

CARACTERIZACIÓN TÉRMICA, QUÍMICA Y MINERALÓGICA DE UN TIPO DE ARCILLA ROJA PROPIA DE LA REGIÓN ANDINA COLOMBIANA, EMPLEADA PARA LA PRODUCCIÓN DE LADRILLOS PARA CONSTRUCCIÓN

Daniel Zuluaga Castrillón¹, Ana Patricia Henao Arrieta¹, Duver Ferney García Palacio¹, Jhon Edison Rodríguez¹, Ángela Milena Hoyos Machado¹, María Esperanza López², Conrado Gómez Álvarez³

1: Ingeniería de Materiales, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia

2: Ingeniera de Minas y Metalurgia con Doctorado en Ciencia y Tecnología de Materiales, Grupo de Investigación en Materiales y Recubrimientos Cerámicos, GIMACYR

3: Geólogo, Universidad de Caldas, Especialista en Sistemas de información geográfica. Universidad Distrital de Bogotá.

E-mail: dzc27@hotmail.com

RESUMEN

Se estudió una muestra de arcilla roja del sector de Supía (Caldas, Colombia); se halló su composición química y las fases cristalinas; además de la distribución granulométrica y análisis térmicos también se determinó, la densidad y los límites de Atterberg; finalmente se evaluaron en probetas tratadas térmicamente a 1050° C y las propiedades físicas de las muestras como el color, porosidad aparente y densidad específica. El análisis de difracción de rayos X permitió identificar las fases cristalinas asociadas a la muestra de arcilla, encontrando fases minerales características de este tipo de materiales. El análisis de fluorescencia de rayos X presentó porcentajes químicos elementales coherentes con el análisis de difracción de rayos X. Por otro lado, las coordenadas del color presentan valores adecuados para la aplicación deseada. Los resultados encontrados permiten concluir que se trata de una arcilla inorgánica de mediana plasticidad, que es posible la aplicación de este tipo de arcilla roja como materia prima para la fabricación de ladrillos comerciales.

Palabras Claves: Arcillas rojas, colorimetría, límites de Atterberg, difracción de rayos X, análisis termogravimétrico y termodiferencial, distribución de tamaño de partícula.

THERMAL, CHEMICAL AND MINERALOGICAL CHARACTERIZATION OF A TYPE OF RED CLAY AT THE COLOMBIAN ANDEAN REGION, USED FOR THE PRODUCTION OF BRICKS FOR CONSTRUCTION

ABSTRACT

A sample of red clay from the Supía area was studied (Caldas, Colombia). Its chemical composition and crystalline phases were found. In addition to the particle size distribution and thermal analysis, it was also determined the density and Atterberg's limits. Finally, there were evaluated by a thermal treated samples at 1050 ° C and the physical properties of the samples such as the color, the apparent porosity and the specific density. The analysis of X-ray diffraction allowed to identify the crystalline

phases associated to the clay sample, finding the mineral phases characteristic of this type of materials. X-ray fluorescence analysis showed elemental chemical percentages that are consistent with X-ray diffraction. On the other hand, color coordinates have adequate values for the desired use. The results show that it is an inorganic clay of medium plasticity, that it is possible to apply this type of red clay, as the raw material for the manufacture of commercial bricks.

Keywords: Red clays, colorimetry, Atterberg limits, X-ray diffraction, thermogravimetric and thermoformal analysis, particle size distribution.

1. INTRODUCCIÓN

Las arcillas fueron utilizadas desde la antigüedad como materia prima para la fabricación de ladrillos; se presentan indicios de su existencia y uso desde hace 10,000 años, y en la actualidad hacen parte de los materiales más importantes de la industria de la construcción en Colombia [1]. Entre las diversas etapas de manufactura del ladrillo, la extrusión es tal vez la técnica de conformado más usada en la actualidad, donde la pasta compuesta por la materia prima con una adición de un 25% de humedad, se alimenta a un dispositivo extrusor la cual consolidará y un tornillo sin fin, por el cual pasará la pasta por una boquilla tomando una geometría característica. Es una técnica que se centra principalmente en la creación y producción de secciones continuas [2].

El consumo continuo de materiales arcillosos en la industria cerámica conlleva la necesidad de conocer las características químicas y mineralógicas propias de cada tipo de arcilla, dado que varían inclusive de una parte a otra en el mismo yacimiento, en estructura, en forma de apilamiento, en morfología y en distribución granulométrica; lo cual influye directamente sobre las propiedades finales de los artículos producidos. Las arcillas están constituidas por aluminosilicatos cristalinos, óxidos e hidróxidos metálicos, sulfatos, carbonatos, acompañados además por materia orgánica, proporcionado cada una de estas especies una particularidad a cada arcilla [3,4].

De manera general la estructura atómica de las arcillas consiste en una gran proporción de dos unidades básicas en forma de placas o hojas (sheet); de organización octaédrica (arcillas aluminosas) y tetraédrica (arcillas silíceas); las cuales se encuentran frecuentemente unidas debido a interacciones de Van der Waals de tipo puentes de hidrógeno; lo anterior explica la fuerte afinidad que presentan este tipo de materiales con el agua, ya que ésta tiene la capacidad de romper estos enlaces entre placas y generar un fenómeno de plasticidad en el material, lo cual es la característica principal en el proceso de conformado de este tipo de materiales [5]. En la mayoría de las arcillas el carácter refractario se atribuye a elevados contenidos de caolinita, mientras que una alta plasticidad se obtiene principalmente de especies cristalinas como la illita y montmorillonita [3,6].

Otro aspecto importante, en la industria cerámica, es la coloración la cual es una variable crítica en los diferentes tipos de productos terminados fabricados a partir de arcillas, y éstas diferencias están radicadas principalmente en la variada composición química existente entre las diversas clases que se presentan en todo el mundo. Para arcillas con altos contenidos de óxidos de titanio se obtendrá una coloración blanca después de ser sometida a condiciones de cocción convencionales, mientras que para algunos óxidos de hierro la tonalidad tiende a ser rojiza. Cultrone et al. [7] estudiaron con éxito la posible implementación de la colorimetría como técnica central para la evaluación y conservación de distintos patrimonios arquitectónicos españoles. Lo cual

indica que la colorimetría es una técnica muy versátil que permite caracterizar de manera única el estado del color de diversos materiales.

Es importante también resaltar que al momento de darle forma a una pasta cerámica, se debe alcanzar la plasticidad adecuada. La manera práctica de determinar el grado de plasticidad de un suelo es mediante los límites de Atterberg: límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad. El límite líquido permite conocer el porcentaje de humedad que posee un suelo, el límite plástico relaciona la menor cantidad de agua con la cual se puede dar forma a un suelo. El índice de plasticidad determina el rango de trabajo y se obtiene de la diferencia de ambos límites. Este es un método rápido, sencillo y de bajo costo para evaluar la plasticidad, sin embargo, su mayor inconveniente es el grado de subjetividad en la determinación de los resultados [6,8,9].

La literatura muestra que la caracterización de diferentes tipos de arcillas de las diferentes regiones colombianas es una materia importante, Muñoz Meneses et al, realizaron estudios fisicoquímicos en arcillas de la región de Guapi, Cauca; por otro lado L. Duitama et al. caracterizaron arcillas extraídas de suelos de la región del valle de Aburrá Antioqueño; también Santos Amado et al. realizaron una caracterización de arcillas para la fabricación de tejas y ladrillos en la región de Barichara, Santander [10-12]. Lo mencionado, permite exponer la necesidad de este tipo de estudios con el objetivo de mejorar los procesos de fabricación de materiales terminados en la industria cerámica colombiana.

En el presente trabajo se pondrán en evidencia los resultados de la caracterización de un tipo de arcilla roja originaria de la región de Supía (Caldas, Colombia), así como el estudio del comportamiento de una pasta conformada con esta arcilla cuando es sometida a cocción; lo anterior con el objetivo de determinar cuál es la posible aplicación de este material en algunos sectores industriales, como es el caso de la industria ladrillera.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1 Muestreo y caracterización de la materia prima arcillosa

La selección de la materia prima arcillosa para la fabricación de las pastas cerámicas, así como para la caracterización de ésta, se realizó utilizando un muestreo manual de cono y cuarteo según los lineamientos de la norma ASTM C 702 [13]. Se hizo un análisis granulométrico de la muestra arcillosa siguiendo los lineamientos de la norma ASTM D 422-63 [14], el cual inició con el lavado de la muestra sobre la malla N°200 de la serie Tyler (75 μm), donde el retenido de la malla fue sometido a un tamizado mecánico durante 15 minutos, utilizando la serie de tamices de N°14, 16, 20, 30, 40, 60, 80, 100 y 200 de la serie Tyler, mientras que al material pasante por la malla N°200 se le determinó su distribución granulométrica mediante la técnica de difracción laser utilizando agua como dispersante y el equipo Mastersizer 2000 Ver. 5.60, con el accesorio Hydro 2000S (A).

A continuación, se determinaron los Límites Líquido y Plástico de la arcilla utilizando el método de Atterberg, siguiendo los lineamientos de la norma ASTM D4318-10 [15]; también se determinaron las pérdidas por calcinación a 900°C durante 2 h. Fue posible determinar la gravedad específica de la materia prima arcillosa siguiendo la norma ASTM D854 – 14 [16].

2.2 Caracterización química y cristalina del material arcilloso

Se cuantificó la composición química mediante la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX) y las fases cristalinas existentes en la arcilla empleando la técnica de difracción de rayos X (DRX), y para ello se utilizaron, respectivamente; los equipos ARL OPTIM'X-211 del Laboratorio de Fundición de la Universidad de Antioquia para el análisis FRX y el PANalytical de referencia EMPYREAN del Laboratorio de Catalizadores y Adsorbentes de la Universidad de Antioquia para el análisis de DRX, el cual tiene una fuente de radiación de cobre ($CuK\alpha$, $\lambda = 1.540598 \text{ \AA}$); operando a 45 kV y 40 mA; el barrido angular (2θ) fue desde 3° a 70° , a una velocidad de 1,98 °/s. La identificación de las fases cristalinas se realizó utilizando el Software "X'pert HighScore", el cual utiliza espectros de patrones adscritos a las bases de datos PDF y COD, Además la semicuantificación de las fases cristalinas se realizó utilizando el software de distribución libre "MAUD". Finalmente se realizaron análisis termogravimétricos y termodiferenciales (TGA/DTA), utilizando el equipo SDT Q600 V20.9 Build 20 y la rata de calentamiento del análisis fue de $2^\circ\text{C}/\text{min}$, la prueba se realizó hasta una temperatura de 1500°C .

2.3 Proceso de conformado y de cocción de las pastas cerámicas y la caracterización posterior al conformado

El procedimiento de conformado consistió en un proceso manual donde se confiere humedad a la muestra y posteriormente se elimina el exceso utilizando un molde de yeso, la geometría establecida de las pastas fue cilíndrica cuyo diámetro es de 20 mm y 10 mm de altura; el tratamiento térmico de cocción de las pastas se muestra en la Figura 1, el cual fue realizado en un horno de atmósfera de aire marca Lindberg/ Blue M. Se halló el porcentaje de contracción lineal de las pastas posterior a la cocción, utilizando un calibrador de 0.1 mm de sensibilidad, a la vez que se determinaron algunas propiedades físicas según las instrucciones de la norma ASTM C20-00 [17] (la porosidad aparente, absorción de agua, gravedad específica aparente y densidad aparente) de las pastas cerámicas posterior al tratamiento de cocción. Se obtuvieron las coordenadas del color (L, a y b) del sistema CIELab para las muestras en verde y posterior a la cocción utilizando el equipo Xpectro colorímetro X-rite SP62. Finalmente, previo al proceso de cocción se estudió la posible aplicabilidad de estas pastas cerámicas a procedimientos de alta temperatura, para esto se realizaron dos tratamientos térmicos a 1050°C y 1500°C , ambas con un sostenimiento de la temperatura durante 6 h y velocidades de calentamiento y enfriamiento que se detallan en la Figura 1.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados del análisis granulométrico según los lineamientos de las normas ASTM D 422-63 [14] se pueden evidenciar en la Figura 2a; donde se puede deducir que:

La mayoría de la muestra presenta tamaños de partícula inferiores a las $1400 \mu\text{m}$ (malla N°14). El $d(80)$ presenta un valor de $520 \mu\text{m}$ y finalmente se presenta un porcentaje de 37.59% en el material pasante por el tamiz N°200 ($-75 \mu\text{m}$); este último es un porcentaje considerable de la muestra total. La distribución granulométrica por difracción láser para una muestra representativa de la arcilla con tamaños de partícula inferiores a las $75 \mu\text{m}$ se puede observar en la Figura 2b; y en esta se encuentra que la mayoría de las partículas presentan una distribución monomodal con tamaños entre $d(10)=3.43 \mu\text{m}$ y $d(90)=58.71 \mu\text{m}$; y un $d(50)$ de $16.59 \mu\text{m}$. Los datos entregados por esta técnica están dados en porcentaje por volumen.

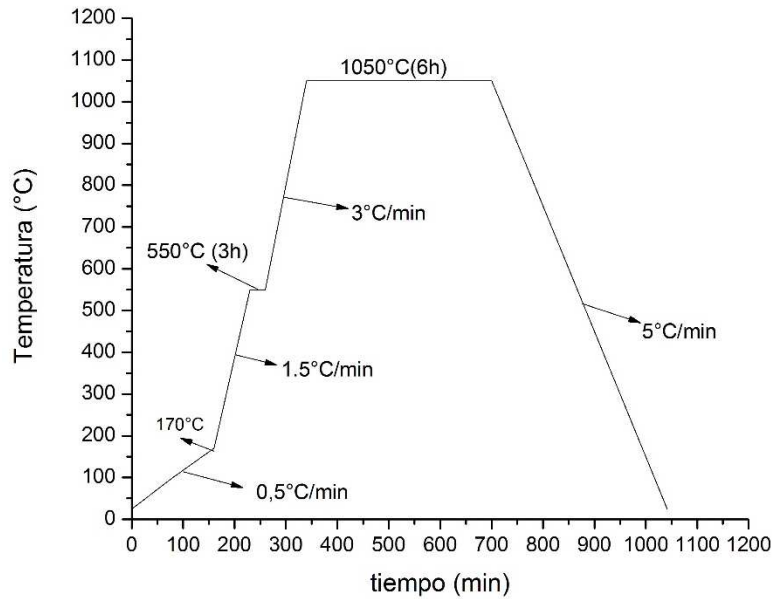


Figura 1. Tratamiento térmico de cocción de las pastas cerámicas.

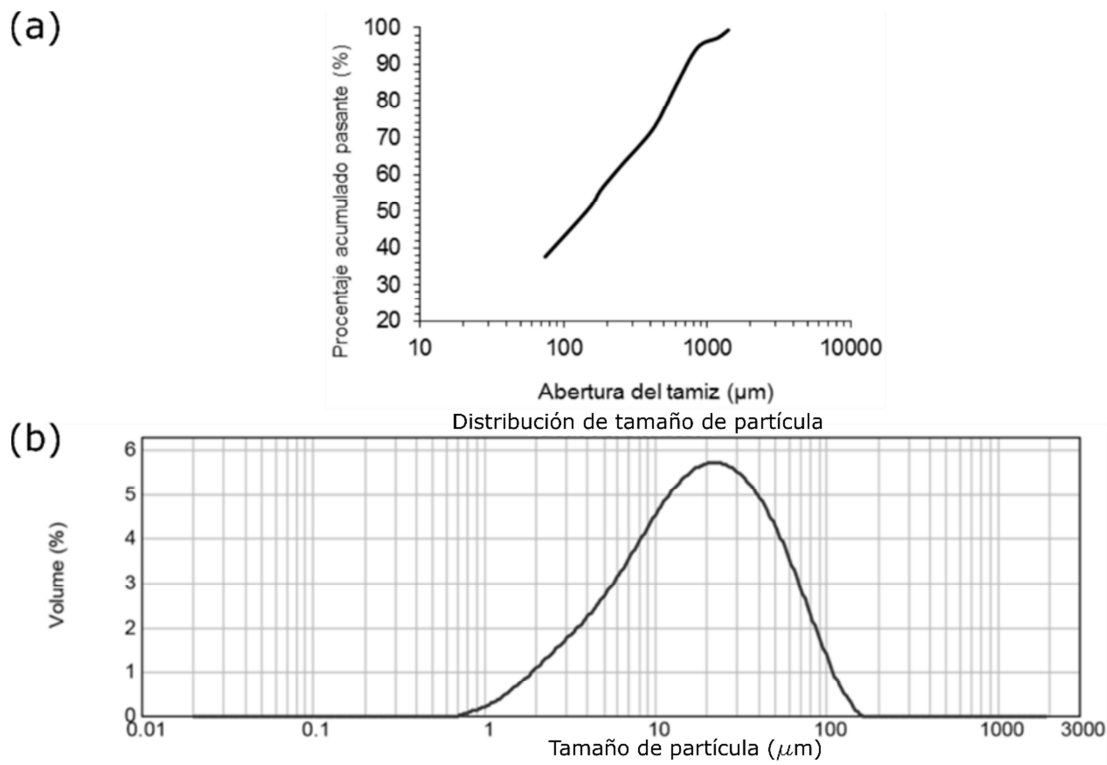


Figura 2. a) Distribución granulométrica de la arcilla (+2.0 mm, -75 μm) b) Curva DTP por difracción Láser para la muestra (-75 μm).

El límite plástico y el índice de plasticidad fueron determinados siguiendo los lineamientos de la norma ASTM D4318 – 10 [15], son de 20.3 % y 12.4% (ambos en porcentaje en peso) respectivamente. Los resultados de la prueba de los límites de Atterberg cumplen con lo establecido en la norma y corresponde al método de enrollamiento manual.

Según los resultados obtenidos y empleando de apoyo el diagrama de Casagrande del sistema unificado de clasificación de suelos (ver Figura 3), la arcilla estudiada se encuentra en la clasificación de Arcillas inorgánicas de mediana plasticidad. Los límites

de Atterberg también permiten predecir el posible comportamiento que la arcilla posee al someterse a dos tipos de conformado, como es el caso de la extrusión y moldeo, en este caso se puede observar en la Figura 4 que esta arcilla presenta una extrusión aceptable, lo cual es un dato importante debido a que este tipo de procesamiento es fundamental para la fabricación y manufactura de ladrillos en Colombia, sin embargo este resultado es teórico lo cual puede presentar variaciones con ensayos experimentales. También es necesario decir que existe la posibilidad de añadir diferentes aditivos que promuevan una mejora en la facilidad de extrusión de la arcilla.

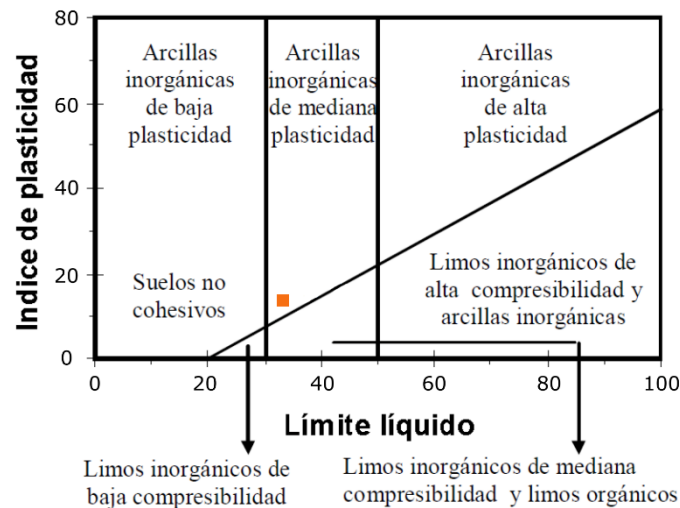


Figura 3. Diagrama de Casagrande empleado para la clasificación de la arcilla [6].

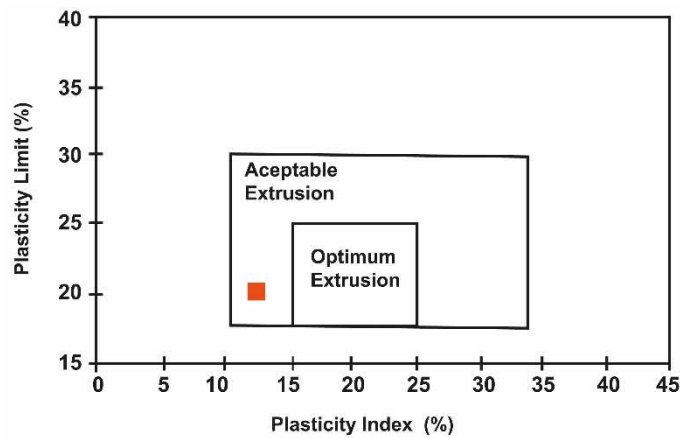


Figura 4. Diagrama de predicción de la extrusión y/o moldeo a través de los Límites de Atterberg [9].

Las pérdidas por calcinación de la arcilla fueron en promedio de 7.5824 ± 0.6024 g, lo cual posteriormente se comprobó con los análisis térmicos realizados; por otro lado, la gravedad específica de la arcilla fue 2.14 ± 0.13 g/mL. La composición química de la arcilla determinada por la técnica de FRX se puede observar en la Tabla 1; donde es necesario decir que esta técnica no determina el porcentaje de oxígeno, ni de carbono presentes en la muestra. Aunque es evidente que al tratarse mayoritariamente de distintos minerales que componen la arcilla, algunos de estos elementos vienen asociados a óxidos. El porcentaje más alto de los elementos, es el Si seguido del Fe y el Al y otros porcentajes menores de Mg, K, Ti, Na, Mn; los cuales se encuentran en los minerales que están componiendo la arcilla como son: cuarzo, hematita, vermiculita,

montmorillonita, biotita, lizardita e illita; que fueron determinados por DRX, lo que se presenta a continuación en el análisis del difractograma en la Figura 5.

Tabla 1. Resultados obtenidos del análisis de composición por FRX.

Elemento	Si	Al	Fe	Mg	K	Ti	Na	Mn
%peso	23.87 ± 0.12	10.69± 0.11	13.83± 0.14	2.35± 0.06	2.11± 0.07	1.00± 0.04	0.51± 0.11	0.144± 0.007

Los resultados del análisis semicuantitativo de las fases existentes en el DRX (Figura 5), se observan en la Tabla 2; y se obtuvieron empleando el software de código abierto “MAUD” el cual está dotado de un banco de patrones cristalinos adscritos a la base de datos Crystal open database (COD); que puede ser diferentes a los empleados en este trabajo para identificar las fases en el software X’pert. High Score en el espectro de DRX.

Tabla 2. Resultados del análisis semicuantitativo (%peso) de fases* cristalinas.

Cuarzo	Hematita	Lizardita	Vermiculita	Montmorillonita	Biotita	Illita
56.04 ± 0.0	5.4 ± 0.39	4.9 ± 0.84	0.48 ± 0.12	6.04 ± 1.25	0.88 ± 0.80	26.31 ± 1.83

* El procedimiento se realizó utilizando 21 iteraciones y cuyo parámetro R_w (%) = 8.45, indican que el resultado posee una confiabilidad adecuada.

Lo anterior indica que la fase cristalina más predominante en la muestra es el cuarzo, seguido de la Illita, siendo este resultado consecuente con el tipo de material evaluado, debido a que este tipo de minerales presentan con mayor frecuencia en muestras de suelos de la región andina colombiana [11].

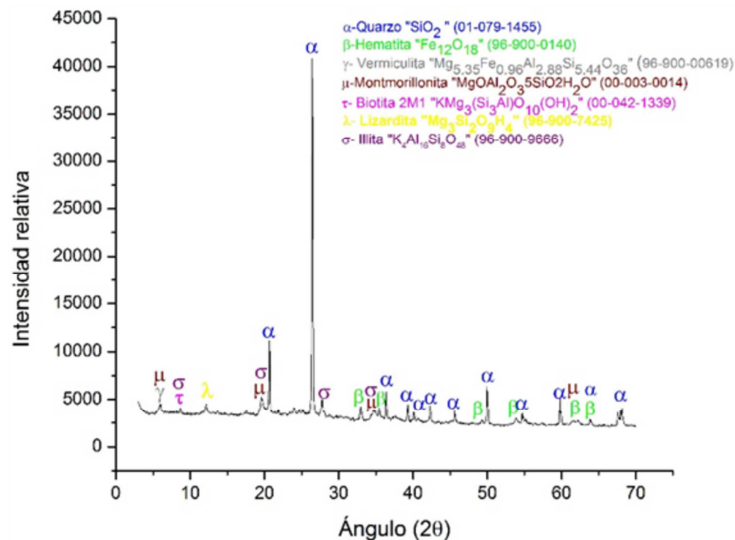


Figura 5. Espectro de difracción del material arcilloso.

Por otro lado, en la Figura 6 se encuentran los resultados del análisis TGA, dónde se puede evidenciar una primera pérdida de masa relacionada con a la eliminación de humedad hasta los 100°C, también entre los 100 y 200°C se elimina el agua absorbida químicamente, a los 450°C se presenta deshidroxilación, a los 500°C se oxida la materia

orgánica. Es de anotar que la pérdida de materia orgánica no se comprobó mediante ningún otro análisis en este estudio. Finalmente, la pérdida de material se mantiene casi estable al alcanzar un valor aproximado de 9% en porcentaje por peso, a temperaturas superiores a 600°C. También el análisis DTA permite determinar un primer pico endotérmico T1, el cual a temperatura entre 40 y 50°C es producto de la pérdida de agua higroscópica, no constitucional o libre. El segundo pico endotérmico (T2) representa según la teoría, la transformación de la sílice de cuarzo α a cuarzo β a una temperatura teórica de 573°C, finalmente el pico endotérmico (T3) a una temperatura de 1400°C podría indicar la temperatura de fusión del material, como se aprecia en la Figura 6 [18].

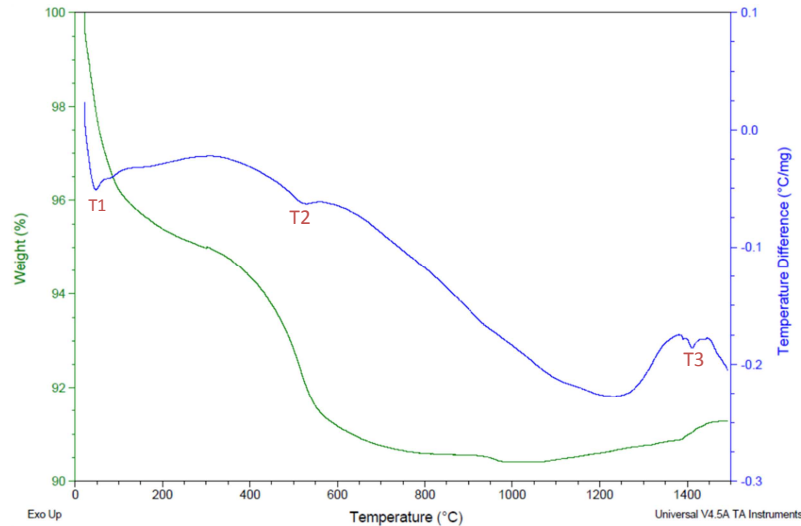


Figura 6. Análisis TGA (verde) y DTA (azul).

En la evaluación de la posible aplicabilidad de los conos de arcilla a procesos de alta temperatura, se encontraron los siguientes resultados: a la temperatura de 1050°C la integridad de dichos conos no se vio alterada; como cambio más significativo se encontró una variación en la coloración, cambiando de un rojo marrón (en verde) a un rojo naranja luego del tratamiento térmico (las coordenadas del color, de manera exacta se presentan posteriormente). Esto indica que, el comportamiento térmico hasta una temperatura de 1050°C podría ser adecuado para que esta arcilla pueda utilizarse como constituyente de la materia prima para la fabricación de cerámica roja (ladrillos, tejas, entre otros), debido a que éstas son las temperaturas de trabajo convencionales para estas aplicaciones. Por otro lado, el análisis a una temperatura de 1500°C pone en evidencia la pobre utilidad de esta arcilla para aplicaciones refractarias, ya que se presenta una fusión de casi todo el material, lo cual es coherente con la temperatura de fusión encontrada en el análisis termo-diferencial; esta es la explicación del por qué se hicieron los estudios sobre propiedades cerámicos con probetas de temperatura de cocción a 1050°.

El porcentaje de contracción lineal de las pastas después del tratamiento de cocción descrito en la Figura 1 fue de $3.53 \pm 0.44\%$; mientras que el porcentaje de porosidad aparente y el porcentaje de adsorción de agua alcanzaron valores de $23.0 \pm 1.9\%$, y $11.2 \pm 1.1\%$ respectivamente; además se encontró que la densidad aparente fue de $2.06 \pm 0.03 \text{g/cm}^3$. Los anteriores resultados son comparables con los que se evidencian en la literatura evaluada.

En la Tabla 3 se observa el cambio de coloración de las muestras encontrados para el análisis de determinación del color por el método CIElab, se presentan las variaciones

más significativas en los valores de cromaticidad (coordenadas “a” y “b”); también en la Figura 7, donde se representan gráficamente los cambios encontrados. Finalmente, la Figura 8 permite realizar la comparación de manera visual de las muestras antes y después de la cocción, es necesario remarcar que el color de la muestra de la Figura 8b es similar a los presentados por diversos productos terminados de la industria de cerámica ladrillera, lo cual permite considerar la posibilidad del uso de este material para este tipo de aplicaciones.

Tabla 3. Resultados del análisis de Color CIElab.

Parámetros	L	a	b
(A) Probeta en verde	40.53±1.56	7.56±0.16	8.40±.04
(B) Probeta sinterizada a 1050° C	42.88±2.14	19.05±0.75	22.78±1.07

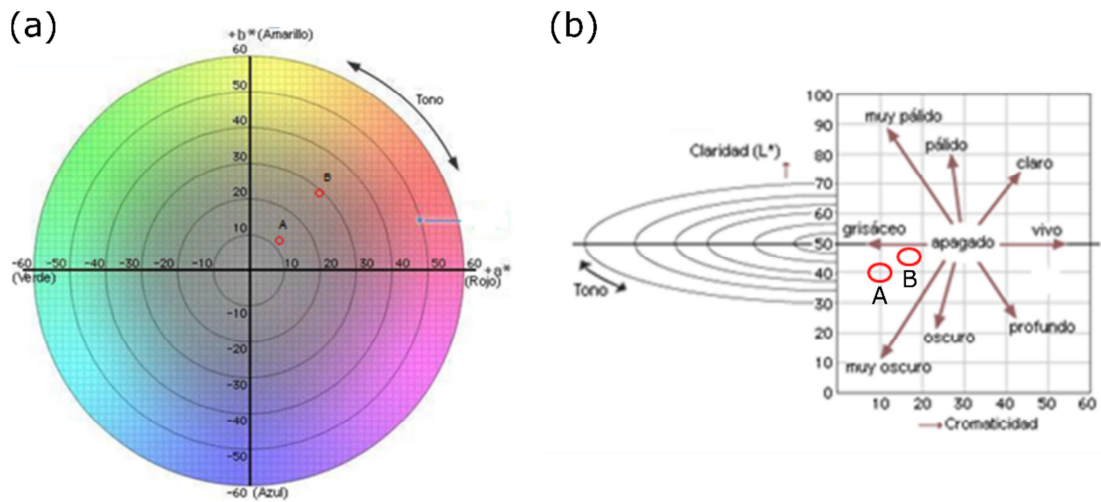


Figura 7. Coordenadas de color CIElab: a) Coordenadas (a* y b* cromaticidad). b) Parámetro ("L" luminisidad).

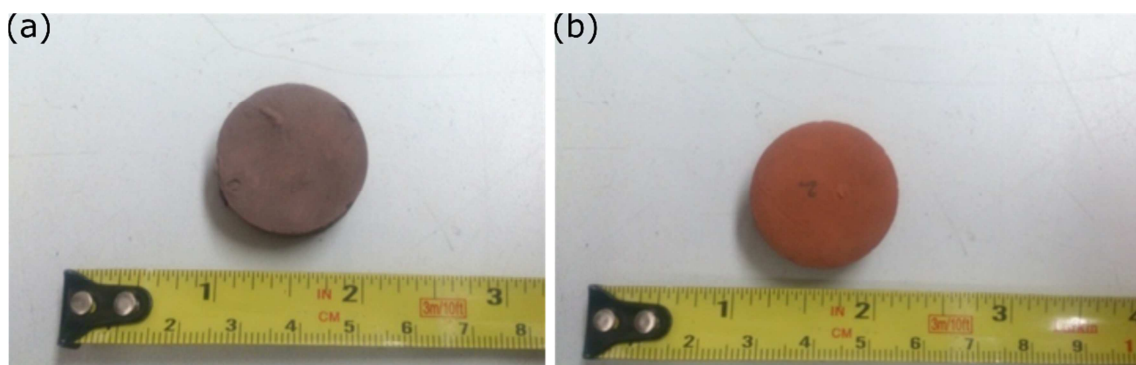


Figura 8. Muestras de la pasta cerámica a) En verde b) Luego de la cocción.

4. CONCLUSIONES

Los resultados encontrados en este trabajo demuestran la posibilidad de utilizar la arcilla evaluada como materia prima para la fabricación de ladrillos de coloración rojiza. La caracterización físico-química y cerámica permitió identificar una composición

elemental y la existencia de fases cristalinas propias de la región. Los análisis térmicos presentan información consecuente con las fases encontradas; el comportamiento a altas temperaturas demostró la nula viabilidad de utilización de la arcilla a temperaturas de 1500°C debido a la fusión del material, mientras que a temperaturas de 1050°C predominan los fenómenos de sinterización y la integridad del material no se vio afectada. Se encontró que el material analizado se categoriza como *“Arcilla inorgánica de mediana plasticidad”* según los resultados del análisis de Límites de Atterberg, también se determinó que se trata de una arcilla de *extrusión aceptable*, lo cual es idóneo para los procesos de manufactura de ladrillos. El tratamiento de cocción fue adecuado para este tipo de materiales y los resultados de las propiedades físicas del material después de la quema fueron de valores adecuados. La coloración final de la muestra es comparable con las muestras comerciales de ladrillo, sin embargo, es adecuado decir que a falta de determinar las propiedades mecánicas del material no es posible afirmar que esta arcilla pueda utilizarse como materia prima única para obtener un producto terminado.

5. AGRADECIMIENTOS

Al profesor Oscar Vega, de Ingeniería de Alimentos de la Universidad de Antioquia, por la ayuda en las medidas del color.

6. REFERENCIAS

- [1] Cultrone, G., *Estudio mineralógico-petrográfico y fisico-mecánico de ladrillos macizos para su aplicación en intervenciones del patrimonio histórico*, Tesis Doctoral, Universidad de Granada, Granada, España, 2004.
- [2] Lynch, J., Gerard, C., *Brickwork: History, Technology and Practice V.2*, Donhead Publishing, Donhead, Inglaterra, 1994.
- [3] Muñoz Meneses, R. A., Muñoz Chaves, J. A., Mancilla, P., *et al.*, “Caracterización fisicoquímica de arcillas del municipio de Guapi- costa pacífica caucana (colombiana)”, *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias*, vol. 31, pp. 537–544, 2007.
- [4] Carriazo, J., Molina, R., Moreno, S., “Caracterización de dos arcillas colombianas por difracción de rayos X y su relación con aspectos de origen y transformación”, *Boletín de Geología*, vol. 26, pp. 143–148, 2010.
- [5] Grim, R., “Modern concepts of clay materials”, *The Journal of Geology*, vol. 50, no. 3, pp. 225–275, 1942.
- [6] Santos Amado, J. D., Malagón Villafrades, P. Y., Córdoba Tuta, E. M., “Caracterización de arcillas y preparación de pastas cerámicas para la fabricación de tejas y ladrillos en la región de Barichara, Santander”, *Dyna*, vol. 167, pp. 50–58, 2011.
- [7] Cultrone, G., Cazalla, O., Rodríguez, C., *et al.*, “Criterios: Técnicas no destructivas aplicadas a la conservación del patrimonio arquitectónico. colorimetría”, *PH Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, no. 53, pp. 6–10, 2005.
- [8] Afanador García, N., Ibarra Jaime, A. C., López Durán, C. A., “Caracterización de arcillas empleadas en pasta cerámica para la elaboración de ladrillos en la zona de ocaña, Norte de Santander”, *Epsilon*, vol. 20, pp. 101–119, 2013.
- [9] Marsigli, M., Dondi, M., “Plasticità delle argille italiane per laterizi e previsione del loro comportamento in foggatura”, *L'industria Dei Laterizi*, no. 46, pp. 214–222, 1997.
- [10] Muñoz Chaves, J. A., Muñoz Menese, R. A., Mancill, P., *et al.*, “Estudio del procesamiento cerámico de las arcillas de la vereda ‘ La codicia ’ (Guapi , Colombia) para potencializar su uso en la elaboración de piezas cerámicas”, *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia.*, no. 42, pp. 68–78, 2007.
- [11] Duitama, L., Espitia, C., Mojica, J., *et al.*, “Composición mineralógica y química

de las arcillas empleadas para cerámica roja en las zonas de Medellín , Itagüí y Amagá”, *Revista - Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.*, vol. 28, no. 109, pp. 555–564, 2004.

[12] Santos Amado, J. D., Malagón Villafrades, P. Y., *Estudio de mejoramiento del proceso de fabricación de tejas y ladrillos con las arcillas de la vereda Guayabal del municipio de Barichara (Santander)*, Tesis de Ing., Escuela de Ingeniería metaúrgica y ciencia de materiales, Bucaramanga, Colombia, 2009.

[13] ASTM C702/C702M – 11, “Standard practice for reducing samples of aggregate to testing size”, *ASTM International*, 2016.

[14] ASTM D422-63, “Standard test method for particle-size analysis of soils”, *ASTM International*, 2007.

[15] ASTM D4318 – 10, “Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils”, *ASTM International*, 2014.

[16] ASTM D854 – 14, “Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer”, *ASTM Standard Guide*, 2014.

[17] ASTM C20-00, “Standard test methods for apparent porosity , water absorption , apparent specific gravity , and bulk density of burned refractory brick and shapes by boiling water”, *ASTM International*, 2014.

[18] Smith, W. F., Hashemi, J., *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales*, Ryerson, 4th ed., McGraw-Hill, New York, USA, 2006.