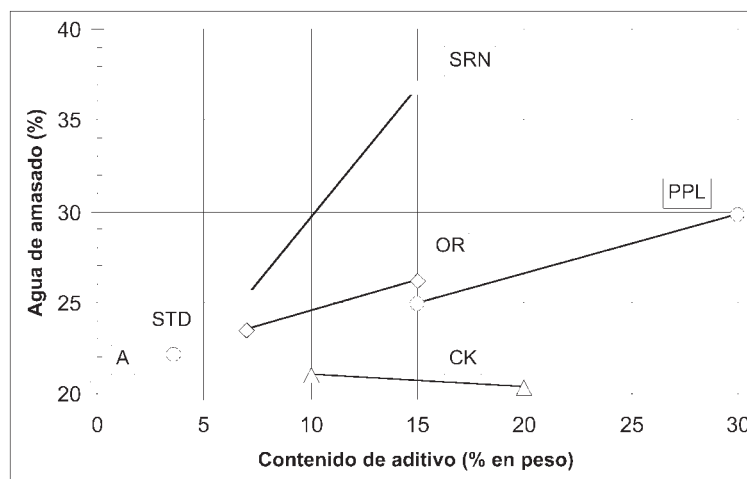
En lo que respecta a la contracción de secado (tabla 2), se observa un aumento de este parámetro con la adición de Papel y una disminución al introducir Coque y Serrín (el elevado valor que se observa al introducir un 15% de Serrín de debe a que fue necesario disminuir la consistencia de la masa, aspecto ya comentado anteriormente).

En la figura 3 se muestra la evolución de la densidad aparente en seco de las piezas con el contenido de aditivo. Se observa que todos los aditivos producen una disminución de la densidad aparente en seco, tanto mayor cuanto más cantidad de aditivo se introduce, y que esta disminución varía en función del aditivo introducido. Así, el Papel produce la menor reducción mientras que el Serrín produce la mayor. Este efecto debe asociarse a la baja densidad real de algunos de los aditivos respecto a la composición arcillosa (tabla 3), a la modificación del empaquetamiento de las partículas de la mezcla arcillosa que producen los aditivos y al hinchamiento que experimentan algunos de ellos al mezclarse con agua.

Tabla 2. Propiedades de las probetas en crudo.

Figura 2. Evolución del agua de amasado con el contenido de aditivo

| Composición | Agua de amasado (%) | Contracción de secado (%) | Densidad aparente en seco (g/cm ³) |
|-------------|---------------------|---------------------------|------------------------------------------------|
| A | 20.9 | 6.1 | 2.045 |
| STD | 22.1 | 5.9 | 1.943 |
| OR 7 | 23.5 | 5.7 | 1.871 |
| OR 15 | 26.2 | 5.9 | 1.727 |
| PPL 15 | 24.9 | 6.7 | 1.888 |
| PPL 30 | 29.8 | 8.2 | 1.782 |
| CK 10 | 21.0 | 5.0 | 1.859 |
| CK 20 | 20.3 | 4.3 | 1.741 |
| SRN 7 | 25.2 | 4.9 | 1.759 |
| SRN 15 | 36.7 | 7.2 | 1.544 |



| | |
|-----------------------|-----|
| Orujillo | 1.4 |
| Serrín | 1.6 |
| Papel | 2.1 |
| Coque | 1.4 |
| Composición arcillosa | 2.7 |

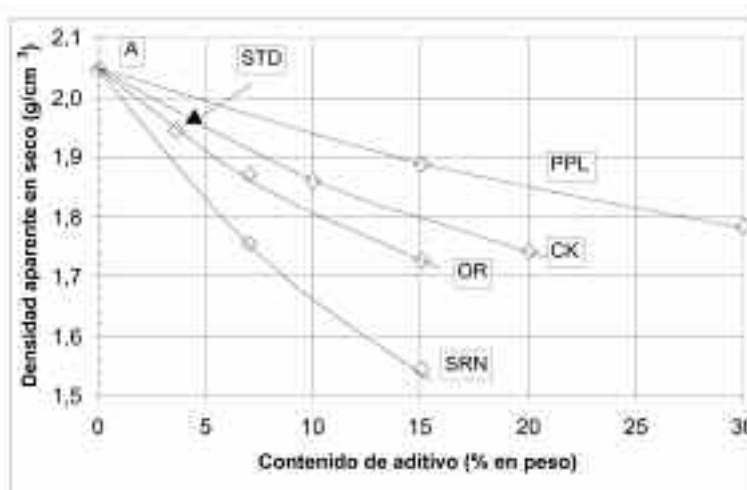


Figura 3. Evolución de la densidad aparente en seco con el contenido de aditivo

Tabla 3. Densidad real de los aditivos.

3.2 Propiedades de las piezas cocidas

En la tabla 4 se muestran los valores de la contracción lineal y absorción de agua de las probetas cocidas a 1000°C. Puede apreciarse que la contracción de cocción no varía excesivamente para los porcentajes de aditivo ensayados, oscilando entre el 0.5 y el 1.5%. Como excepción debe indicarse el valor de la contracción correspondiente a la composición con el 30% de Papel que proporciona un valor del 3.1%.

En lo que respecta a la absorción de agua de las piezas (relacionada con su porosidad abierta y muy probablemente con la porosidad total debido a la escasa proporción de porosidad cerrada en este tipo de piezas) se aprecia que al aumentar el contenido de aditivo aumenta la absorción de agua de las piezas (figura 4). El aumento de la absorción de agua que, como se verá posteriormente se encuentra relacionado con la densidad en cocido, es mayor para el Serrín y menor para Papel, encontrándose el Orujillo y el Coque en una situación muy similar entre ambos e intermedia respecto a los dos aditivos anteriormente indicados. Este mismo comportamiento se observa en la figura 5 en la que se ha representado la densidad aparente en cocido frente al contenido de aditivo. A partir de estas figuras pueden ordenarse los aditivos ensayados en orden creciente de poder aligerante por kilo seco introducido según la siguiente serie: PPL<CK=OR<SRN

| Composición | Contracción lineal (%) | Absorción de agua (%) | Pérdida por calcinación (%) | Densidad aparente (g/cm ³) |
|-------------|------------------------|-----------------------|-----------------------------|----------------------------------------|
| A | 0.8 | 15.1 | 12.03 | 1.840 |
| STD | 0.9 | 18.7 | 14.49 | 1.705 |
| OR 7 | 1.1 | 23.0 | 17.03 | 1.605 |
| OR 15 | 1.3 | 32.7 | 22.95 | 1.384 |
| PPL 15 | 1.5 | 23.2 | 17.69 | 1.627 |
| PPL 30 | 3.1 | 28.3 | 23.07 | 1.511 |
| CK 10 | 0.5 | 24.9 | 19.51 | 1.521 |
| CK 20 | 1.0 | 37.2 | 36.11 | 1.291 |
| SRN 7 | 0.5 | 28.7 | 17.46 | 1.476 |
| SRN 15 | 0.9 | 45.5 | 24.05 | 1.204 |

Tabla 4. Propiedades de las piezas cocidas a 1000°C.

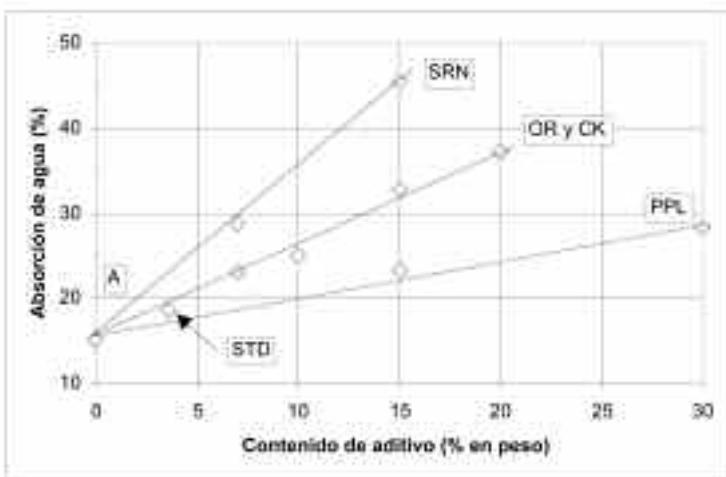


Figura 4. Evolución de la absorción de agua con el contenido de aditivo

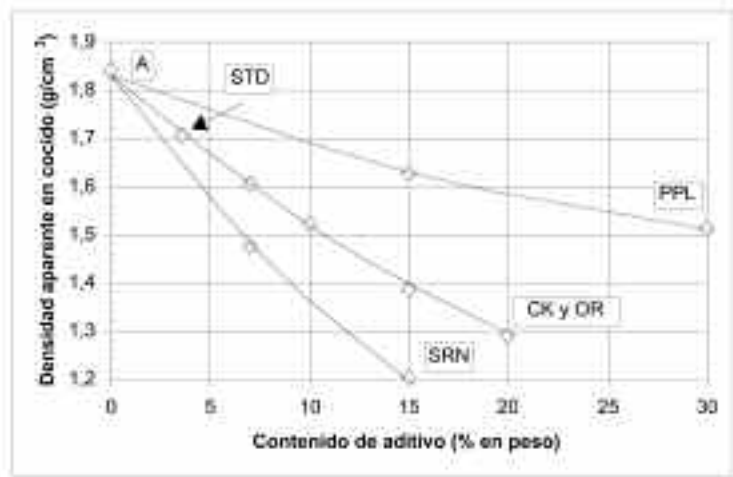


Figura 5. Evolución de la densidad aparente en cocido con el contenido de aditivo

El poder aligerante de los aditivos se debe al aumento de la pérdida por calcinación durante la cocción así como a la mayor o menor porosidad que generan en crudo por la disminución del empaquetamiento.

En la figura 6 se muestra la pérdida por calcinación de las composiciones en función del contenido de aditivo. De la observación de esta figura se deduce que el aumento de la pérdida por calcinación que originan el Orujillo, Serrín y Coque es muy similar entre ellos y muy superior al que proporciona el Papel. Al objeto de comprobar este comportamiento se determinaron las pérdidas por calcinación de cada uno de los aditivos (tabla 5) comprobando que el Orujillo, Serrín y Coque presentan unas pérdidas superiores al 95% mientras que la pérdida por calcinación del Papel es únicamente del 50%. Ello indica que los tres primeros aditivos se oxidan durante la cocción sin dejar prácticamente residuo mientras que el papel deja una importante cantidad de ceniza.

En la figura 7 se muestran los valores de la conductividad térmica de las piezas cocidas frente al contenido de aditivo. Se observa que a medida que se introducen mayores porcentajes de aditivo la conductividad térmica disminuye, dependiendo esta disminución del tipo de aditivo empleado. De este modo el Papel es el aditivo menos eficaz para reducir la conductividad térmica de las piezas y el Serrín el que más la disminuye. Empleando esta figura es posible ordenar los aditivos en orden creciente de eficacia para reducir la conductividad térmica de las piezas de acuerdo con la serie: PPL<CK<OR<SRN.

Las diferencias entre los aditivos empleados están relacionadas con la disminución de la densidad aparente en cocido que originan. Esta disminución depende a su vez de las pérdidas por calcinación y del mayor o menor aumento de porosidad (disminución de la densidad aparente) en las piezas crudas que producen los aditivos. Así, el motivo por el que el Papel no es muy eficaz para reducir la conductividad se debe a su escasa pérdida por calcinación (Tabla 5) que implica que su introducción no disminuya de forma importante la densidad aparente de las piezas cocidas. El resto de aditivos presentan, prácticamente, el mismo valor de las pérdidas por calcinación, por lo que las diferencias observadas deben asociarse al aumento de porosidad que originan en crudo. En la figura 3 ya se observó que el Serrín era el aditivo que más reducía la densidad aparente en seco de las piezas, seguido por el Orujillo y Coque. Todo ello justifica las diferencias observadas en la figura 7.

Al objeto de conocer si la conductividad térmica depende únicamente de la porosidad de las piezas cocidas se ha representado esta propiedad en función de la densidad aparente en cocido (figura 8). La porosidad y la densidad aparente están relacionadas mediante la densidad real de las piezas, la cual no debe variar excesivamente. En la figura 8 se observa que la conductividad térmica disminuye a medida que lo hace la densidad aparente, aunque los resultados se ajustan a tres líneas diferentes. Para un mismo valor de la densidad aparente en cocido el Coque presenta la mayor conductividad, seguido del Serrín y Papel y, finalmente, el Orujillo. Estas diferencias pueden ser debidas a cambios en la microestructura del material cerámico. Así, en el caso del Orujillo, el elevado tamaño de los poros (ver figura 9) falsea los valores de la densidad aparente medidos por el método de inmersión en mercurio debido a que éste penetra en los huecos presentes en la superficie. La medición de la densidad aparente por un método dimensional puso de manifiesto que los valores de la densidad aparente en cocido de las piezas con Orujillo eran entre 0.07 y 0.10 g/cm³ más bajos que los proporcionados por el método de inmersión en mercurio, lo que desplaza los puntos experimentales correspondientes al Orujillo hacia el eje de ordenadas, pudiendo integrarse en la línea correspondiente al Serrín y Papel. Para el resto de aditivos no se observaron cambios significativos en la medida de la densidad aparente por ambos métodos.

La porosidad total de las piezas cocidas puede ser de dos tipos: abierta y cerrada. La porosidad abierta puede determinarse a partir de los valores del ensayo de absorción de agua, mientras que para conocer la porosidad cerrada es necesario determinar la densidad real de las piezas. Las piezas ensayadas presentan una elevada porosidad total a juzgar por los bajos valores de la densidad aparente que presentan. Ello, unido a la escasa formación de fase líquida durante la etapa de cocción, implica que la porosidad cerrada de las piezas debe ser muy pequeña en comparación con la porosidad abierta, por lo que el valor de la porosidad total debe coincidir prácticamente con el de la porosidad abierta.

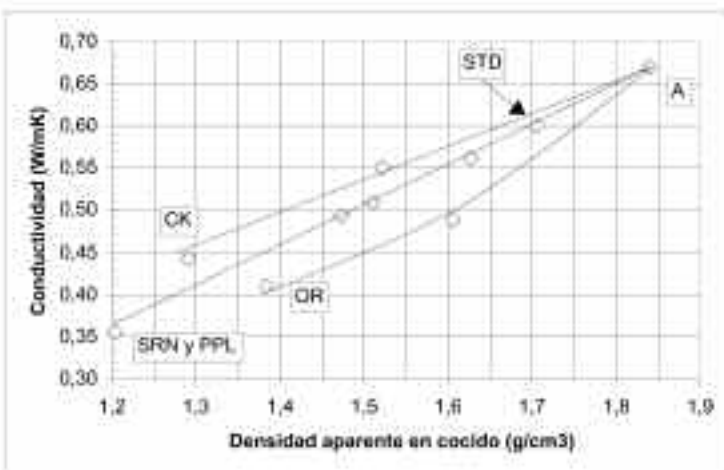
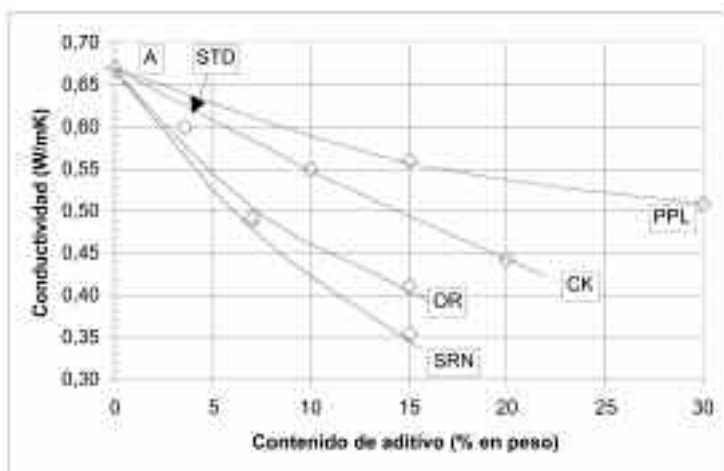
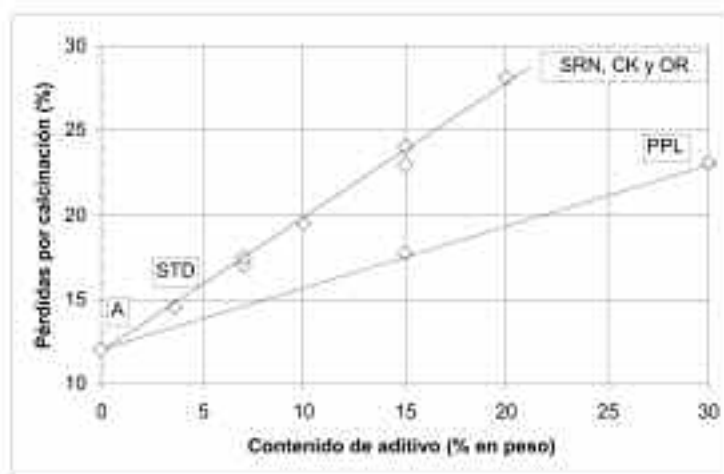
| Muestra | Pérdida por calcinación (%) |
|----------|-----------------------------|
| Orujillo | 95.1 |
| Serrín | 99.7 |
| Papel | 51.5 |
| Coque | 96.9 |

Tabla 5. Pérdida por calcinación de los aditivos.

Figura 6. Evolución de las pérdidas por calcinación con el contenido de aditivo

Figura 7. Evolución de la conductividad térmica frente al contenido de aditivo.

Figura 8. Evolución de la conductividad térmica con la densidad aparente en cocido.



En la figura 10 se representa la conductividad térmica frente a la absorción de agua de las piezas cocidas. Se observa que todas las composiciones se ajustan a una única línea recta de pendiente negativa, lo que indica que el aumento de la porosidad de las piezas reduce su conductividad. Como excepción se encuentran las dos composiciones con Orujillo, las cuales se sitúan por debajo de la línea citada anteriormente. Ello indica que para un mismo valor de la absorción de agua o porosidad, las composiciones con Orujillo proporcionan una menor conductividad. Dado que las piezas con Orujillo son las que presentan los poros de mayor tamaño (ver figura 9), la medida de absorción de agua también podría estar falseada por la salida del agua de los poros más grandes. Este efecto proporcionaría valores de la absorción de agua inferiores a los reales, por lo que los valores experimentales correspondientes al Orujillo deberían desplazarse hacia la derecha, aproximándose a la línea definida por el resto de aditivos. Estos resultados confirman que la conductividad térmica depende principalmente de la porosidad de las piezas y escasamente del tamaño de los poros en el intervalo estudiado.

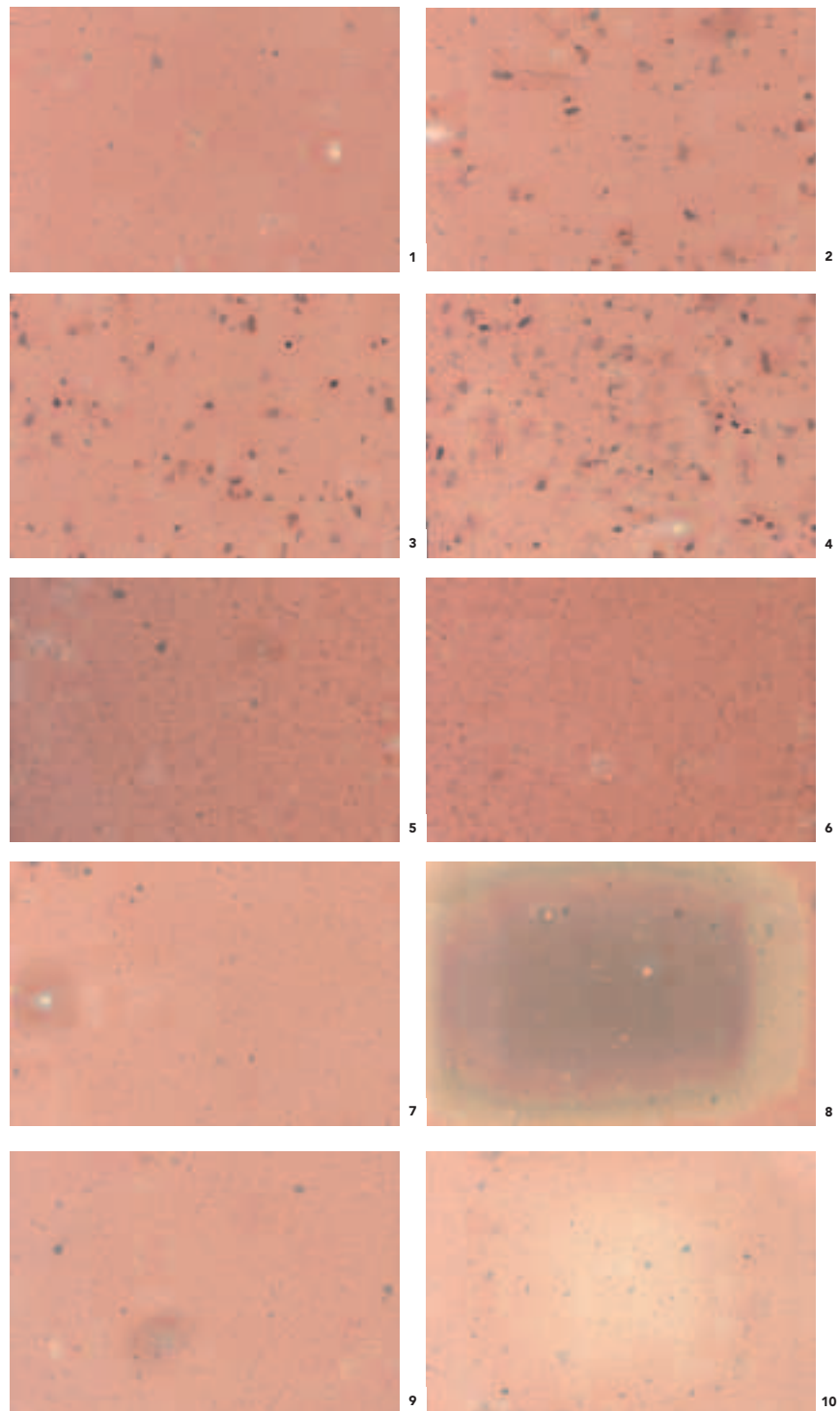


Figura 9. Aspecto de las piezas cocidas tras el proceso de rectificación

- | | |
|----|--------|
| 1 | A |
| 2 | STD |
| 3 | OR7 |
| 4 | OR15 |
| 5 | SRN 7 |
| 6 | SRN 15 |
| 7 | CK 10 |
| 8 | CK 20 |
| 9 | PPL 15 |
| 10 | PPL 30 |

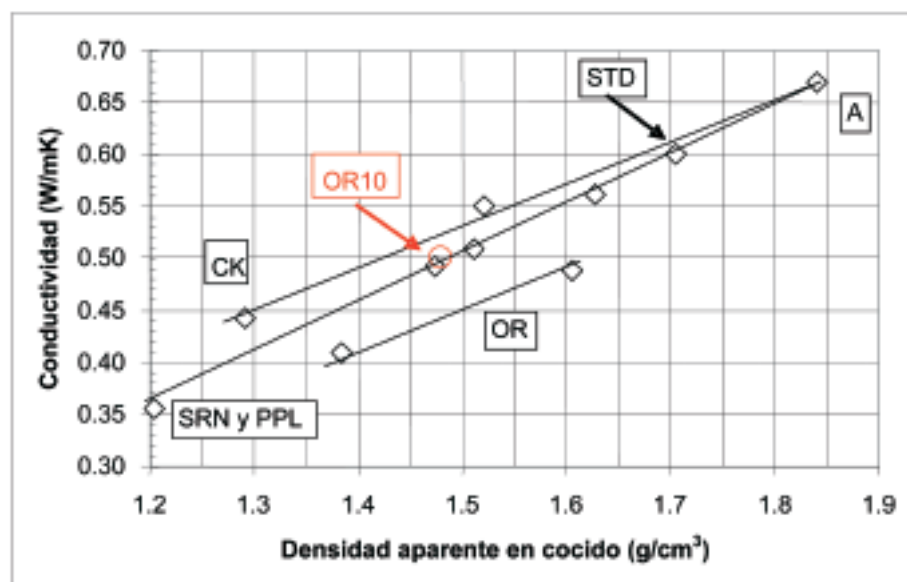
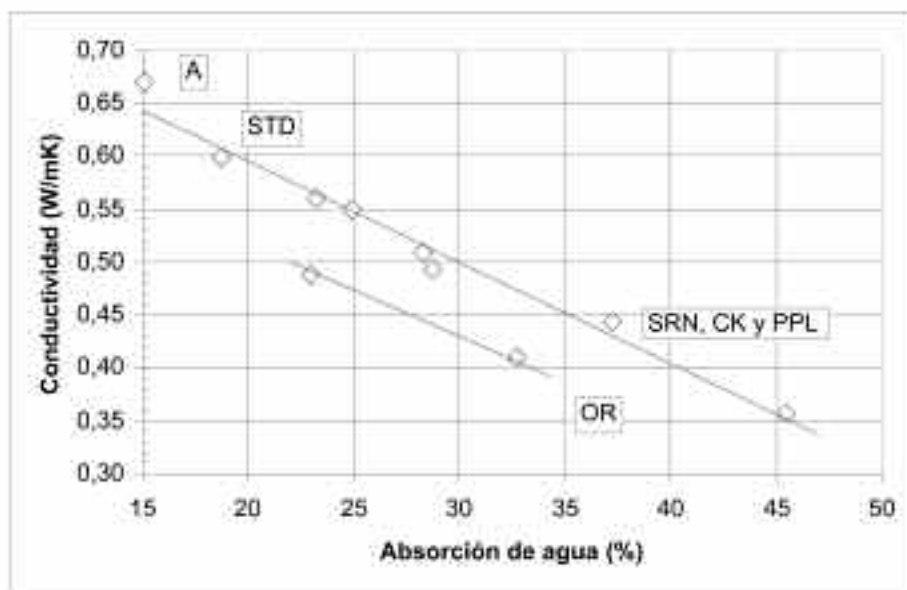


Figura 10. Evolución de la conductividad térmica con la absorción de agua.

Figura 11. Evolución de la conductividad térmica con la densidad aparente en cocido.

3.3 Experimentos con Orujillo de menor tamaño de partícula

En este apartado se han realizado una serie de ensayos adicionales con el objetivo de conocer el efecto que produce la utilización de Orujillo de menor tamaño de partícula. Para ello se ha preparado una composición que incorpora un 10% de Orujillo de tamaño inferior (125-500 μm).

En la figura 11 se muestra los valores de conductividad térmica frente a los de la densidad aparente en cocido. Se observa que el valor para la composición OR10 se alinea con los valores obtenidos para el Serrín y Papel.

Estos resultados indican que el tamaño del Orujillo no influye significativamente sobre la conductividad térmica, en el intervalo estudiado.

4.4 Cálculo del contenido de aditivo que proporciona una conductividad térmica de 0.43 W/mK

A partir de los resultados obtenidos en los apartados anteriores se ha calculado, para cada aditivo, el porcentaje que debe introducirse para que el material cerámico reduzca su valor de la conductividad térmica hasta 0.43 W/mK. Este valor se ha utilizado como referencia, dado que suponiendo una geometría tipo B1 3.7/1.6 (UNE-EN 1745), similar a la de los bloques aligerados actualmente disponibles en el mercado, permitiría reducir la conductividad equivalente a un valor cercano a 0.20 W/mK.

Tabla 6 . Propiedades de las piezas con un valor de conductividad térmica de 0.43W/m°C.

*La presencia de huecos grandes en esta pieza dificulta la medida de la absorción de agua y densidad aparente. Los valores reales de la absorción de agua deben ser superiores a los mostrados en la tabla y los de la densidad aparente inferiores

| | A | STD | SRN | OR | CK |
|--------------------------------------------------|-------|-------|------|-------|------|
| Contenido de aditivo (%) | - | 3.6 | 11 | 13.5 | 22.5 |
| Agua de amasado (%) | 20.9 | 22.1 | 30 | 26 | 20 |
| Contracción de secado (%) | 6.1 | 5.9 | — | 5.9 | 4.2 |
| Densidad aparente en seco (g/cm ³) | 2.045 | 1.943 | 1.63 | 1.75 | 1.72 |
| Contracción lineal (%) | 0.8 | 0.9 | 0.7 | 1.3 | 1.2 |
| Absorción de agua (%) | 15.1 | 18.7 | 37.5 | 30.0* | 30.0 |
| Pérdida por calcinación (%) | 12.03 | 14.49 | 20.8 | 22.7 | 29.8 |
| Densidad aparente en cocido (g/cm ³) | 1.840 | 1.705 | 1.33 | 1.43* | 1.43 |

En la tabla 6 se indica el porcentaje de cada uno de los aditivos a introducir en la composición y las propiedades que ésta proporcionaría a las piezas. No se han incluido los valores correspondientes al Papel debido a que es necesario introducir una proporción muy superior al 30% para obtener la conductividad térmica requerida.

5 Conclusiones

Las conclusiones más importantes que pueden extraerse de este trabajo son las siguientes:

La totalidad de los aditivos aligerantes ensayados en este trabajo son eficaces para disminuir la conductividad térmica del material cerámico, aunque su efectividad no es la misma para todos ellos. Los aditivos estudiados pueden ordenarse en orden creciente de efectividad para disminuir la conductividad térmica según la siguiente serie:

Papel < Coque < Orujillo < Serrín

La cantidad de aditivo que es necesario añadir a la mezcla de arcillas estudiada para reducir la conductividad térmica hasta valores de 0.43 W/mK es del 11% para el Serrín, 13.5% para el Orujillo, 22.5% para el Coque y más del 30% para el Papel.

La introducción de los aditivos en los porcentajes indicados modifica el comportamiento de las piezas durante su procesado. Así, el Orujillo, Serrín y Papel absorben agua, aumentan de volumen y conducen a un incremento del agua de amasado que puede influir durante el secado de las piezas. La combustión de estos aditivos, por ser una reacción exotérmica, puede originar modificaciones importantes durante la cocción de las piezas.

La disminución de la densidad aparente de las piezas implica una reducción de sus propiedades mecánicas, aspecto de vital importancia dado que estos materiales ejercen funciones estructurales en el edificio.

La reducción de la resistencia mecánica de los bloques, podría requerir, en algún caso, la modificación de alguna variable del proceso de fabricación o de la composición para alcanzar los valores iniciales de resistencia mecánica.

Estos resultados aconsejan reducir de la conductividad térmica del bloque actuando simultáneamente sobre las características del material cerámico y la geometría del bloque, lo que permitiría disminuir el contenido de aditivos aligerantes y, con ello, su incidencia sobre el comportamiento y propiedades de los bloques.

J. García-Ten, G. Silva, V. Cantavella, M.Lorente
Instituto de Tecnología Cerámica, Campus Universitario Riu Sec, Universitat Jaume I, Castellón