

Estudio del procesamiento cerámico de las arcillas de la vereda “La Codicia” (Guapi, Colombia) para potencializar su uso en la elaboración de piezas cerámicas

Study of the ceramic processing of clays from “La Codicia” (Guapi, Colombia) for their potential use in the elaboration of ceramic pieces

Javier Andrés Muñoz Chaves^{a*} *Rodrigo Arbey Muñoz Menese*^a,
Paulino Mancill^b, *Jorge Enrique Rodríguez Páez*^a

^aGrupo CYTEMAC. Departamento de Física-FACNED. Universidad del Cauca. Calle 5 N.º 4-70. Popayán, Cauca, Colombia.

^bAsociación de Productores del Pacífico-SENA. Guapi, Cauca, Colombia.

(Recibido el 13 de marzo de 2007. Aceptado el 10 de agosto de 2007)

Resumen

En este trabajo se determinaron las características de un material arcilloso de la región de Guapi, Cauca, Colombia. Se estableció, además, una metodología para definir las condiciones más adecuadas para conformar piezas cerámicas. Para ello se analizó la composición química, características estructurales y comportamiento térmico de la materia prima de interés, utilizando análisis de fluorescencia de rayos X (FRX), difracción de rayos X (DRX) y análisis termogravimétrico (ATD/TG), respectivamente. Posteriormente, se estudiaron las diferentes etapas del procesamiento cerámico poniendo atención a la dosificación de la pasta cerámica, el prensado de las piezas, su secado y sinterización, controlando variables como presión de conformado, pérdida de peso, tiempo de secado, densidad en verde y temperatura de sinterización, entre otras. Para lograr un adecuado secado de las muestras fue necesario mantenerlas en un ambiente con humedad controlada durante ~7 días. Independiente de la composición de las pastas, para obtener piezas densificadas, fue necesario sinterizar a temperaturas mayores a 1.000 °C considerando que a 950 °C se presentó desdensificación de la muestra ocasionada, posiblemente, por un fenómeno de tipo “Ostwald ripening” en la porosidad.

----- *Palabras clave:* arcillas, caracterización, procesamiento cerámico, conformado, secado, sinterización.

* Autor de correspondencia: teléfono 57 +7 +820 98 00 ext. 2410, fax 57+7+820 98 60, correo electrónico: jmunozchaves@unicauca.edu.co (J. Muñoz).

Abstract

In this work the characteristics of a clay from the region of Guapi, Cauca, Colombia were determined. Also, a methodology was established to define the conditions to conform ceramic pieces. Chemical structure, characteristic composition and thermal behavior of raw material were determined using X-ray fluorescence, (FRX), X-ray diffraction (DRX) and thermal gravimetric analysis (ATD/TG), respectively. Different stages of the ceramic processing were studied paying attention to dosage of the ceramic pastes, pressing of the pieces, drying and sintering. Variables controlled were shaping pressure, lost of weight, time of drying, density in green and sintering temperature, among others. To achieve an appropriate drying it was necessary to maintain the samples in a controlled humidity atmosphere during about 7 days. Independent of the composition of the pastes, sintering above 1000 °C was necessary to obtain high density samples considering that at 950 °C des-density of samples was observed probably due to “Ostwald ripening” type phenomenon.

----- *Key words:* Clays, characterization, shaped, ceramic processing, drying, sintering.

Introducción

La arcilla es una materia prima que presenta múltiples aplicaciones tecnológicas. Se utiliza tanto para la elaboración de cerámica tradicional como para nuevos materiales útiles en la actualidad [1]. Es un mineral complejo constituido por aluminosilicatos hidratados, comúnmente acompañados de otros minerales tales como hierro, calcio, magnesio y titanio. Estructuralmente están constituidos por láminas de tetraedros SiO_4 y octaedros AlO_6 . La combinación de estas láminas forma diferentes tipos de estructuras arcillosas que a su vez dan origen a paquetes, que al combinarse generan las placas de mineral arcilloso [2].

El proceso utilizado para la elaboración de un producto cerámico involucra las siguientes etapas básicas: preparación de la pasta cerámica, conformado de la pieza, secado y cocción de la misma; en algunas ocasiones se incluyen otras etapas de acuerdo con las características que se busquen en el material acabado [3]. En general, al material arcilloso extraído de las minas se le adiciona agua, fundentes y defloculantes para modificar su composición y plasticidad. La mezcla de estos compuestos debe permitir la obtención de una pasta cerámica homogénea que se conforma normalmente por presión o extrusión para obtener la pieza “en verde”. Esta pieza se somete a una etapa de secado tal que las partículas de arcilla que están virtualmente rodeadas por una película muy fina de agua pierden la misma a medida que avanza el proceso, ocasionando que la distancia entre partículas disminuya, generando contracción del material [4]. Durante el secado, el control de la velocidad de eliminación de agua es crítico. El secado en la parte interna de un cuerpo se realiza a través de la difusión de moléculas de agua hasta la superficie donde ocurre la evaporación. Si la velocidad de evaporación es mayor que la velocidad de difusión, la superficie se secará más rápidamente que el interior, ocasionando, con una alta probabilidad, la formación de defectos tales como distorsión de la red y fisuras. La velocidad de evaporación puede ser controlada mediante la temperatura, humedad y velocidad del flujo de aire [3].

Si las piezas se dejan mucho tiempo fuera del secadero, estas volverán a absorber moléculas de agua del aire hasta que alcancen el equilibrio a la presión de vapor de la atmósfera que las rodea, esto debido a la capacidad higroscópica de las arcillas, fenómeno que resulta bastante antieconómico y crítico para la calidad de los productos obtenidos. Después de secar la pieza ésta se somete a cocción, sinterización, a una temperatura que depende de la composición y de las propiedades de la pieza final; durante esta etapa ocurre la disminución de la porosidad del material, ocasionando que la densidad aumente y se mejore la resistencia mecánica del mismo [5].

Durante la sinterización, los procesos de transporte de masa son cruciales en la densificación de la pieza en verde. En la etapa inicial de la sinterización se forman cuellos entre las partículas que están en contacto debido principalmente a mecanismos de difusión superficial y evaporación-condensación; en esta etapa no hay densificación [6]. Al aumentar la temperatura se genera un límite de grano dentro de cada cuello y cada cavidad intersticial entre partículas se convierte en un poro; en este instante de la sinterización hay un transporte de masa hacia la zona del cuello a través del volumen y el borde de grano; a medida que progresa la sinterización, los poros se hacen más pequeños y más esféricos [6]. La fuerza motriz para la sinterización es la reducción del área total de las superficies de las partículas por lo que las nanopartículas son muy activas durante este proceso.

En los materiales cerámicos todos estos procesos se ven acelerados por la formación de una fase amorfa, líquida o viscosa, que fluye hacia los poros y en parte llena su volumen [7]. El grado de vitrificación de la pieza depende de la temperatura de cocción y del tiempo, así como de la composición del cuerpo; la temperatura a la cual se forma la fase líquida disminuye al adicionar fundentes, tales como los feldspatos. Esta fase fundida fluiría a alrededor de las partículas no fundidas y llenaría los poros debido a fuerzas de tensión superficial (o acción capilar);

la contracción de la pieza acompaña este proceso. Al enfriar, esta fase fundida forma una matriz vítrea que favorece la formación de un cuerpo resistente y denso [4, 5]. Durante la sinterización, en las piezas ocurre un conjunto de reacciones y transformaciones después de las cuales ellas pierden irreversiblemente su plasticidad y se forma el cuerpo cerámico con su estructura y sus características definitivas.

La velocidad de sinterización se eleva a medida que aumenta la temperatura de tratamiento pero después de la aparición de la fase líquida, en la arcilla cocida, la velocidad disminuye momentáneamente a causa de la pérdida de difusión del oxígeno proveniente del aire; el valor máximo de la velocidad ocurre aproximadamente a los 800 °C [3].

Otro proceso importante que tiene lugar durante la sinterización de la pieza cerámica está relacionada con el incremento del tamaño de los poros grandes mientras el número total de poros decrece, todo esto debido a que existen en el material gradientes de concentración originados por la diferencia en solubilidades que se presenta en la fase líquida: mayor solubilidad en los poros pequeños que en los grandes [6]. Por esta razón, se da un crecimiento de los poros grandes a expensas de los poros pequeños, ocasionando que la densidad decrezca al someterla a prolongados tiempos de sinterización; este proceso es conocido como “Ostwald ripening” [6].

Dada la importancia de tener un control sobre las variables que influyen en el procesamiento cerámico y que permitan obtener piezas con propiedades adecuadas, garantizando la reproducibilidad de las mismas, en este trabajo se realizó el estudio del procesamiento cerámico para elaborar piezas cerámicas utilizando como materia prima material arcilloso de la región de Guapi, Cauca. Considerando los resultados de la caracterización físico-química de la arcilla y del estudio de conformado, secado (evaluando pérdida de peso y contracción) y sinterización, se estructuró una metodología para favorecer la densificación de las piezas finales.

Experimentación

El depósito del material arcilloso que se estudió se encuentra ubicado en la República de Colombia departamento del Cauca, municipio de Guapi, vereda La Codicia, la cual tiene un área de 3,8 ha. Para el estudio de exploración y evaluación del depósito de arcilla se diseñó una red de perforaciones teniendo en cuenta la distancia entre las excavaciones y su profundidad, además del color, textura y plasticidad de las arcillas; se encontró material arcilloso de un color amarillo/café, en la parte superficial del depósito, y en la parte más profunda una arcilla de color gris con presencia de franjas de arcilla roja, las cuales se rotularon como ARGU-I y ARGU-II respectivamente, y fueron los materiales base para el presente estudio.

Caracterización de la materia prima

Inicialmente las muestras fueron caracterizadas utilizando análisis de fluorescencia de rayos X (FRX) para conocer los elementos presentes en las muestras como óxidos, para ello se utilizó un espectrómetro de fluorescencia de rayos X PW – 2440 Philips. La identificación de las fases cristalinas presentes en los sólidos se realizó utilizando difracción de rayos X (DRX), empleando un difractómetro Siemens D-5000. Además, para determinar el efecto de los tratamientos térmicos sobre las arcillas, se utilizó análisis térmico diferencial, ATD, y gravimétrico, TG.

Así mismo, se determinaron los límites de Atterberg (límite líquido y plástico), índice de plasticidad y peso específico, haciendo uso de la metodología que se indica en la Norma Técnica Colombiana 1493 de Suelos, correspondiente a la norma ASTM D 4318.

Dosificación de la pasta cerámica

Se realizaron mezclas en proporciones 50:50 y 75:25, de las muestras ARGU-I y ARGU-II, para observar variaciones en las propiedades de la pieza conformada, tales como la contracción, pérdida de peso y densidad de la pieza, tanto en “verde” como en la pieza sinterizada.

Conformado de piezas

El conformado de las piezas se realizó simulando el proceso de extrusión que se utiliza normalmente en planta. Inicialmente se mezcló el material arcilloso con el fin de obtener una materia prima homogénea que posteriormente fue introducida en un troquel, diseñado en el laboratorio, al cual se le aplicó una presión uniaxial para conformar probetas de dimensiones 10 x 20 x 50 mm, aproximadamente; es de resaltar que el material arcilloso se trabajó con su humedad natural. De este ensayo se determinó la presión de conformado óptima a partir de las curvas presión, en función de la densidad en verde, de las piezas conformadas.

Secado y sinterización

Obtenidas las probetas, se realizó el proceso de secado de las mismas, poniendo atención a la formación de fisuras debido a cambios bruscos de temperatura y a su densificación. Para esto las probetas se colocaron inicialmente en un desecador, para controlar la humedad del medio, y después de unos días se trasladaron a una estufa, a una temperatura entre 100 y 120 °C, hasta que alcanzaron peso constante; de este proceso se obtuvo un registro de la pérdida de peso y la contracción de las probetas, en función del tiempo, durante su estancia en el desecador y en la estufa de secado.

Posterior al secado de la muestra se procedió a la sinterización de la pieza. Para realizar el estudio de sinterabilidad de las muestras se diseñó un cronograma de calentamiento teniendo en cuenta los resultados de ATD/TG de la materia prima, esto para garantizar que todos los procesos físico-químicos que ocurren en el sistema se den de manera controlada y se alcance la mayor densificación de las piezas. La rampa de calentamiento utilizada, para sinterizar una muestra a 1.000 °C, se indica en la figura 1.

De las muestras sinterizadas se obtuvo información sobre la pérdida de peso, la contracción y la densificación que experimentaron las piezas después de ser sometidas al tratamiento térmico.

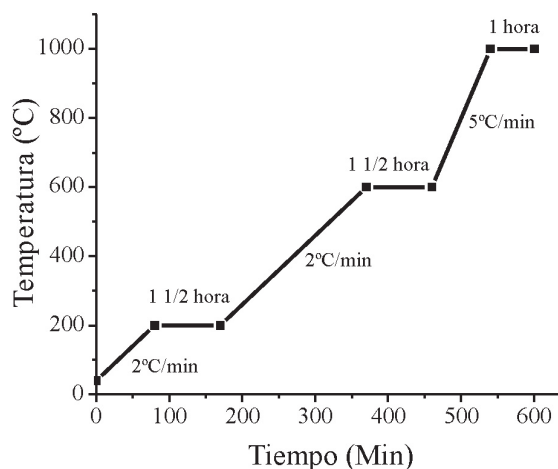


Figura 1. Cronograma de calentamiento utilizado para sinterizar una muestra a 1.000 °C, durante 1 hora

Además se obtuvieron las curvas de porcentaje de absorción de agua, en función de la temperatura, para estimar de manera indirecta la evolución de la porosidad en las piezas sinterizadas.

Resultados y discusión

Caracterización de la materia prima

Límites de Atterberg y peso específico

Las propiedades físicas generales del material arcilloso estudiado indicaron que el peso específico de las muestras era de 2,58, ARGU-I y 2,76, ARGU-II, lo que clasificó el material como mineral arcilloso inorgánico. En tanto que para los límites líquido y límite plástico, se obtuvieron valores de 74,40 y 28,1% para ARGU-I, y 88,25 y 28,1% para la muestra ARGU-II, lo que se tradujo en un índice de plasticidad del 46,30 y 60,15 respectivamente. De acuerdo con estos resultados, según el sistema unificado de clasificación de suelos (USCS), este material arcilloso se puede clasificar como CH (arcilla de alta plasticidad).

Fluorescencia de rayos X

La composición química obtenida por FRX, de las muestras estudiadas, se indica en la tabla 1.

Tabla 1 Resultados de fluorescencia de rayos X de las muestras estudiadas

<i>Compuesto</i>	<i>ARGU-I</i>	<i>ARGU-II</i>
Al ₂ O ₃	22,384%	27,536%
CaO	0,048%	0,043%
Fe ₂ O ₃	4,842%	1,247%
K ₂ O	0,613%	0,924%
MgO	1,041%	0,384%
MnO	0,016%	0,005%
Na ₂ O	0,209%	0,312%
P ₂ O ₅	0,015%	0,022%
SiO ₂	60,675%	60,268%
TiO ₂	1,079%	1,582%

De los resultados indicados en la Tabla 1 se pueden resaltar los elevados contenidos de sílice y alúmina en los sólidos, así como el alto porcentaje de óxido de hierro en la muestra ARGU-I, lo que justifica su color amarillo/café, y de óxido de titanio en ARGU-II, tonalidad gris.

Difracción de rayos X

En la figura 2 se muestran los difractogramas de rayos X obtenidos para ARGU-I y ARGU-II. Se aprecian los picos representativos del cuarzo, algunos filosilicatos y de la caolinita [8].

Análisis térmico diferencial y termogravimétrico

Las curvas de ATD y TG obtenidas para las muestras estudiadas se indican en la figura 3.

Las curvas de ATD/TG de las muestras presentan picos endotérmicos a 77 y 232 °C para ARGU-I y a 94 y 261 °C para ARGU-II, que se pueden relacionar con su deshidratación; estos picos están acompañados con una pérdida de masa por parte de los sólidos. El pico endotérmico alrededor de los 500 °C se puede asociar a un proceso de deshidroxilación. Cabe anotar que la pérdida de masa en la muestra ARGU-II es mayor que en

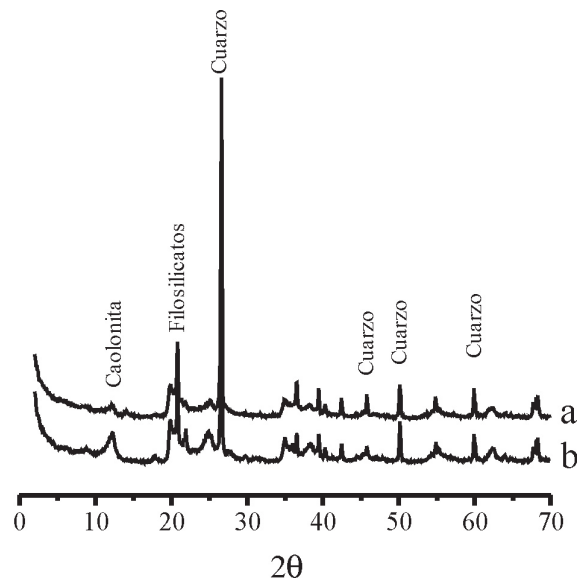


Figura 2 Difractogramas de rayos X correspondientes a: (a) ARGU-I y (b) ARGU-II

ARGU-I, 6,48% frente a 3,94, valor que reitera el comportamiento altamente plástico que presenta la primera. Un pequeño pico exotérmico, alrededor de los 950 °C, corresponde posiblemente a la descomposición del carbonato de calcio y a la transformación de γ -Al₂O₃ a α -Al₂O₃ [9, 10].

Conformado de las piezas

Para el conformado de las probetas se utilizaron presiones de 3.400 psi (~23,43 Mpa), 4.000 psi (~27,56 Mpa) y 4.600 psi (~31,70 MPa), obteniéndose las curvas de compactación, densidad en función de la presión, que se indican en la figura 4.

Durante el conformado de las probetas, a la muestra de arcilla ARGU-I fue necesario adicionarle un poco de agua (10 ml) para darle mayor plasticidad y poder obtener una pieza mejor conformada.

En la figura 4 se observa, de manera general, que a medida que se aumenta la presión aplicada, la densidad en verde de las muestras también

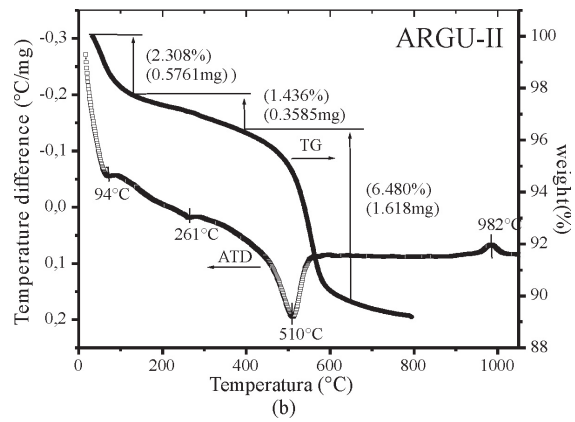
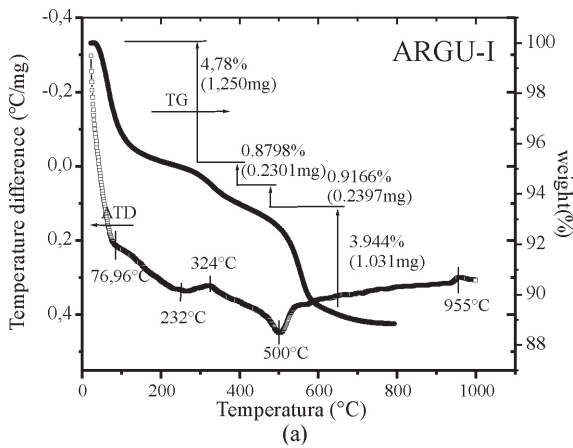


Figura 3 Curvas de ATD/TG correspondientes a: a) ARGU-I y b) ARGU-II

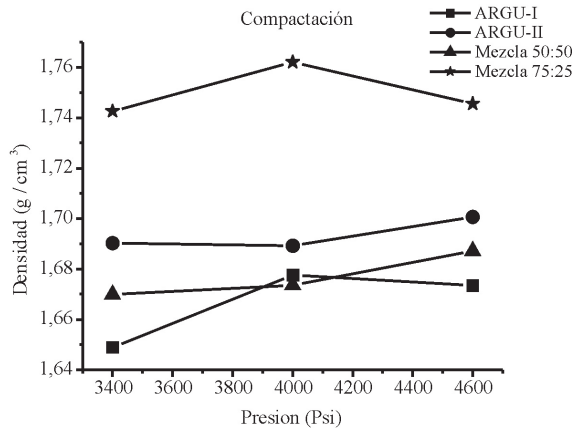


Figura 4 Curvas de compactación de las muestras arcillosas estudiadas

aumenta. La muestra ARGU-II presenta una mayor densidad que ARGU-I, resultado que se ve reflejado en el comportamiento de la muestra 50:50, una densificación en verde intermedia, y en la de 75:25 que presenta un aumento apreciable de la densidad.

Secado de las piezas

Como ya se mencionó, una etapa importante en el conformado de las piezas cerámicas es el secado de las mismas, previo a su sinteriza-

ción. Si esta etapa no se realiza adecuadamente cualquier cambio brusco de temperatura puede ocasionar fisuras en las piezas o una deficiente densificación [11].

En el presente trabajo se realizó el secado de las muestras en dos etapas, tal como se indica en la figura 5.

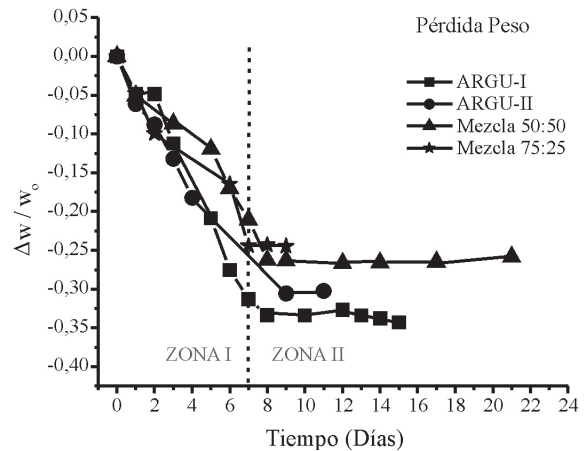


Figura 5 Curvas de pérdida de peso de las muestras prensadas a 4.600 psi (~31,7 MPa), durante su secado

En la zona 1 se muestra la pérdida de peso de las muestras, en verde, dentro de un desecador,

el cual permitió controlar la humedad del medio, condición que se estableció para reducir la humedad de las muestras; el valor inicial de la humedad dentro del desecador fue de 5% y alcanzó valores hasta del 50% después de introducir las probetas. Durante la estancia de las muestras en el desecador, tal como lo ilustra la figura 5, se presenta la mayor pérdida de peso de las mismas, alrededor de un 20-30% en peso, entre 6 y 7 días.

En la zona 2, el secado de las piezas se realizó en una estufa, a una temperatura entre 100 y 120 °C, para completar el ciclo de reducción de humedad de las muestras. Las muestras alcanzaron peso constante al cabo de 5-6 días después del tratamiento en el desecador; la disminución en el peso de la muestra, durante la etapa del secado, fue de alrededor del 3%.

Puesto que durante la etapa de secado se presentaron variaciones en las dimensiones de las piezas, se realizó paralelamente el seguimiento de la contracción de las mismas; en la figura 6 se muestran los resultados más importantes.

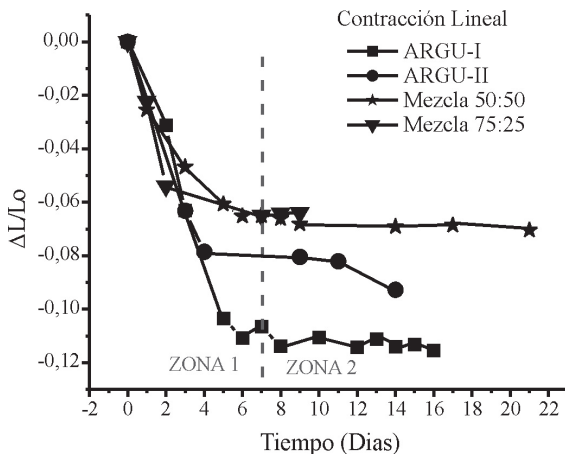


Figura 6 Curvas de contracción lineal de las muestras cerámicas prensadas a 4600 psi (~31,7 MPa), durante su secado

La contracción que presentaron las probetas está de acuerdo con los resultados de pérdida de peso observada en la figura 5; durante la estancia en el desecador (zona 1) las muestras presentaron

una contracción entre el 6 y el 11%, en un tiempo de 6-7 días.

La diferencia en contracción que se observa entre las muestras ARGU-I y ARGU-II se puede justificar si se considera el agua que se adicionó a la muestra ARGU-I para mejorar su plasticidad, y por lo tanto su trabajabilidad, para conformar las probetas. Por otro lado, se presentan variaciones apreciables entre las muestras ARGU-I y ARGU-II y las mezclas 50:50 y 75:25 lo que pone en evidencia el efecto del mezclado de arcillas que presentan índices de plasticidad diferentes. Las muestras que presentaron menor pérdida de peso y contracción fueron las mezclas 50:50 y 75:25.

Sinterización de las piezas

La pérdida de peso que experimentaron las muestras sinterizadas, a diferentes temperaturas, se indica en la figura 7.

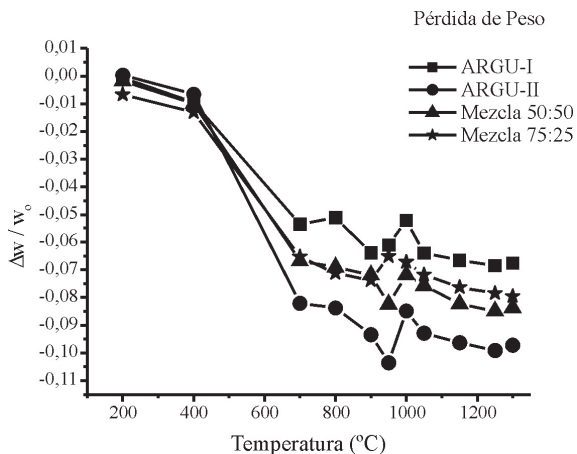


Figura 7 Curvas de pérdida de peso durante la sinterización de las muestras prensadas a 4.600 psi (~31,7 MPa), después del proceso de secado del material arcilloso estudiado

Durante la etapa de sinterización, las probetas presentaron una gran pérdida de masa, del 7 al 8%, entre los 400 y 700 °C, debido a la deshidroxilación de la estructura tal como lo indican los resultados ATD/TG (figura 3). Otra

significativa pérdida de masa, 2%, se observa alrededor de los 900 °C debido, probablemente, a la descomposición de los carbonatos de calcio que pueden existir en las muestras [9].

Durante la sinterización las piezas experimentan contracción; en la figura 8 se indica la contracción longitudinal, $\Delta L/L_0$, en función de temperatura para las diferentes muestras estudiadas.

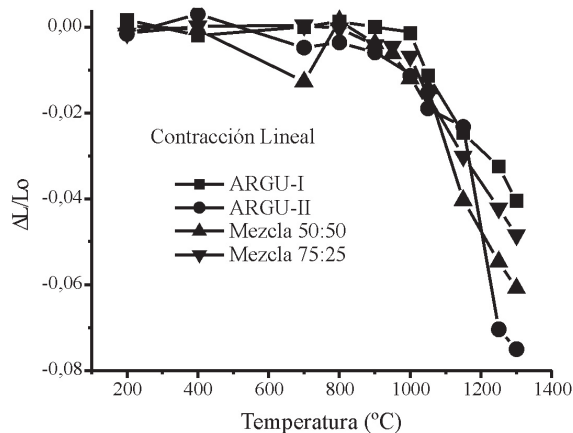


Figura 8 Curvas de contracción de las muestras sinterizadas

La figura 8 indica que la máxima contracción la presentó la muestra ARGU-II (7,5%). La muestra ARGU-I contrajo un poco menos, 4%, y un comportamiento intermedio presentaron las mezclas: 6% para la 50:50 y 4,8% para la 75:25, tal que esta última presentó un comportamiento semejante a ARGU-I ya que contenía mayor proporción de la misma. En general, las piezas comenzaron a contraer de manera apreciable a partir de los 1.000 °C y no se alcanzó una condición estable aun para temperaturas tan altas como 1.300 °C.

Un parámetro importante, para cualquier pieza cerámica sinterizada, es la densificación que esta puede alcanzar durante el proceso. En la figura 9 se muestra la evolución de la densificación de las piezas estudiadas en función de la temperatura.

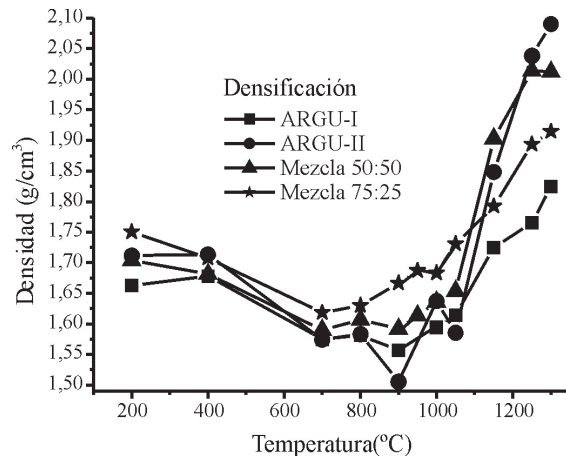


Figura 9 Curvas de densificación de las piezas sinterizadas

En general se observa un mínimo de densificación a 900 °C que se puede deber a la pérdida de masa de las piezas y al desarrollo del fenómeno denominado “Ostwald ripening”, proceso donde los poros grandes crecen a expensas de los poros pequeños produciéndose un proceso de desdensificación [6]. La muestra que presenta mayor densificación es ARGU-II si se compara con ARGU-I. Este comportamiento se puede explicar considerando la granulometría de estos materiales; mientras ARGU-I presenta una distribución de partículas amplia, ARGU-II está constituida por partículas más pequeñas (99% pasante tamiz 200) y por lo tanto más reactivas, lo que favorece la densificación de la pieza tal como se indica en la figura 8. Además, los DRX (figura 2) indican una mayor presencia de caolín en ARGU-II que en ARGU-I, siendo este compuesto el que aporta estas partículas.

El ensayo de absorción de agua que se les realizó a las muestras sinterizadas (figura 10) permitió obtener información, de manera indirecta, sobre la evolución de la porosidad en las mismas; en la figura 10 se representa el porcentaje de absorción de agua en función de la temperatura de sinterización, parámetro de gran interés para determinar el grado de densificación de la pieza y que permite, junto con la curva de contracción, obtener el valor de la gresificación del cerámico [12].

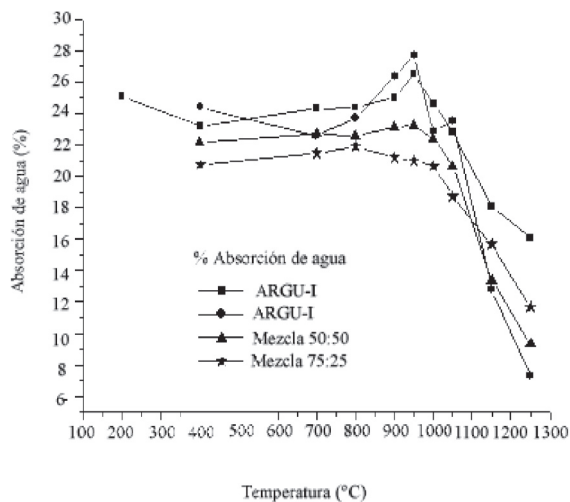


Figura 10 Curvas de absorción de agua, en función de la temperatura de sinterización, para las muestras arcillosas estudiadas

Observando las curvas de absorción de agua (figura 10) es evidente un máximo de absorción de agua, 26,5 y 28,5% para las muestras ARGU-I y ARGU-II respectivamente, en el rango de temperatura entre 900 y 950 °C y que coincide con el mínimo de densificación a ~900 °C, (figura 9) que presentan las muestras. El comportamiento de las curvas de la figura 10 indica que para temperaturas menores a 900 °C la porosidad de las muestras es prácticamente constante pero entre 900 y 950 °C la porosidad se incrementa ocasionando la máxima absorción de agua. En este intervalo de temperatura se debe presentar, como se indicó anteriormente, el colapso de los poros (fenómeno denominado “Ostwald ripening”). Para temperaturas mayores a 950 °C, el porcentaje de absorción de agua disminuye indicando que los poros comienzan a perder su interconexión y a cerrarse favoreciéndose, por lo tanto, la densificación de las piezas, tal como lo muestra la figura 9.

Considerando los resultados de las figuras 8, 9 y 10 se puede concluir que para obtener una buena densificación de la muestra es necesario sinterizar las piezas a temperaturas mayores a 1.000 °C. La curva de contracción (figura 8) no permitió determinar la temperatura óptima de sinterización de

las muestras debido a que no se alcanzó, para las temperaturas utilizadas, la máxima densificación de las mismas.

Conclusiones

De los resultados del presente trabajo se puede concluir lo siguiente:

- Las curvas de compactación indican que la muestra que presentó la mayor densidad “en verde”, para las presiones utilizadas, fue la mezcla 75:25. Además, debido a que la muestra ARGU-I exhibe una baja plasticidad presenta un bajo valor de su densidad. Por tanto, es recomendable mezclarla con otra para favorecer su densificación, tal como lo indican los datos de las muestras 50:50 y 75:25.
- Durante la etapa de secado se observa que la mayor pérdida de humedad por parte de las muestras, se presenta durante su estancia en el desecador, entre el 20 y el 30%, resultado que sugiere que es necesario tener un control estricto de la humedad tanto del medio como de las piezas durante estos primeros 6-7 días de proceso para evitar la formación de defectos en las mismas. Además, la mayor pérdida de agua la presentaron las muestras ARGU-I y ARGU-II debido a su alta humedad natural, seguida de las mezclas 50:50 y 75:25. También es de anotar que, durante la estancia en el desecador, la pérdida de humedad ocurre a una gran velocidad a diferencia de lo que ocurre cuando se colocan en la estufa donde las probetas experimentan una pérdida de peso a una velocidad prácticamente constante.
- El estudio de sinterización de las piezas indica que la mayor pérdida de masa ocurre entre los 400 y 700 °C, fenómenos de deshidratación y deshidroxilación. Otra pérdida significativa de peso ocurre alrededor de los 950 °C y corresponde a la descomposición de los carbonatos de calcio. Por otro lado, la contracción más representativa de las piezas ocurre a partir de los 1.000 °C, momento en el cual se hace evidente la densificación de las mismas.

- En el intervalo de temperatura entre los 900 y 950 °C, ocurre un proceso de desdensificación de las probetas debido a la pérdida de masa, reacción de los carbonatos de calcio y desprendimiento de CO₂, y al posible colapso de los poros a través de un proceso del tipo “Ostwald ripening” que se hace evidente en las curvas de % de absorción de agua al incrementarse este parámetro a los ~950 °C.
- Las muestras que presentaron mayor densificación, durante la sinterización, fueron ARGU-II y la mezcla 50:50. Los datos de absorción de agua indican que a partir de los 1.000 °C este parámetro disminuye poniendo en evidencia que la porosidad comienza a reducirse; es decir, que los mecanismos de transporte de masa se activan y los poros comienzan a cerrarse y a perder su interconexión. Esto se corrobora observando las curvas de contracción de las piezas durante la sinterización. Aun a la temperatura de 1.300 °C no se alcanza la máxima densificación de las piezas.
- Con base en este estudio se estructuró una metodología que permite estudiar el procesamiento de arcillas para obtener piezas con buena densificación y pocos defectos, dado el control que se ejerce durante las diferentes etapas del proceso.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el proyecto SENA-Aspropacífico “Planta piloto de la industria ladrillera en la Costa Pacífica Caucana” coordinado por el Ingeniero Paulino Mancilla. Agradecimiento especial a la VRI-Universidad del Cauca por la ayuda logística para el desarrollo de este proyecto.

Bibliografía

1. E. García. M. Suárez. Curso Ingeniería de Minas y Petróleos. *Las arcillas: propiedades y usos*. <http://www.uclm.es/users/higuera/yymm/Arcillas.htm>. Consultado el 27 de octubre de 2005.
2. I. Bernal. H. Cabezas. C. Espitia. J. Mojica. J. Quintero. *Análisis próximo de arcillas para cerámica*. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* Vol. 27. 2003. pp. 569-578.
3. *Descripción del proceso cerámico*. <http://www.acercar.org.co/industria/manuales/iceramica/02proceso.pdf>. Consultado el 15 de septiembre de 2006.
4. G. Sánchez. R. Askeland. *Ciencia e ingeniería de los materiales*. México. 3ª edición. 1998. pp. 625-648.
5. W. Callister. *Ciencia e ingeniería de los materiales. Una introducción*. Vol. 2. University of Utah. Salt Lake City. Editorial Reverté. 1996. pp. 257- 263.
6. G. M. Randall. *Sintering theory and practice*. John Wiley & Sons, Inc. New York. 1996. pp. 157-163.
7. E. Xavier. Ponencia *La cerámica como tecnologías para la valoración de residuos*. <http://www.cnpml.org/html/memorias.asp>. Consultado el 3 de octubre de 2006.
8. J. García. F. Pitalua. V. Correcher. P. López. “Observación de deshidrataciones y contracciones de una arcilla por difracción de rayos X y microscopía electrónica a temperatura y humedad controladas”. *Bol. Soc. Esp. Ceram. V*. Vol. 43. 2004. pp. 27-30.
9. T. López. J. Hernández. J. Rangel. G. Serrano. “Técnicas de caracterización en la identificación mineralógica de arcillas expansivas”. *Rev. Fac. De Ingeniería. Universidad Autónoma de Querétaro*. México. 2005. pp. 87-91.
10. A. I. Avgustinik. *Cerámica*. Editorial Reverté, S. A. Encarnación, Vol. 1. Barcelona. 1983. pp. 3-30, 66-91.
11. E. Gippini. *Pastas Cerámicas*. Sociedad Española de Cerámica. Madrid. 1979. pp. 53-78, 122-136.
12. L. A. Díaz. R. Torrecillas. “Arcillas Wealdenses en Cantabria (N. de España): su aprovechamiento cerámico”. *Bol. Soc. Esp. Ceram. V*. Vol. 45. 2006. pp. 46-51.