



### **Fabricación de ladrillos de arcilla sostenibles. Valorización de cenizas de la combustión de tableros de madera.**

D. Eliche-Quesada <sup>(1\*)</sup>, M.A. Felipe-Sesé <sup>(1,2)</sup>, S. Martínez-Martínez <sup>(1)</sup>, A. Infantes-Molina <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Departamento de Ingeniería Química, Ambiental y de los Materiales, EPS de Jaén, Universidad de Jaén, Campus Las Lagunillas, s/n, 23071-Jaén, España

<sup>(2)</sup> Universidad Internacional de la Rioja Avenida La Paz, 137. 26002 Logroño (La Rioja), España

<sup>(3)</sup> Departamento de Química Inorgánica, Cristalografía y Mineralogía (Unidad Asociada al ICP-CSIC), Facultad de Ciencias, Universidad de Málaga, Campus de Teatinos, 29071-Málaga, España

\* Tel.: +34 953 211 861; Fax: +34 953 212 141

e-mail de contacto: [deliche@ujaen.es](mailto:deliche@ujaen.es)

#### **Resumen**

En este trabajo se evalúa el efecto de la incorporación de cenizas resultantes de la combustión de tableros de madera, como materia prima secundaria, para la fabricación de ladrillos cerámicos de arcilla. Las cenizas fueron caracterizadas mediante difracción de rayos X (DRX), fluorescencia de rayos X (FRX), análisis termogravimétrico-termodiferencial y análisis elemental. Para estudiar la influencia de la incorporación de cenizas se prepararon tres composiciones con un 10, 20 y 30% en peso de las mismas. El residuo se adicionó a una mezcla de arcillas procedentes de la localidad de Bailén (Jaén, España), concretamente en una proporción para la mezcla de 30% en peso arcilla roja, 30% en peso de arcilla amarilla y 40% en peso de arcilla negra. Las dosificaciones fueron homogeneizadas, conformadas por compresión y sinterizadas en aire en un horno eléctrico de laboratorio a una temperatura máxima de 1.000 °C, siendo la rampa de subida hasta los 1.000 °C de 3 °C/min y el mantenimiento a máxima temperatura de 4 h. Se han evaluado las propiedades tecnológicas de los ladrillos: contracción lineal, densidad aparente, porosidad aparente, absorción de agua, resistencia a la compresión y conductividad térmica, comparando los resultados obtenidos con los de los ladrillos control, los cuales contienen sólo arcilla. Los resultados indicaron que la cantidad óptima de cenizas a adicionar es del 20% en peso obteniendo ladrillos con propiedades tecnológicas similares al ladrillo control conteniendo sólo arcilla, con una menor densidad aparente (1.560 kg/m<sup>3</sup>), una similar resistencia a la compresión (53,6 MPa) y una menor conductividad térmica (0,886 W/mk). Hay que señalar que los ladrillos que contienen el 30% en peso de cenizas cumplen la normativa requerida para ladrillos cerámicos de arcilla cocida aunque sus propiedades mecánicas se reducen significativamente. Además los ladrillos no presentan problemas ambientales de acuerdo con los resultados obtenidos con el ensayo de lixiviación.



**Palabras clave:** cenizas de combustión de tableros de madera, ladrillos de arcilla, sostenibilidad, propiedades tecnológicas.

## 1. Introducción

Considerando la cada vez mayor necesidad de consumo de energía y el evidente agotamiento de los combustibles fósiles, unido a los problemas medioambientales que se derivan de su utilización, se obtiene como resultado una creciente demanda de las energías renovables cuyo empleo, sin duda, implicará una mayor calidad de vida para las futuras generaciones [1]. La biomasa es una de las fuentes de energía más prometedoras y eficientes debido a su naturaleza renovable y medioambientalmente sostenible [2,3]. La Directiva 2003/54/CE define biomasa como *“la fracción biodegradable de productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias, silvicultura y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biodegradable de los residuos industriales y municipales”* [4]. Los residuos generados en la agricultura a nivel global, debido tanto por la gran cantidad generada como por su alto poder calorífico, son idóneos para que puedan ser empleados como biocombustibles para la obtención de energía eléctrica y térmica. De esta forma se le da un valor añadido a estos residuos y además se reduce el impacto ambiental tanto por su no disposición en vertederos, como por el no empleo de los combustibles fósiles. El Plan de Acción Nacional de Energías Renovables (PANER) (2010 – 2020) desarrollado en España permite asumir los objetivos propuestos por la Unión Europea, estableciendo un ambicioso modelo energético en el que el empleo de la biomasa como fuente de energía renovable es esencial [5]. La comunidad autónoma andaluza es la que más biomasa consume, en parte debido a la disponibilidad de esta fuente de energía, al ser la segunda comunidad autónoma con mayor extensión de España y a la amplia superficie de bosque y tierra de cultivo de la que dispone, siendo cerca del 40% superficie forestal y el 60% es dedicado a la explotación agraria [6,7]. Esta comunidad cuenta con un total de 18 plantas generadoras de electricidad a partir de biomasa que producen un total de 257,5 MW anuales [8]. Sin embargo, el uso de este tipo de energía lleva asociado un importante problema medioambiental y económico debido a la gran cantidad de cenizas que se generan como resultado del proceso de combustión. Las cenizas habitualmente se acumulan en vertederos autorizados, pudiendo contaminar el medio, mediante su difusión a través del subsuelo, aire y agua. Concretamente existen dos tipos de cenizas, las cenizas volantes y las cenizas de fondo. Las cenizas de fondo son aquel residuo no combustible más los inquemados que quedan en el horno tras el proceso de combustión, mientras que las cenizas volantes son aquellos residuos sólidos que escapan a través de la chimenea, debido a su pequeño tamaño y baja densidad, que son retenidas y no liberadas a la atmósfera [9]. La cantidad y calidad de las cenizas está determinada por las características de la biomasa y la técnica de combustión empleada [10]. Evidentemente, el potencial de reutilización de las cenizas está determinado por sus propiedades químicas y mecánicas, siendo los principales componentes de interés de las cenizas los siguientes: sílice, potasio, sulfuro, hierro, fósforo, magnesio, calcio, titanio, carbono, hidrógeno y oxígeno [11].

Con motivo del aumento de los costes de la materias primas y el interés por dar valor a los subproductos de actividades industriales y de esta forma disminuir el consumo de los recursos naturales, el uso de las cenizas de fondo y volantes ha sido y está siendo estudiado como parte integrante de los materiales de construcción para que reemplace, parcial o completamente a los materiales tradicionales. La industria de la construcción, debido a las grandes cantidades de materia prima que son requeridos para la producción



de materiales cerámicos [12,13], es idónea para absorber grandes cantidades de residuos. En la actualidad, se emplean cenizas por ejemplo para la sustitución del cemento en el hormigón [14], para la estabilización de suelos como base para carreteras [15-18] y para la producción de cemento [19-22]. De igual forma, existen estudios para el empleo de las cenizas de fondo de la combustión de biomasa forestal como sustituto para el cemento y hormigones sin comprometer sus propiedades mecánicas, químicas y ecotóxicas [23], como aditivo en la formulación de morteros en las infraestructuras civiles [9,24,25] y en productos cerámicos [26-32].

En base a lo anterior, en el presente estudio se han fabricado ladrillos cerámicos mediante el proceso convencional de fabricación, empleando porcentajes de hasta el 30% de cenizas de fondo procedentes de la planta de generación de energía eléctrica a partir de biomasa de la compañía Tableros Tradema, S.L., situada en la ciudad de Linares (Jaén, España), cuya actividad es la fabricación de tableros de madera, en la que se emplean, como combustible para la obtención de energía y térmica, aquellos residuos generados durante el proceso, constituidos por fragmentos de madera, polvo de madera y productos no conformes.

Las materias primas fueron caracterizadas y las mezclas de arcilla y cenizas en distintos porcentajes (0-30%) fueron conformadas por presión y sinterizadas a 1.000 °C. Se ha estudiado el efecto de la variación del porcentaje de residuo en las propiedades físicas, mecánicas y térmicas de los ecoladrillos resultantes.

## 2. Experimental

### 2.1.-Materiales

La arcilla fue recogida en una cantera local ubicada en Bailen (Jaén, España). La arcilla empleada como materia prima se ha obtenido mediante la mezcla de tres tipos de arcilla: 30% en peso de arcilla roja, 30% en peso de arcilla amarilla y 40% en peso de arcilla negra. La preparación inicial de la arcilla consiste en el secado y posterior desmenuzando en molino de martillos para obtener un tamaño de partícula adecuado para pasar por un tamiz de 500 µm. El residuo de cenizas de la combustión de tableros de madera fué suministrado por la planta de cogeneración de la empresa Tableros Tradema, S.L., situada en Linares (Jaén, España). Las cenizas son recepcionadas con un tamaño de grano muy heterogéneo y con humedad, por lo que, tras secado en estufa a 105°C hasta masa constante fueron introducidas en molino de bolas para la obtención de un tamaño de grano homogéneo, tamizándose posteriormente hasta conseguir un tamaño de partícula de 150 µm.

Se ha adicionado a la arcilla diferentes cantidades de residuo (0-30% en peso), mezclándose hasta obtener una buena homogeneización. En orden de obtener resultados comparativos, se han preparado diez muestras por serie. Se ha adicionado a las mezclas la suficiente cantidad de agua (7% en peso) para que tengan suficiente plasticidad y evitar la presencia de defectos, principalmente grietas, en la etapa de moldeo por compresión en estado semiseco bajo presión de 54.5 MPa, usando una prensa de laboratorio uniaxial Mega KCK-30 A. También se han preparado mezclas libres de residuo como referencia. Las probetas conformadas tienen aproximadamente 60 mm de longitud, 30 mm de anchura y 10 mm de espesor. Una vez conformadas las piezas cerámicas se someten a una etapa de secado durante 48 h a 110 °C y finalmente se sinterizan en un horno de laboratorio eléctrica a una velocidad de calentamiento de 3 °C/min hasta alcanzar 1.000 °C, manteniendo esta temperatura máxima durante 4 horas. Las muestras se enfriaron hasta temperatura ambiente por convección natural dentro del horno. Se denominan como A los ladrillos sin residuos y como A-xCM las mezclas con



cenizas de la combustión de madera, donde  $x$  denota el contenido en peso (%) de residuo en la matriz de arcilla.

### **2.2.- Técnicas de caracterización**

Para determinar las fases cristalinas presentes se empleó un difractómetro Philips X'Pert Pro automático equipado con un monocromador primario de Ge (111). La composición química se determinó mediante fluorescencia de rayos X (FRX) usando un equipo Philips Magix Pro (PW-2440). El comportamiento térmico se determinó mediante análisis termogravimétrico y análisis térmico diferencial (ATG-ATD) empleando un equipo Mettler Toledo 850e donde las muestras fueron puestas en el crisol de platino y calentadas a una velocidad de 20 °C/min desde temperatura ambiente hasta 1.000 °C. La determinación del contenido en materia orgánica se realizó según la norma ASTM D-2974 [33]. La temperatura de ignición fue 640 °C. La determinación de carbono, hidrógeno nitrógeno y azufre de las muestras se ha determinado por análisis químico elemental CNHS usando un equipo Thermo Finnigan Flash EA1112 CNHS-O por combustión a 950 °C en atmósfera de O<sub>2</sub>.

### **2.3.- Caracterización de los ladrillos conformados**

La pérdida de peso tras sinterización se obtuvo pesando la pieza conformada tanto después de la etapa de secado a 110 °C como después de la etapa de cocción a 1.000 °C. La contracción lineal se obtuvo midiendo la longitud de las muestras antes y después de la fase de cocción, utilizando un calibre con una precisión de  $\pm 0.01$  mm, según la norma ASTM C 326 [34] Los valores de absorción de agua se determinaron por diferencia de peso entre las muestras secas y las muestras saturadas de agua (sumergidas en agua hirviendo durante 2 h), según la norma ASTM C373 [35]. La densidad aparente se determinó por el método de Arquímedes [35]. La succión de agua es el volumen de agua absorbida durante una inmersión parcial de corta duración. La succión de agua se determinó de acuerdo con la norma UNE-EN 772-1 [36]. El ensayo de resistencia a compresión se realizó siguiendo la norma UNE-EN 772-1[37], en una prensa de laboratorio MTS 810. Todas las probetas fueron sometidas a un esfuerzo normal progresivamente creciente, aplicando la carga centrada en la cara superior de la probeta hasta la rotura. La resistencia a la compresión de cada probeta se obtendrá dividiendo la carga máxima entre la superficie media de sus dos caras de apoyo, siendo expresada en MPa con precisión de 0.1 MPa.

La microestructura de las piezas conformadas se observó por microscopía electrónica de barrido (SEM), empleando un microscopio de transmisión electrónica de alta resolución JEOL SM 840. Las muestras se colocaron en una rejilla de aluminio y cubiertas con carbono usando un metalizador iónico JEOL JFC 1100.

Para la determinación experimental de la conductividad térmica de los ladrillos conformados se empleó un analizador C-Therm TCi de Mathis Instruments Ltd. con sensor universal.

La lixiviación de los metales pesados contenidos en las muestras fue estudiada aplicando el método 1311 [38] establecido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). El extracto líquido obtenido después de la lixiviación fue analizado mediante ICP-masas utilizando un equipo ICP-AES Agilent 7500.



### 3. Resultados y Discusión

#### 3.1. Caracterización de las materias primas

La Tabla 1 muestra la composición química determinada por FRX de las materias primas. Los principales componentes observados en las cenizas de combustión de madera fueron  $\text{SiO}_2$  (48.6%),  $\text{CaO}$  (18.1%) y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (5.9%), siendo los componentes minoritarios  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (3.3%),  $\text{MgO}$  (3.2%),  $\text{K}_2\text{O}$  (1.9%) y  $\text{TiO}_2$  (1.4%). La composición química de la arcilla fue similar a la composición química de las arcillas usadas en la industria de fabricación de ladrillos cerámicos.

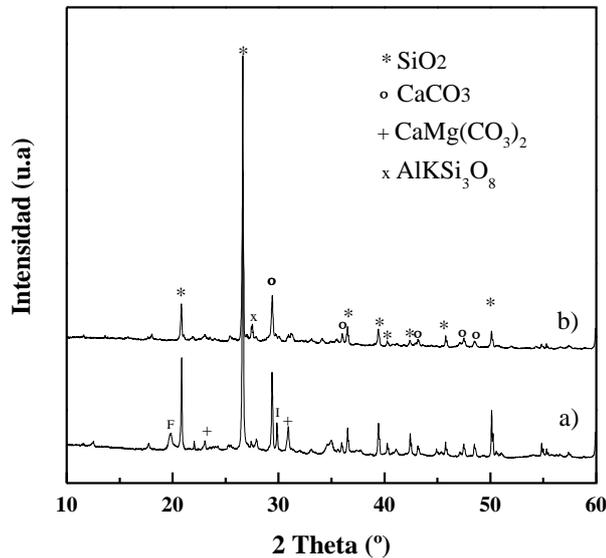
**Tabla 1. Composición química de las cenizas de madera y de la arcilla**

Oxidos (%)	Cenizas	Arcilla
$\text{SiO}_2$	48.60	54.40
$\text{Al}_2\text{O}_3$	5.94	12.36
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	3.26	4.58
$\text{CaO}$	18.1	8.76
$\text{MgO}$	3.20	2.46
$\text{MnO}$	0.051	0.03
$\text{Na}_2\text{O}$	0.92	-
$\text{K}_2\text{O}$	1.85	3.37
$\text{TiO}_2$	1.39	0.60
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.52	0.11
$\text{SO}_3$	0.14	0.68
$\text{ZnO}$	0.281	0.026
$\text{SrO}$	0.0434	0.027
$\text{ZrO}_2$		0.033
$\text{Cl}$	0.064	-
$\text{LOI}$	15.62	12.51

La arcilla está compuesta principalmente por sílice (54.4%), alúmina (12.4%) y óxido de calcio (8.8%); y en menor proporción por óxido de hierro (4.6%) y óxidos alcalinos y alcalinotérreos, como óxidos de potasio (3.4%) y óxidos de magnesio (2.5%). La ratio  $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$  fue de 4.4. La proporción de silicio y aluminio en la arcilla indica que se trata de una arcilla tipo bentonita, ya que la ratio Si/Al se encuentra en el rango comprendido entre 4-6.

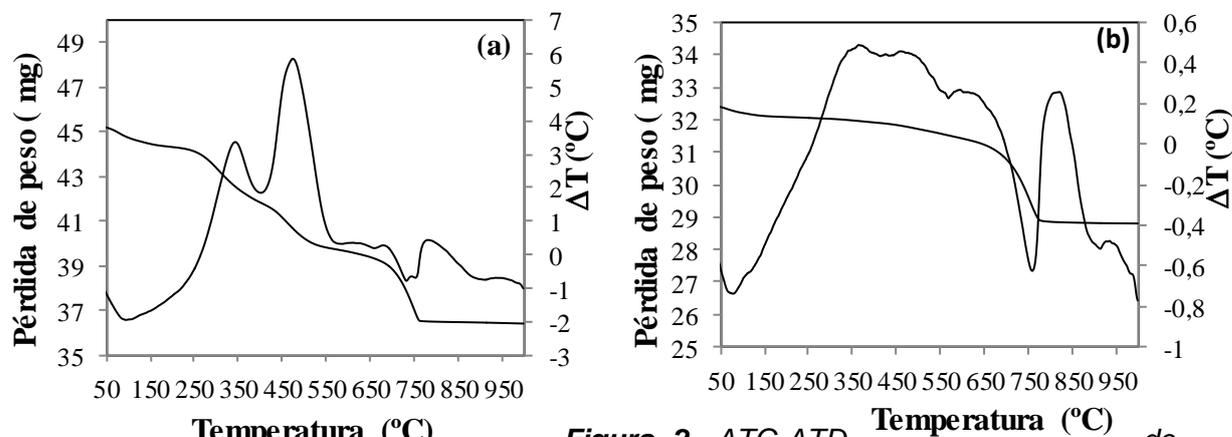
La Figura 1 muestra los patrones de DRX de las cenizas (CM) y de la arcilla. Las fases principales identificadas en las CM fueron  $\text{SiO}_2$  (código Ref: 01-077-1066) y  $\text{CaCO}_3$  (código Ref: 98-005-2151), de acuerdo con el análisis de FRX, en el que los componentes principales fueron Si y Ca. También se observaron menores contribuciones de silicatos de Al y Fe cristalinos ( $\text{AlKSi}_3\text{O}_8$  código de ref. 98-001-6597 y  $\text{Ca}_{5.74}\text{Fe}_{0.26}\text{Si}_6\text{O}_{18}$ ).

El patrón de difracción de la arcilla pura es complejo. Las fases principales identificadas fueron  $\text{SiO}_2$  (código Ref: 01-077-1066),  $\text{CaCO}_3$  (código Ref: 98-005-2151). Además, se observan picos de difracción correspondientes a dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) así como a la presencia de filosilicatos (F) y dentro de estos, se observaron picos de difracción correspondientes a illita (I).



**Figura 1.** DRX de la arcilla cruda (a) y de la ceniza de madera (b) (F: Filosilicatos, I: Illita)

La Figura 2 presenta los resultados de ATG-ATD de las materias primas. Entre 30 y 200 °C las CM presentan una leve pérdida de peso (1.6 %) debido a la pérdida de humedad como indica el pico endotérmico centrado a 98 °C. La combustión de la materia orgánica y de los elementos no quemados en el tratamiento térmico de la biomasa de partida, como carbono residual, tuvo lugar entre 200 y 650 °C con una pérdida de peso del 10.9%. La curva ATD muestra dos picos exotérmicos centrados a 340 °C y 475 °C, respectivamente. En el rango de temperaturas entre 650-800 °C la pérdida de peso fue del 7.4% observándose varios efectos térmicos. A 650 °C, se observa un ligero pico endotérmico debido a la eliminación del agua estructural de los iones hidróxido en el residuo. El pico exotérmico a 700 °C es probablemente debido a más reacciones de combustión de los elementos no quemados en la ceniza, mientras que el efecto endotérmico a 750 °C podría ser debido a la descomposición de los carbonatos en la ceniza, que emiten CO<sub>2</sub> [39].



(a) cenizas de madera y (b) arcilla

Figura 2. ATG-ATD de

Con relación a la arcilla, la pérdida de peso total fué del 11.2% y se asocia a la pérdida de materia orgánica durante la cocción, la eliminación del agua superficial y de los procesos de deshidroxilación, así como a la descomposición de los carbonatos. Entre 30 - 150 °C se observa una pérdida de peso del 1.0% debido a la pérdida de humedad de la arcilla, siendo visible en la curva de ATD un suave pico endotérmico a 85 °C. En el intervalo de temperaturas comprendido entre los 150 - 600 °C, la pérdida de peso fué del 2.2%, debido a la combustión de la materia orgánica (picos exotérmicos centrados a 375 y 475 °C) y a la deshidroxilación de los minerales de la arcilla (pico endotérmico centrado a 570 °C). Entre los 600 - 800 °C se produjo la descomposición de los carbonatos con la eliminación de CO<sub>2</sub>, con una pérdida de peso de 8.2%. (pico endotérmico centrado a 760 °C). Finalmente, a mayor temperatura, aparecen diferentes efectos exotérmicos centrados a 825 y 915 °C, asociados a la cristalización de fases de alta temperatura.

El análisis CNHS de las CM y de la arcilla (Tabla 2) mostró que la CM está compuesta principalmente por carbono (6.2%), hidrógeno (0.62%) y una pequeña cantidad de nitrógeno (0.20%) y azufre (0.03%). Según datos de CNHS y LOI, las cenizas de combustión de madera contienen elevadas cantidades de materia orgánica (10.4%). Estos datos indican una baja eficiencia de la combustión o una combustión incompleta de la biomasa [40,41]. Otros autores [42,43] afirman que la razón principal de la baja eficiencia de combustión, es la materia prima con baja densidad de energía o con alto contenido en humedad y/o cenizas.

Tabla 2. Contenido en material orgánica, carbonatos y CNH análisis de las materias primas

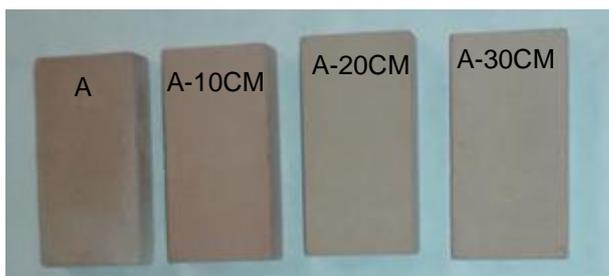
Muestra	Materia orgánica (a) (%)	Carbonatos (%)	%C	%H	%N	%S
Cenizas	10.41±0.09	17.25±0.76	6.15±0.03	0.622±0.021	0.204±0.006	0.025±0.001
Arcilla	2.29± 0.09	7.36± 0.33	2.25 ± 0.01	0.34±0.004	0.05 ± 0.002	0.032±0.008

<sup>(a)</sup>Determinado de acuerdo a la norma ASTM D-2974



**3.2. Caracterización de los ecoladrillos arcilla-cenizas madera**

Los ecoladrillos se fabricaron a partir de arcilla y cenizas de combustión de madera (CM) optimizando la cantidad de residuo a incorporar. En los ecoladrillos no aparecen defectos como grietas, hinchazón o eflorescencias después de la etapa de cocción. El color de las muestras cocidas con residuo, anaranjado, fue similar a las del ladrillo control, aunque la incorporación de cantidades crecientes de residuos produjo tonalidades algo más claras (Figura 3).



**Figura 3.** Ecoladrillos

La contracción lineal es un parámetro clave para los ladrillos cocidos y refleja el comportamiento de expansión/contracción durante el tratamiento térmico. La contracción lineal de la arcilla fue del -0.38% mostrando un comportamiento de expansión. La incorporación de CM produjo una mayor expansión, mostrando un comportamiento típico de cuerpos porosos (Tabla 3).

La pérdida de peso tras sinterización de las muestras incrementó a medida que se incorporaron mayores contenidos de cenizas de madera. Durante el proceso de cocción tiene lugar la descomposición de los componentes minerales en las reacciones de deshidroxilación, la combustión de la materia orgánica y la descomposición del carbonato cálcico tanto de la arcilla como de las cenizas de madera (Tabla 3).

**Tabla 3.** Contracción lineal, pérdida de peso tras sinterización y succión de agua de los ladrillos de arcilla y los ecoladrillos arcilla-cenizas madera

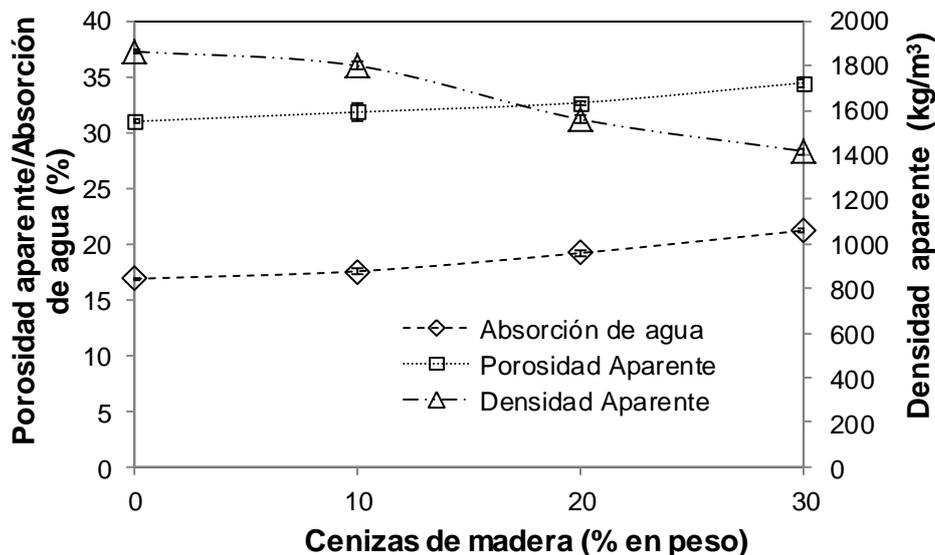
Muestra	Contracción lineal (%)	Pérdida de peso tras sinterización (%)	Succión de agua (kg/m <sup>2</sup> s)
A	-0.38± 0.10	12.10 ± 0.29	2.19 ± 0.07
A-10CM	-0.28 ±0.11	12.52± 0.07	2.60± 0. 03
A-20CM	-0.29 ±0.06	13.19 ± 0.06	2.94± 0. 04
A-30CM	-0.23 ±0.04	13.59 ± 0.11	3.28 ±0. 10

La succión de agua afecta significativamente a la calidad y durabilidad de los ecoladrillos. Los ladrillos control presentan una succión de agua de 2.19 kg/m<sup>2</sup> min. La adición de CM modificó ligeramente la succión de agua (Tabla 3), produciendo valores máximos de 3.3 kg/m<sup>2</sup> min con la incorporación del 30% en peso de residuo, por tanto la incorporación de CM produjo un incremento de la porosidad interconectada superficial. No obstante, en todos los caso se obtienen valores inferiores a 4.5 kg/m<sup>2</sup> min establecidos por la normativa RL-88, 2004 [44].

La figura 4 muestra la densidad aparente, porosidad aparente y la absorción de agua en función del contenido de cenizas de madera. La densidad aparente de los ladrillos control 1.865 kg/m<sup>3</sup> disminuyó a medida que se adicionan mayores cantidades de



residuo, reduciéndose un 8.5%, hasta 1.708 kg/m<sup>3</sup> con la adición del 30% en peso de CM. La porosidad aparente aumentó del 30.1% para los ladrillos control hasta el 34.5% para los ladrillos conteniendo la máxima cantidad de residuo incorporado. En cuanto a la absorción de agua, que es un factor clave para la durabilidad de los ladrillos y una medida indirecta de la porosidad abierta, también aumentó con la adición de CM con respecto al ladrillo control. La absorción de agua del ladrillo control fué del 16.2% obteniéndose el máximo valor, 21.2%, con la incorporación del 30% en peso de CM. El valor máximo de absorción de agua que establece la norma ASTM C67-07a: 2003 [45] depende tanto de la finalidad principal de los ladrillos como del medio ambiente al que son expuestos. Para ladrillos resistentes a condiciones climatológicas severas, la absorción de agua no puede ser superior al 17%. Para ladrillos resistentes a condiciones meteorológicas moderadas, la absorción de agua no puede ser superior a 22%, y no se establece límite para ladrillos no expuestos a la intemperie. Estos resultados indican que todos los ladrillos cumplen la normativa para su uso en condiciones meteorológicas moderadas.



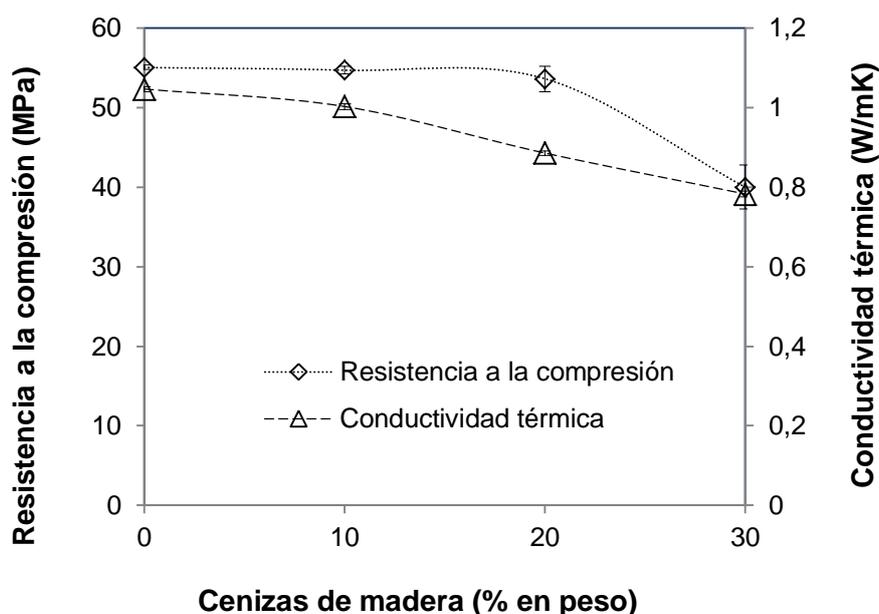
**Figura 4.** Densidad aparente, porosidad aparente y absorción de agua de los ecoladrillos en función de la adición de ceniza de madera

La resistencia a la compresión es el índice más crítico para materiales de construcción. La figura 5 muestra la resistencia a la compresión de los ecoladrillos en función del contenido en residuo. La resistencia a compresión del ladrillo control fué de 55.1 MPa. La adición de hasta el 20% de CM casi no cambió la resistencia a la compresión de los ladrillos obteniendo valores para esta propiedad mecánica de 54.7 MPa. La adición de hasta el 30% en peso de residuo reduce la resistencia mecánica a compresión hasta 40.0 MPa, un 27.4%. Por tanto, la alta porosidad abierta relacionada con poros alargados irregulares pueden actuar como concentradores de tensiones que disminuyen la resistencia a la compresión, mientras que los poros esféricos conducen a una resistencia a compresión relativamente alta. De acuerdo con la normas ASTM C62-10 [46] y EN-772-1 [37], la resistencia a la compresión varía de 10 MPa para el ladrillos



no expuestos a la intemperie a 20 MPa en el caso de estar expuestos a condiciones climáticas severas. Por tanto todos los ecoladrillos cumplen la normativa.

A pesar de que la porosidad disminuye las propiedades mecánicas de los ladrillos, puede ayudar a aumentar el aislamiento térmico del edificio, ya que la conductividad térmica está muy influenciada por la porosidad. La conductividad térmica disminuyó considerablemente a medida que se incorporaron adiciones crecientes de CM (figura 5). La conductividad térmica de los ladrillos depende de su densidad y por lo tanto de su porosidad. La adición del 10% de CM apenas modifica la conductividad térmica del ladrillo control, 1.05 W / mK, consiguiéndose una disminución del 15% (0.89 W / mK) y del 25% (0.78 W / mK) con la adición del 20 y 30% en peso de residuo, respectivamente. Por tanto, la incorporación de cenizas de madera en la formulación de ladrillos de arcilla tuvo un efecto más pronunciado en la conductividad térmica que en la densidad aparente [47]. Este hecho se puede atribuir a la porosidad total, así como, al tamaño y el tipo de porosidad (abierto o cerrado). La reducción de la conductividad térmica de los ecoladrillos puede suponer un ahorro de energía, siendo muy alentador su uso para aplicaciones en edificios.



**Figura 5.** Resistencia a la compresión y conductividad térmica en función del contenido en cenizas de madera

Debido al alto potencial de contaminantes en las cenizas de madera y para evaluar el grado de inmovilización logrado con su incorporación en ladrillos de arcilla, las concentraciones de lixiviado de las muestras control y de las de mayor contenido en residuo se analizaron mediante el método 1311 [38] establecido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) (Tabla 4). De todos los metales pesados identificados, As y Hg fueron los elementos más peligrosos, no obstante, de acuerdo con la concentración detectada, ambos elementos pueden ser clasificados como no peligrosos e inertes. Por tanto, la concentración de metales pesados obtenidos por lixiviación de los ecoladrillos con CM no superó los límites establecidos por la EPA



658/2009 [38] indicando que la incorporación de CM en ladrillos de arcilla es un método eficaz para la inmovilización de metales pesados.

**Tabla 4.** Resultados del test TCLP (ppm) de los ladrillos control y de los ecoladrillos con 30% de cenizas de madera y la concentración máxima permitido de contaminantes para residuos no peligrosos acordes con la legislación US-EPA

Componente (ppm)	Arcilla	A-30CM	Límites US-EPA (ppm)
As	0.025	0.022	5
Ba	0.096	0.376	100
Cd	0.0002	0.0001	1
Co	0.001	0.004	-
Cr	0.115	0.348	5
Cu	0.277	0.261	5
Ni	0.010	0.007	-
Pb	0.0001	0.0009	5
Sb	0.0010	0.0052	-
Se	0.005	0.005	1
Sn	0.00007	0.0001	-
V	0.138	0.217	-
Hg	0.00003	0.00007	0.2
Zn	0.004	0.017	300

#### 4. Conclusiones

Este estudio demuestra la viabilidad de la utilización de CM como un sustituto de la arcilla en la fabricación de ecoladrillos. A las muestras de arcilla se adicionaron desde el 0 al 30% en peso de cenizas de madera, fueron comprimidas y cocidas a 1.000 °C. Los resultados de esta investigación establecen las siguientes conclusiones:

1. La caracterización fisicoquímica, mineralógica y térmica de las cenizas de madera indica que tienen una composición apropiada para su uso como materia prima secundaria en la fabricación de ladrillos de arcilla.
2. La adición de CM modifica la densidad aparente de los ladrillos de arcilla, haciéndolos más ligeros. De hecho, todos los ladrillos con cenizas de biomasa tienen menor densidad aparente que los ladrillos control conteniendo sólo arcilla. Mientras que los valores de porosidad aparente y absorción de agua se incrementan con la adición de cenizas de madera, incrementando la porosidad total de los ladrillos, así como la porosidad abierta.
3. Los resultados indican que es posible obtener ladrillos de arcilla con un 20% en peso de CM que cumplan con los estándares tecnológicos, teniendo propiedades mecánicas similares a los ladrillos control pero mejores propiedades térmicas, con una reducción del 15% en la conductividad térmica.

#### Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Proyecto del plan propio de la Universidad de Jaén "Valorización de distintos tipos de cenizas para la obtención de nuevos materiales cerámicos sostenibles" (UJA2014 / 06/13), patrocinado por la Caja Rural de Jaén. Los autores agradecen también a Tableros Tradema, S.L., por el suministro de las cenizas, así como el apoyo técnico y humano de los CICT de la Universidad de Jaén (UJA, MINECO, Junta de Andalucía, FEDER).



## Referencias

- [1] C. Acikgoz, Renewable energy education in Turkey, *Renewable Energy* 36 (2011) 608-11.
- [2] I. Dincer. Renewable energy and sustainable development: a crucial review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 4 (2000) 157–75.
- [3] E. Ericsson, Co-firing – a strategy for bioenergy in Poland, *Energy* 32 (2007) 1838–47.
- [4] Directiva 2003/54/EC.
- [5] Plan de Acción Nacional de Energías Renovables (PANER) 2011-2020. Ministerio de Energía Industria y Turismo. Gobierno de España. <http://www.minetur.gob.es/energia/desarrollo/EnergiaRenovable/Paginas/Paner.aspx>
- [6] Comisión Europea, Potencial y aprovechamiento energético de la biomasa del olivar en Andalucía, 2002.
- [7] A. García-Maraver, M. Zamorano, A. Ramos-Ridao, L. F. Díaz, Analysis of olive grove residual biomass potential for electric and thermal energy generation in Andalusia (Spain), *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 6 (2012)745–751.
- [8] Agencia Andaluza de la Energía. La biomasa en Andalucía. Consejería de Empleo, Empresa y Comercio. Junta de Andalucía; 2015.
- [9] M. Cabrera, A. P. Galvin, F. Agrela, M. D. Carvajal, J. Ayuso, Characterisation and technical feasibility of using biomass bottom ash for civil infrastructures, *Construction and Building Materials* 58 (2014) 234–244.
- [10] L. L. Baxter, T. R. Miles, T. R. Miles Jr., B. M. Jenkins, T. Milne, D. Dayton, R. W. Bryers, L. L. Oden, The behavior of inorganic material in biomass-fired power boilers: field and laboratory experiences, *Fuel Processing Technology* 54 (1998) 47-78.
- [11] P. Ramchandra, Potential applications of rice husk ash waste from rice husk biomass power plant, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 53 (2016) 1468–85.
- [12] L. Zhang, Production of bricks from waste materials – a review, *Construction and Building Materials* 47 (2014) 643–655.
- [13] C. Leiva, C. Arenas, B. Alonso-Fariñas, L.F. Vilches, B. Peceño, M. Rodríguez-Galán, F. Baena, Characteristics of fired bricks with co-combustion fly ashes, *Journal of Building Engineering* 5 (2016) 114–118.
- [14] J. Cuenca, J. Rodríguez, M. Martín-Morales, Z. Sánchez-Roldán, M. Zamorano, Effects of olive residue biomass fly ash as filler in self-compacting concrete, *Construction and Building Materials* 40 (2013) 702–709.
- [15] S.V. Vassilev, D. Baxter, L. K. Andersen, C.G. Vassileva, An overview of the composition and application of biomass ash. Part 2. Potencial utilization, technological and ecological advantages and challenges, *Fuel* 105 (2013) 19-39.
- [16] P. Sherwood, *Alternative Materials in Road Construction*, 2nd ed.; Thomas Telford Ltd.: London, UK, 2011.
- [17] E. Oburger, A. Jäger, A. Pasch, A. Dellantonio, K. Stampfer, W. W. Wenzel, Environmental impact assessment of wood ash utilization in forest road construction and maintenance — A field study, *Science of the Total Environment* 544 (2016) 711-721.
- [18] R. del Valle-Zermeño, J.M. Chimenos, J. Giró-Paloma, J. Formosa, Use of weathered and fresh bottom ash mix layers as a subbase in road constructions: Environmental behavior enhancement by means of a retaining barrier, *Chemosphere* 117 (2014) 402-409.
- [19] T. Hemalatha, MaitriMapa, Neenu George, SaptarshiSasmal, Physico- chemical and mechanical characterization of high volume fly ash incorporated and engineered cement system towards developing greener cement, *J. Clean. Prod.* 125 (2016) 268-281.



- [20] M. Rafieizonooz, J. Mirza, M. RazmanSalim, M. WaridHussin, E. Khankhaje, Investigation of coal bottom ash and fly ash in concrete as replacement for sand and cement, *Construction and Building Materials* 116 (2016) 15-24.
- [21] I. Garcia-Lodeiro, V. Carcelen-Taboada, A. Fernández-Jiménez, A. Palomo, Manufacture of hybrid cements with fly ash and bottom ash from a municipal solid waste incinerator, *Construction and Building Materials* 105 (2016) 218-226.
- [22] V. I. E. Ajiwe, C. A. Okeke, F. C. Akigwe, A preliminary study of manufacture of cement from rice husk ash, *Bioresource Technology* 73 (2000) 37–39.
- [23] R. Barbosa, N. Lapa, D. Dias, B. Mendes, Concretes containing biomass ashes: Mechanical, chemical, and ecotoxic performances, *Construction and Building Materials* 48 (2013) 457–463.
- [24] R. C. E. Modolo, V. M. Ferreira, L. A. Tarelho, J. A. Labrincha, L. Senff, L. Silva, Mortar formulations with bottom ash from biomass combustion, *Construction and Building Materials* 45 (2013) 275–281.
- [25] B. Carrasco, N. Cruz, J. Terrados, F. A. Corpas, L. Pérez, An evaluation of bottom ash from plant biomass as a replacement for cement in building blocks, *Fuel* 118 (2014) 272–280.
- [26] F. Andreola, M.I. Martín, A.M. Ferrari, I. Lancellotti, F. Bondioli, J.Ma. Rincón, M. Romero, L. Barbieri, Technological properties of glass-ceramic tiles obtained using rice husk ash as silica precursor, *Ceramic International* 39 (2013) 5427-5435.
- [27] N. Quaranta, M. Unsen, H. López, C. Giansiracusa, J.A. Roether, A. R. Boccaccini, Ash from sunflower husk as raw material for ceramic products, *Ceramic International* 37 (2011) 377-385.
- [28] C. Leiva, C. Arenas, B. Alonso-fariñas, L.F. Vilches, B. Peceño, M. Rodriguez-Galán, F. Baena, Characteristics of fired bricks with co-combustion fly ashes, *Journal of Building Engineering* 5 (2016) 114-118.
- [29] T.Çiçek, Y.Çinçin, Use of fly ash in production of light-weight building bricks, *Construction and Building Materials* 94 (2015) 521-527.
- [30] A. Ukwatta, A. Mohajerani, S. Setunge, N. Eshtiaghi, Possible use of biosolids in fired-clay bricks, *Construction and Building Materials* 91 (2015) 86-93.
- [31] Vishakha. V. Sakhare, Rahul V. Ralegaonkar, Use of bio-briquette ash for the development of bricks, *Journal of Cleaner Production* 112 (2016) 684-689.
- [32] K.C.P. Faria, R.F. Gurgel, J.N.F. Holanda, Recycling of sugarcane bagasse ash waste in the production of clay bricks. *Journal of Environmental Management* 101 (2012) 7-12.
- [33] ASTM D-2974, 1987, Standard test method for moisture, ash, and organic matter of peat and other organic soils.
- [34] C326: 1997, Test Method for Drying and Firing Shrinkage of Ceramic Whiteware Clays, American Society for Testing and Materials.
- [35] ASTM, 1994a, ASTM C373 – Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products. American Society for Testing and Materials.
- [36] UNE-EN 772-1:2001, Methods of test for masonry units – Part 11: Determination of water absorption of aggregate concrete, manufactured stone and natural stone masonry units due to capillary action and the initial rate of water absorption of clay masonry units.
- [37] UNE EN 772-1:2011, Methods of test for masonry units – Part 1: Determination of compressive strength.



- [38] U.S. Environmental Protection Agency, Method 13–11 Toxicity Characteristics Leaching Procedure (TCLP). Federal Register, Washington, DC, vol. 51, 1992; 61: pp. 11798–11877.
- [39] R. C. E. Modolo, T. Silva, L. Senff, L. A. C. Tarelho, J. A. Labrincha, V.M. Ferreira VM, L. Silva, Bottom ash from biomass combustion in BFB and its use in adhesive-mortars, Fuel Processing Technology 129 (2015) 192–202.
- [40] O. Dahl, H. Nurmesniemi, R. Poykio, G. Watkins, Comparison of the characteristics of bottom ash and fly ash from a medium-size (32 MW) municipal district heating plant incinerating forest residues and peat in a fluidized-bed boiler, Fuel Processing Technology 90 (2009) 871–8.
- [41] M. Kuokkanen, R. Poykio, T. Kuokkanen, H. Nurmesniemi, Wood ash—a potential forest fertilizer. Energy research at the University of Oulu. In: Proceedings of the EnePro conference, June 3rd, 2009, Finland. p. 89–93, ISBN 978-951-42-9154-8.
- [42] Y. Huang, J. T. McMullan, B. C. Williams, Influences of coal type on the performance of a pressurised fluidised bed combustion power plant, Fuel 79 (2000) 1595–601.
- [43] Y. Huang, D. McIlveen-Wright, S. Rezvani, N. Wang, Y. D. Hewitt, B. C. Williams, Biomass co-firing in a pressurized fluidized bed combustion (PFBC) combined cycle power plant: a techno-environmental assessment based on computational simulations, Fuel Processing Technology 87 (2006) 927–34.
- [44] RL-88. Pliego general de condiciones para la recepción de los ladrillos cerámicos en las obras de construcción, Actualizado en 2004.
- [45] ASTM C 67-03: 2003. Standards tests method for sampling and testing bricks and structural clay tile. American Society for Testing and Material, PA, USA.
- [46] ASTM C62-10: 2010. Standard Specification for Building Brick (Solid Masonry Units Made From Clay or Shale), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [47] K. A. Abdul, M. Abbas, R. Felicity, B. John, Density, strength, thermal conductivity and leachate characteristics of light-weight fired clay brick incorporating cigarette butts, International Journal of Civil Engineering and Technology 2-4 (2010) 179-84.