

ELABORACIÓN DE LADRILLOS MEDIANTE LA INCLUSIÓN DE CENIZA DE
CARBÓN PROVENIENTE DE LA LADRILLERA BELLA VISTA DE TUNJA-
BOYACÁ

JESSICA PAOLA AGUILAR GUTIERREZ

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE TUNJA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
TUNJA
2019

ELABORACIÓN DE LADRILLOS MEDIANTE LA INCLUSIÓN DE CENIZA DE
CARBÓN PROVENIENTE DE LA LADRILLERA BELLA VISTA DE TUNJA-
BOYACÁ

JESSICA PAOLA AGUILAR GUTIERREZ

Trabajo de grado en la modalidad de semillero de investigación presentado como
requisito para optar al título de ingeniero civil

DIRECTOR: PhD. SANDRA CONSUELO DIAZ BELLO
CODIRECTOR: MSc. WILLIAM RICARDO MOZO MORENO

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE TUNJA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
TUNJA
2019

Nota de Aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Tunja, 17 de junio del 2019

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco primeramente a Dios, por darme vida y salud para culminar con mi etapa de pregrado, gracias a él por concederme los mejores padres, esposo y hermano, los cuales me han brindado su apoyo incondicional a lo largo de mi carrera y que siempre me han dado una voz de aliento en los momentos difíciles, pero sobre todo doy gracias por haber enviado a mi hijo, lo más hermoso y el ser que me ha llenado de valentía y le ha dado un sentido a mi existir.

Por otra parte, presento los más sinceros agradecimientos al Señor Gonzalo Rodríguez, propietario de la Ladrillera Bella Vista, la colaboración incondicional de la directora del semillero de investigación, PhD. Sandra Díaz Bello, así como al codirector, ingeniero William Ricardo Mozo Moreno y al ingeniero Nicolás Figueroa Correa. También a los laboratoristas de la Facultad de Ingeniería Civil Fredy Hernández y J. Ángel Miranda.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	13
ABSTRACT.....	14
INTRODUCCIÓN.....	15
1. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	17
2. OBJETIVOS.....	18
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	18
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
3. ESTADO DEL ARTE.....	19
4. METODOLOGÍA.....	22
4.1 RECOLECCIÓN DE MATERIAS PRIMAS.....	22
4.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS.....	22
4.3 DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	23
4.4 PARÁMETROS PARA LA PREPARACIÓN DE LA MEZCLA Y ELABORACIÓN DE LOS MAMPUESTOS.....	24
4.4.1. Molienda.....	24
4.4.2. Tamizado.....	25
4.4.3. Dosificación.....	25
4.4.4. Homogenización.....	26
4.4.5. Conformado.....	27
4.4.6. Secado.....	27
4.4.7. Cocción.....	28

4.5	ENSAYOS DE PROPIEDADES FÍSICAS	28
4.5.1.	Tasa inicial de absorción.	29
4.5.2.	Absorción de Agua.	30
4.5.3.	Resistencia a la compresión	30
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	32
5.1	COMPOSICIÓN MINERALÓGICA.....	32
5.1.1.	Composición mineralógica de la arcilla.....	32
5.1.2.	Composición mineralógica de la ceniza.....	33
5.2	CARACTERIZACIÓN FÍSICA	34
5.3	PROPIEDADES FÍSICAS SEGÚN NTC 4205	36
5.3.1.	Absorción de agua.....	37
5.3.2.	Resistencia a la compresión.....	39
5.4	ANÁLISIS DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	40
5.4.1.	Primera variable de respuesta.	40
5.4.2.	Segunda variable de respuesta	43
6.	CONCLUSIONES	45
7.	RECOMENDACIONES	46
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	47

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. DRX arcilla.....	33
Gráfica 2. DRX ceniza de Carbón	34
Gráfica 3. Diagrama de Casa Grande	36
Gráfica 4. Absorción de agua.....	38
Gráfica 5. Resistencia a la compresión.....	39
Gráfica 6. Gráfica de residuos para resistencia a la compresión	40
Gráfica 7. Probabilidad resistencia a la compresión vs porcentaje de inclusión de CDC	42
Gráfica 8. Diagrama de caja	42
Gráfica 9. Residuos para absorción.....	43
Gráfica 10. Diagrama de caja para absorción.....	44

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1. Cantera de arcilla	22
Imagen 2. Ensayo limites	23
Imagen 3. Molienda de la arcilla	24
Imagen 4. Tamizaje de las materias primas	25
Imagen 5. Dosificación arcilla.....	26
Imagen 6. Homogenización de las muestras	26
Imagen 7. Conformado de los mampuestos.....	27
Imagen 8. Secado de los mampuestos	27
Imagen 9. Ladrillos cocidos	28
Imagen 10. Ensayo tasa inicial de absorción	29
Imagen 11. Absorción de agua.....	30
Imagen 12. Resistencia a la compresión.....	31

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. CARACTERIZACIÓN MATERIAS PRIMAS

Anexo 1. Caracterización mineralógica de la arcilla mediante difracción de Rayos X (DRX).

Anexo 2. Caracterización mineralógica de la ceniza de carbón mediante difracción de Rayos X (DRX).

Anexo 3. Determinación de límites de Atterberg para 100 % Arcilla.

Anexo 4. Determinación de límites de Atterberg para 95% A-5%C.

Anexo 5. Determinación de límites de Atterberg para 90% A-10%C.

Anexo 6. Determinación de límites de Atterberg para 85% A-15%C.

Anexo 7. Diagrama de Casagrande.

ANEXO B. PROPIEDADES FISICAS DE LOS MAMPUESTOS SEGÚN NTC 4205

Anexo 11. Tasa inicial absorción de agua para los diferentes porcentajes de sustitución 0%, 5%, 10% y 15%.

Anexo 12. Absorción de agua para los diferentes porcentajes de sustitución 0%, 5%, 10% y 15%.

Anexo 13. Resistencia a la Compresión para para los diferentes porcentajes de sustitución 0%, 5%, 10% y 15%.

ANEXO C. PASOS PARA ELABORAR LOS LADRILLOS

Anexo 14. Homogenización de las materias primas.

Anexo 15. Tamizaje de los dos materiales a utilizar (Arcilla-Ceniza de carbón).

Anexo 16. Límites de Atterberg.

Anexo 17. Preparación de la mezcla.

Anexo 18. Conformado de los elementos cerámicos

Anexo 19. Secado de los elementos cerámicos en el horno

Anexo 20. Cocción en la mufla

GLOSARIO ¹

Arcilla: Es un material fino constituido de silicatos hidratados de alúmina, el cual presenta características plásticas al interactuar con el agua y se denomina cerámica al ser sometida al proceso de cocción.

Cocción: Consiste en someter las piezas de arcilla a altas temperaturas para que se presente la sinterización y vitrificación del material. La resistencia y la porosidad de los elementos está ligada a la temperatura de cocción.

Conformado: Se implementa con el fin de proporcionar forma y consistencia a la pasta cerámica, aumentando la densidad y, por ende, mejorar las propiedades mecánicas.

Contracción: Se presenta ante la pérdida de humedad de los elementos cerámicos, esta se caracteriza por la disminución de longitud que experimenta el material después de la cocción.

Desgrasantes: Son los materiales que reducen la plasticidad de las arcillas y su contracción, por tanto, evitan excesivas deformaciones durante de la cocción de los elementos cerámicos.

Fundentes: Son aquellos materiales que, al ser combinados con la arcilla, permiten que se reduzca la temperatura de cocción, puesto que la sinterización y densificación de la pasta se produce gracias al bajo punto de fusión que presentan los fundentes.

Ladrillos: Son elementos constituidos de arcilla cocida, los cuales poseen diferentes formas y tamaños que varían de acuerdo con las funciones constructivas, estructurales o arquitectónicas.

¹ Instituto Colombiano De Normas Técnicas Y Certificación. ingeniería civil y arquitectura. unidades de mampostería de arcilla cocida. ladrillos y bloques cerámicos. NTC 4051. Bogotá, D.C.: ICONTEC,2005.

Ladrillo macizo: “Se refiere a la unidad de arcilla cocida usualmente conformada por un prisma rectangular. Estos pueden tener perforaciones que aligeran hasta un 25 % de su masa” ².

Mezcla: “Es la combinación de dos o más sustancias, para formar según el caso aleaciones, soluciones, suspensiones y coloides” ³.

Molienda: Proceso mediante el cual se presenta la reducción del tamaño de partícula de la arcilla, a través de la trituración, para así obtener la granulometría y textura necesarias para efectuar el conformado.

Secado: “Proceso mediante el cual se retira parte del agua de las piezas antes de entrar al horno de cocción. Se puede llevar a cabo de manera natural o artificial controlando el tiempo, temperatura y flujo de aire” ⁴.

² Instituto Colombiano De Normas Técnicas Y Certificación. ingeniería civil y arquitectura. unidades de mampostería de arcilla cocida. ladrillos y bloques cerámicos. NTC 4051. Bogotá, D.C.: ICONTEC,2005.

³ Mozo, William R. Fabricación de materiales de construcción a partir de biosólido procedente del tratamiento a las aguas residuales. Universidad Santo Tomas. Proyecto de Investigación. 2014.

⁴ *Ibíd.*p.2.

RESUMEN

En esta investigación se evaluó la inclusión de ceniza de carbón (CDC) como sustituto parcial de arcilla (Ar) en la elaboración de ladrillos cerámicos, con el fin de dar un valor agregado a un material considerado un desecho producto de la actividad industrial de la Ladrillera Bella Vista en Tunja-Boyacá. La caracterización mineralógica de las materias primas se realizó a través de la técnica de difracción de rayos X (DRX). Se elaboraron elementos con porcentajes de sustitución (CDC – Ar) del 5%, 10% y 15% en peso, de dimensiones modulares de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana (NTC) 296 efectuando un proceso de cocción a una temperatura de 950°C. Para determinar las propiedades mecánicas de los ladrillos de AR y CDC se efectuaron ensayos de absorción y resistencia a la compresión según lo indicado en la NTC 4017 y se clasificaron según los requisitos establecidos en la NTC 4205 para mampostería estructural y no estructural.

Palabras Clave: Arcilla, ceniza de carbón, caracterización mineralógica, ladrillo.

ABSTRACT

In this investigation, the inclusion of coal ash (CDC) as a partial substitute for clay (Ar) in the manufacture of ceramic bricks was assessed, in order to give an added value to a material considered a waste product of the industrial activity of the Bella Vista brick in Tunja-Boyacá. La caracterización mineralógica de las materias primas se realizó a través de la técnica de difracción de rayos X (DRX). Se elaboraron elementos con porcentajes de sustitución (CDC – Ar) del 5%, 10% y 15% en peso, de dimensiones modulares de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana (NTC) 296 efectuando un proceso de cocción a una temperatura de 950°C. To determine the mechanical properties of the AR and CDC bricks, absorption and compression resistance tests were carried out as indicated in NTC 4017 and classified according to the requirements set out in NTC 4205 for structural and nonstructural masonry.

Keywords: Clay, charcoal ash, mineralogical characterization, brick.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la industria de la construcción, y en particular la producción de materiales cerámicos, constituye una de las áreas más efectivas para la reutilización de residuos industriales⁵. La producción del ladrillo en Boyacá es una de las actividades económicas más importantes para la región, sin embargo, es una de las principales fuentes de contaminantes atmosféricos del departamento ⁶.

Los procesos industriales suelen ser los grandes contaminantes del planeta, ya sea por emisión de gases que se produce durante el proceso o por los desechos que estos generan ⁷; por tanto, mitigar el consumo de arcilla en la producción de ladrillos por medio de la incorporación de ceniza de carbón (CDC), es una alternativa favorable con el medio ambiente. Las cenizas del carbón (CDC), son el residuo inorgánico resultado de la incineración del material ⁸. Sus propiedades permiten que se use como fundente y adicionalmente aliviana las unidades cerámicas gracias a su baja densidad ⁹.

Debido a las diferentes afectaciones que se presentan en el proceso productivo para elaborar ladrillos; que van desde la explotación de la arcilla hasta la cocción del material cerámico, donde se ocasionan impactos al medio ambiente y a la salud humana, surge la necesidad de implementar ladrillos que respondan a las necesidades constructivas pero que cumplan con criterios de sostenibilidad ambiental, puesto que los derivados de cerámica, constituyen insumos potenciales para el desarrollo y mejora en la calidad de los elementos de construcción de viviendas, en especial para las familias de escasos recursos económicos ¹⁰.

La CDC es un material resultante del proceso de combustión del carbón en la fabricación de ladrillos; la mala disposición de este residuo puede ocasionar impactos en la salud de los trabajadores de la industria por el material particulado, según estudios epidemiológicos se ha demostrado que la exposición a altos niveles

⁵ Quarantana, N., Caligaris, M., López, H., Unsen, M., & Lalla, N. (2009). Inclusión de residuos industriales en la producción de materiales cerámicos. REDISA, 2.

⁶ Gil Fúquene, J. C., & Rincón Suescún, C. D. (2017). Evaluación de la sostenibilidad en la producción del ladrillo en la región de Boyacá, Colombia. Tunja: Universidad Santo Tomas Sede Tunja.

⁷ Martínez Amariz, A. D., & Cote Jiménez, M. L. (2014). Diseño y fabricación de ladrillo reutilizando materiales a base de PET. INGE CUC, vol. 10, 2.

⁸ Peña Urueña, M. L. (2011). Caracterización de cenizas de algunos carbones colombianos in situ por retrodispersión gamma-gamma. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

⁹ Roa Bohórquez, K. L., Paredes Roa, R. A., & Lara González, L. Á. (2017). Aplicación de $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ y cenizas volantes como refuerzo en la matriz de unidades cerámicas macizas. Universidad de Medellín, 3.

¹⁰ Páliz, D. (2015). Factibilidad del uso de Raquis de Palma Africana en mezcla con agregados de construcción para la fabricación de ladrillos ecológicos. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

de material particulado están asociados con el aumento de las consultas hospitalarias de urgencia por asma ¹¹, así mismo contribuye al desarrollo de patologías que se caracterizan por la fibrosis masiva y progresiva de los tejidos pulmonares ¹².

Por tanto, se pretende dar aprovechamiento al material residual (CDC), incorporándolo a la mezcla convencional para fabricar ladrillos ¹³. El uso de CDC disminuye la cantidad de arcilla a utilizar y se mitiga de manera directa la afectación al medio ambiente que se genera por las técnicas de producción tradicionales y el gasto energético que se ocasiona en su fabricación ^{14,15}. El objetivo del presente proyecto de investigación consiste en analizar el comportamiento de la ceniza de carbón proveniente de la industria ladrillera Bella Vista, como sustituto parcial de arcilla en la elaboración de ladrillos.

¹¹ Gil Fúquene, J. C., & Rincón Suescún, C. D. (2017). Evaluación de la sostenibilidad en la producción del ladrillo en la región de Boyacá, Colombia. Tunja: Universidad Santo Tomas Sede Tunja.

¹² Rojas Pulido, L. (2015). Fabricación y evaluación del desempeño de quince ladrillos refractarios elaborados con ceniza volante producto de la combustión del carbón en las calderas de la central Termozipa a diferentes temperaturas, de acuerdo a la norma ASTM C 113. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

¹³ Villalobos, I. (2004). Gaceta ecológica. Google Scholar, 24-34.

¹⁴ Cabo, M. (2011). Ladrillo ecológico como material sostenible para la construcción. Universidad Pública de Navarra.

¹⁵ Castells, X. E. (2009). Residuos destinados a la fabricación de materiales densos. Ediciones Díaz de Santos. ProQuest Ebook Central, <https://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliotecaustasp/detail.action?docID=3228822>.

1. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

- ¿Es factible la inclusión de ceniza de carbón, como sustituto parcial de arcilla en la elaboración de ladrillos?
- ¿Cuál es el porcentaje de adición más favorable para garantizar la calidad del elemento cerámico?

2. OBJETIVOS

2.1.OBJETIVO GENERAL

Analizar el comportamiento de la ceniza de carbón proveniente de la industria ladrillera Bella Vista, como sustituto parcial de arcilla en la elaboración de ladrillos.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar las materias primas (arcilla-ceniza), mediante difracción de rayos X (DRX), para establecer la composición mineralógica.
- Determinar las propiedades físicas de los mampuestos, según la Norma Técnica Colombiana NTC 4017 (métodos para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla).
- Establecer el porcentaje de sustitución más apropiado para garantizar la calidad del elemento de construcción, clasificando la mampostería según lo establecido por los lineamientos de la NTC 4205.

3. ESTADO DEL ARTE

Existen diferentes tipos de materiales orgánicos e inorgánicos que se han utilizado para la producción de ladrillos que permiten evaluar la posibilidad de hacer cambios en los procesos de obtención de esta materia prima generando buenos comportamientos mecánicos, químicos, entre otros.

- **Corn Stalk Fiber-Based Biomass Brick Reinforced by Compact Organic/Inorganic Calcification Composites.** Ca, M., Zhang, S., Dong, R., Wang, M., Jia, W., & Lu, Z. ¹⁶ Se diseñó un ladrillo amigable con el medio ambiente añadiendo fibra de tallo de maíz, cuyo proceso fue un prensado en frío y secado con aire caliente (Ca, y otros, 2018). La investigación se centra en explorar los efectos del tallo de maíz en las propiedades del ladrillo de biomasa analizando su composición mineralógica, su resistencia a la compresión, velocidad de deformación, densidad y humedad en proporciones considerables y análisis granulométrico. El estudio arrojó que “la contracción por secado y las tasas de deformación permanente del ladrillo en longitud y anchura son mayores que las recuperaciones elásticas” (Zeguang, Zhao, Wang, & Jia, 2016).

- **Fabricación de ladrillos de arcilla sostenibles. Valorización de cenizas de la combustión de tableros de madera.** Quesada et al. ¹⁷ En esta investigación, la incorporación de cenizas que quedan disponibles de la combustión de la madera, se incluyeron en ladrillos cerámicos de arcilla, los que fueron caracterizados mediante fluorescencia de rayos X, análisis termogravimétrico - termodiferencial, análisis elemental y difracción de rayos X, con una inclusión en peso del 10%, 20% y 30%. En este trabajo, se evaluaron las propiedades de contracción lineal, densidad aparente, absorción de agua, conductividad térmica, resistencia a la compresión realizando comparaciones con los que solo tienen arcilla. En una proporción de 20% en peso se obtiene ladrillos con propiedades similares al ladrillo de solo arcilla, similar resistencia a la compresión (53.6MPa), menor densidad aparente (1560kg/m³) y menor conductividad térmica (0.886 W/mk) (Quesada, Sesé, Martínez, & Infantes, 2016).

¹⁶ Ca, M., Zhang, S., Dong, R., Wang, M., Jia, W., & Lu, Z. (2018). Corn Stalk Fiber-Based Biomass Brick Reinforced by Compact Organic/Inorganic Calcification Composites.

¹⁷ Quesada, D., Sesé, M., Martínez, S., & Infantes, A. (2016). Fabricación de ladrillos de arcilla sostenibles. Valorización de cenizas de la combustión de tableros de madera. *Revista CONAMA*, 1-14.

Obtenido de <http://www.conama11.vsf.es/conama10/download/files/conama2016/CT%202016/1998971828.pdf>

• **Aplicación de $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ y cenizas volantes como refuerzo en la matriz de unidades cerámicas macizas.** Roa Bohórquez, K. L., Paredes Roa, R. A., & Lara González, L. Á. ¹⁸ Se implementa el uso de cenizas volantes producidas por la combustión de carbón en un horno tipo colmena y cenizas de magnesio, en este estudio se utilizó la fluorescencia de Rayos X para establecer la composición química de la arcilla, obteniendo como resultado que el elemento más abundante es SiO_2 , con un contenido de 62,3%, donde se logra clasificar el material como una arcilla Montmorillonítica. Según los ensayos de límites se establece que es una arcilla inorgánica de plasticidad media a baja (CL). Las unidades elaboradas cumplen con la resistencia a la compresión exigida por la norma, así mismo satisfacen el requisito de absorción, para mampostería estructural de uso interno o externo.

• **Elaboración de ladrillos ecológicos incorporando como materia prima biosólidos de Ptar. Tunja.** Guzmán Sáenz, L. C., & Rubio González, L. C. ¹⁹ Se evaluó la posibilidad de incluir biosólidos (sin tratamiento y cenizas) proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales “EL SALITRE” para la fabricación de ladrillos. En esta investigación se establecieron porcentajes de sustitución de 0%, 5%, 10%, 15%, 20% y 25%, con temperaturas de cocción de 950°C, 1000°C y 1050°C. Las materias primas (Arcilla-Biosólido), fueron sometidas a caracterización física mediante ensayos de plasticidad, granulometría, contenido de materia orgánica, entre otros. Se elaboraron 360 especímenes a los cuales se les realizaron los ensayos de resistencia y absorción que exige la NTC 4205. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios. Se logró establecer que el biosólido satisface las características de un material desgrasante y puede evitar la plasticidad excesiva en el proceso de secado. Los mampuestos elaborados con BST (biosólido sin tratamiento) que cumplen la resistencia a la compresión como mampostería estructural tenían 5% BST a temperaturas de 1000°C y 1050°C y para mampostería no estructural los elaborados con 5% BST a 950°C.

18 Roa Bohórquez, K. L., Paredes Roa, R. A., & Lara González, L. Á. (2017). Aplicación de $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ y cenizas volantes como refuerzo en la matriz de unidades cerámicas macizas. Universidad de Medellín, 3.

19 Guzmán Sáenz, L. C., & Rubio González, L. C. (2015). Elaboración de ladrillos ecológicos incorporando como materia prima biosólidos de Ptar. Tunja: Universidad Santo Tomas Sede Tunja.

• **Caracterización de arcillas y preparación de pastas cerámicas para la fabricación de tejas y ladrillos en la región de Barichara, Santander. Santos Amado, J. D., Malagón Villafrades, P. Y., & Córdoba Tuta, E. M.** ²⁰ En esta investigación se estableció la caracterización mineralógica, química, granulométrica, plástica de tres arcillas, denominadas Cascajo, Roja y Amarilla, provenientes de Barichara, Santander, obteniendo así pastas cerámicas idóneas para la fabricación de ladrillos y tejas. Se elaboraron probetas cerámicas por prensado, utilizando temperatura de cocción de 1050°C. Los resultados obtenidos demuestran que la pasta de arcilla Roja, con contenido de agua entre 24% y 38%, es la más adecuada para fabricar ladrillos, puesto que presentan baja absorción de agua (8.2%) y alto módulo de rotura (9.3 MPa). Se recomienda que para la producción de ladrillos la mezcla posea 55% de arcilla “Cascajo” y 45% “Amarilla”, con un 23% y 32% de contenido de agua, obteniéndose especímenes con absorción de agua menor al 15% y módulo de rotura mayor a 5 Mpa.

Las investigaciones anteriores muestran un avance importante en la inclusión de residuos a los ladrillos fabricados con arcilla. Con estas investigaciones ya realizadas se logra evidenciar que es posible darle un aprovechamiento a la ceniza de carbón. Con este trabajo se busca mitigar el uso de los recursos naturales en Tunja-Boyacá.

20 Santos Amado, J. D., Malagón Villafrades, P. Y., & Córdoba Tuta, E. M. (2009). Caracterización de arcillas y preparación de pastas cerámicas para la fabricación de tejas y ladrillos en la región de Barichara, Santander. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, 8-9.

4. METODOLOGÍA

4.1. RECOLECCIÓN DE MATERIAS PRIMAS

El lugar de recolección de la arcilla y ceniza de carbón fue en Tunja, Boyacá, las cuales fueron suministradas por la empresa ladrillera “Bella Vista”. El material arcilloso se extrajo directamente del que estaba siendo utilizado para los elementos cerámicos producidos en la ladrillera y la ceniza de carbón de los depósitos existentes alrededor de la ladrillera.

Imagen 1. Cantera de arcilla



Fuente: Autor

4.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS

Las materias primas (arcilla-ceniza) se caracterizaron mediante la técnica de difracción de rayos X (DRX) a través de un difractómetro de marca PANalytical, mediante el cual se estableció la composición mineralógica. Por otro lado, la caracterización física se efectuó por medio de ensayos de límites de Atterberg (límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad) para las diferentes combinaciones de Arcilla-Ceniza (100 % Ar – 0 % C; 95 % Ar – 5 % C; 90 % Ar– 10 % C; 85 % Ar – 15 % C.

- **Límites de Atterberg.** Para establecer el comportamiento plástico de la arcilla y las mezclas (arcilla-ceniza), se llevó a cabo según lo establecido en las normas I.N.V.E–125 – 07 e I.N.V.E –126 -07. Las cuales instauran los procedimientos para determinar los límites mencionados a continuación:

- Límite líquido (LI). “Es el contenido de humedad expresado en porcentaje del suelo secado en el horno, cuando éste se halla en el límite entre el estado líquido y el estado plástico” ²¹.
- El Límite plástico (LP). “El límite plástico de un suelo es el contenido más bajo de agua, en el cual este permanece en estado plástico” ²². En otras palabras es la cantidad mínima de agua requerida para que el material sea moldeable.
- Índice de plasticidad (IP). Es expresado en porcentaje y corresponde al intervalo de contenido de agua, para que el suelo se encuentre en un estado plástico. Este se calcula mediante a la diferencia numérica entre el límite líquido y el límite plástico.

Imagen 2. Ensayo limites



Fuente: Autor

4.3. DISEÑO EXPERIMENTAL

El presente proyecto se basa en un diseño experimental de un factor simple (porcentaje de inclusión de ceniza de carbón), en el cual se evalúan dos variables de respuesta; la resistencia a la compresión y la absorción. La norma técnica colombiana NTC 4017, especifica que se deben utilizar 5 unidades para realizar cada uno de los ensayos mencionados a continuación; resistencia a la compresión, absorción y tasa inicial de absorción. Los porcentajes de inclusión fueron 0%, 5%, 10% y 15% de CDC, por tanto, se requería por cada porcentaje quince unidades,

²¹ Norma, I.N.V. E – 125 – 07. Determinación del límite líquido de los suelos.

²² Norma, I.N.V. E – 126 – 07. Límite plástico e índice de plasticidad de suelos.

para un total de sesenta especímenes necesarios para los ensayos. Teniendo en cuenta que, durante el proceso de secado y cocción, se presentan pérdidas de elementos cerámicos, por deformaciones y agrietamientos. Se realiza una contra muestra de sesenta mampuestos, elaborando en total 120 especímenes.

4.4. PARÁMETROS PARA LA PREPARACIÓN DE LA MEZCLA Y ELABORACIÓN DE LOS MAMPUESTOS

4.4.1. Molienda. Las materias primas se sometieron a un proceso de molienda mediante la máquina de los Ángeles, la cual está constituida por un cilindro de acero, que gira en su propio eje, a este se le introducen unas esferas y mediante el proceso de rotación, los elementos esféricos de acero maceran la muestra para obtener una disminución del tamaño de partículas. Vale la pena resaltar que se requiere de una adecuada limpieza de la máquina para evitar la contaminación de las muestras.

Imagen 3. Molienda de la arcilla



Fuente: Autor

4.4.2. Tamizado. Se efectuó para garantizar la homogeneidad del tamaño de las partículas de la materia prima (arcilla-ceniza de carbón), utilizando la tamizadora eléctrica y el tamiz N°20 (Ver Imagen 4). Se seleccionaron partículas entre 70 μm – 1 mm (material que pasa tamices N.º 18-N.º 200) ²³, tamaño elegido según la revisión bibliográfica.

Imagen 4. Tamizaje de las materias primas



Fuente: Autor

4.4.3. Dosificación. Los porcentajes utilizados para la dosificación de arcilla y ceniza fueron seleccionados de acuerdo a la revisión bibliográfica, los cuales fueron realizados en peso (ver Imagen 5). Para establecer la cantidad de agua a utilizar se tuvo en cuenta el índice de plasticidad obtenido mediante el ensayo de límites de Atterberg, donde se determinó un porcentaje de contenido de agua del 25%, según la cantidad de materia prima para cada elemento cerámico.

²³ Mozo, W., Gómez, A., & Camargo, G. (2015). Efecto de la adición de biosólido (seco) a una pasta cerámica sobre la resistencia mecánica de ladrillos. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, 4.

Imagen 5. Dosificación arcilla



Fuente: Autor

4.4.4. Homogenización de las materias primas (arcilla-ceniza de carbón). Este proceso se realizó mediante la implementación de un mezclado manual en un recipiente, seguidamente de la disposición del material en bolsas con sello hermético, dejando las muestras en reposo por 24 horas, para que todas las partículas presentaran la misma humedad en el momento del coformado (ver imagen 6).

Imagen 6. Homogenización de las muestras



Fuente: Autor

4.4.5. Conformado. Los mampuestos se conformaron bajo la técnica de prensado uniaxial, mediante la utilización de una máquina de compresión simple, marca “ELE internacional” EL36-4140/01, aplicando un esfuerzo de compresión de 60 kgf/cm²; seleccionado de acuerdo a la revisión bibliográfica. El molde utilizado tiene una longitud de 100 mm, un ancho de 50 mm y un alto de 50 mm; dimensiones que cumplen con la NTC 296.

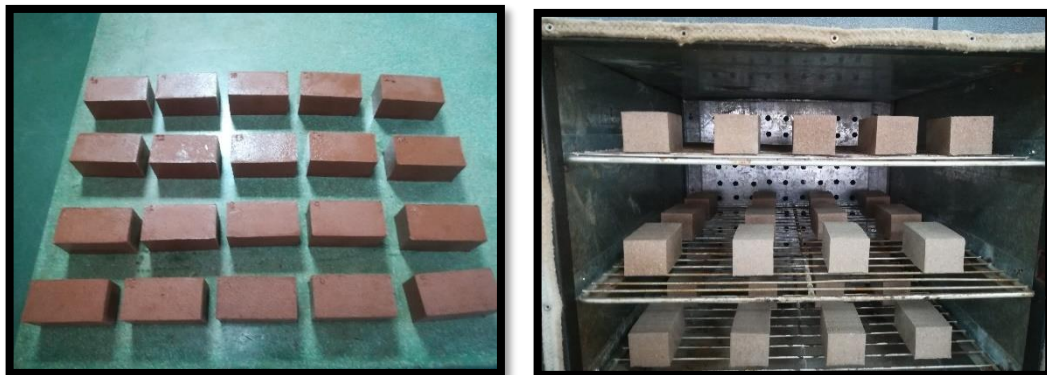
Imagen 7. Conformado de los mampuestos



Fuente: Autor

4.4.6. Secado. Los ladrillos se dejaron a temperatura ambiente por 48 horas y posteriormente fueron secados en el horno a una temperatura de 60 °C por 12 horas, temperatura seleccionada de acuerdo a la revisión bibliográfica.

Imagen 8. Secado de los mampuestos



Fuente: Autor

4.4.7. Cocción. Este proceso se realizó en un horno mufla de marca TERRIGENO referencia MM15, de control automático de rampas de temperatura. La curva de cocción está compuesta por 3 rampas de temperatura, seleccionadas de acuerdo a la revisión bibliográfica. La tasa de incremento fue de $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ cada una. La primera iba hasta los $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ y se mantenía por 120 minutos con el fin de evaporar la humedad residual presente después del secado. La segunda llegaba hasta los $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ y se mantenía por 120 minutos; en esa etapa la materia orgánica se quemaba y la última rampa alcanzó los 950°C y se mantuvo durante 180 minutos, presentándose en esta última reacción exotérmica. Finalmente se dejaba enfriar la mufla para retirar los especímenes ²⁴. Los ladrillos fueron cocidos en grupos según que el porcentaje de inclusión de CDC. Por consiguiente, se realizaron cuatro ciclos de cocción.

Imagen 9. Ladrillos cocidos



Fuente: Autor

4.5. ENSAYOS DE PROPIEDADES FÍSICAS

Para determinar las propiedades físicas los elementos cerámicos fueron sometidos a los ensayos mínimos que exige la norma NTC 4017; tasa inicial de absorción, resistencia a la compresión simple y absorción; verificando el cumplimiento según

²⁴ Mozo, W., Gómez, A., & Camargo, G. (2015). Efecto de la adición de biosólido (seco) a una pasta cerámica sobre la resistencia mecánica de ladrillos. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, 4.

los requisitos de la NTC 4205, para ser utilizados como unidades de mampostería estructural y no estructural.

4.5.1. Tasa inicial de absorción. Para efectuar este ensayo se utilizaron 5 especímenes, completamente secos como lo especifica la norma NTC 4017. Posteriormente se pesaron los mismos antes de ser introducidos en el recipiente por un minuto y luego se volvió a tomar el peso una vez extraídos del recipiente, para la ejecución de esta prueba de laboratorio es necesario garantizar una lámina de agua de 3 mm de la cara inferior del ladrillo y realizar un secado superficial antes de que transcurran 10 s. Adicional a ello el peso se debe tomar durante los primeros dos minutos después de haber retirado los especímenes del contacto con el agua

²⁵.

Imagen 10. Ensayo tasa inicial de absorción



Fuente: Autor

²⁵ NTC 4017 Método de muestreo y ensayo para ladrillos cerámicos.

4.5.2. Absorción de Agua. Para la ejecución de este ensayo se utilizaron 5 especímenes, secados en el horno a una temperatura de 105°C, según lo indica la norma NTC 4017, se pesaron después de enfriarse y se sumergieron durante 24 horas en agua destilada. Finalmente, transcurrido el tiempo mencionado, se extrajeron y se les retiro el exceso de agua con un paño, para luego pesar cada uno de los elementos, en una balanza con una precisión de 0.001 g. Vale la pena resaltar que se deben tomar los pesos durante los primeros 5 minutos después de ser retirados del agua. (ver Imagen 11).

Imagen 11. Absorción de agua



Fuente: Autor

4.5.3. Resistencia a la compresión. Para la ejecución de este ensayo se utilizaron 5 especímenes secados a 105°C, los cuales fueron refrentados con azufre una vez estaban a temperatura ambiente, siguiendo el procedimiento establecido en la NTC 4017 en su numeral siete. La aplicación de la carga se efectuó según la dirección en la que van a estar puestos en servicio. Sin embargo, es necesario aclarar que este ensayo se realizó en el laboratorio de ingeniería civil de la Usta Tunja, utilizando la máquina de compresión simple, marca “ELE internacional”, cuya última fecha de calibración fue el día 9 de julio del 2018. Esta tiene un funcionamiento manual, por tal motivo existe cierto grado de incertidumbre, respecto al manejo de velocidad de aplicación de la carga, ya que, depende directamente de la experticia del laboratorista, donde se tuvo en cuenta que este ensayo no debía durar más de 3 minutos, como lo indica la norma (NTC 4017).

Imagen 12. Resistencia a la compresión



Fuente: Autor

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.5. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

A continuación, se muestran los resultados obtenidos del análisis de difracción de rayos X (DRX), el cual se evidencia mediante los difractogramas; así mismo, se establece la distribución porcentual de cada uno de los minerales presentes en las muestras analizadas.

5.5.1. Composición mineralógica de la arcilla. En la gráfica 1, se observa que la muestra de arcilla corresponde a un material con alto contenido de ortoclasa y de wollastonita. El mineral en menor cantidad en la arcilla analizada para el proyecto de investigación es la caolinita y la goethita.

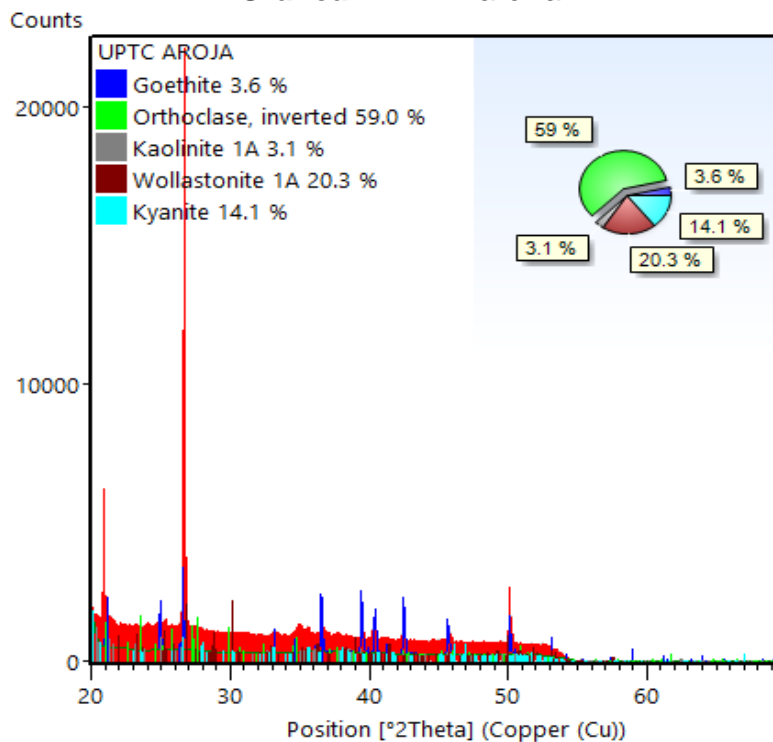
La ortoclasa corresponde a los feldespatos potásicos, los cuales se caracterizan por proporcionar mayor resistencia, reducir la conductividad eléctrica, mejorar la dureza, durabilidad y módulo de rotura ²⁶, y la wollastonita promueve uniformidad dimensional, baja contracción, buena resistencia mecánica, baja expansión por humedad y facilita la cocción rápida minimizando la producción de gases ²⁷, lo que permite deducir que el material arcilloso presenta una composición mineralógica que lo hace apto para la elaboración de ladrillos. Adicional a ello, presenta bajo contenido de óxidos de hierro (goethita) y, por ende, la coloración de los ladrillos con esta arcilla tiende a tornarse de un color pardo claro ²⁸.

²⁶ Coordinación General de Minería. (diciembre de 2014). Secretaria de economía. Obtenido de Perfil de mercado del feldespato: https://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/industria_comercio/informacionSectorial/minero/pm_feldespato_2014.pdf

²⁷ Ibañez, A., & Sandoval, F. (1993). La Wollastonita: propiedades, síntesis y aplicaciones cerámicas. Instituto de Cerámica y Vidrio, 5.

²⁸ Ibid., p. 8.

Gráfica 1. DRX arcilla



Fuente: Autor

5.5.2. Composición mineralógica de la ceniza. En la gráfica 2, se puede evidenciar que la muestra analizada de ceniza de carbón posee un alto contenido de borato de bario, comportándose como un fundente que aporta brillo y facilidad para disolver los pigmentos. Así mismo, hace que los esmaltes de los elementos cerámicos sean resistentes y elásticos²⁹. Por otra parte, vale la pena resaltar que el contenido de borato de bario no presenta efectos nocivos para la salud, puesto que los porcentajes de inclusión utilizados no superan el 15%. Además, este material ya fue sometido a un proceso de combustión en la ladrillera Bella Vista y posteriormente, vuelve a estar expuesto a altas temperaturas durante el proceso de cocción de los ladrillos elaborados para el proyecto de investigación. Se debe tener en cuenta que, el decreto 4741 del 2005, establece 100 mg/L de concentración máxima permisible para un contaminante como el bario³⁰.

El segundo mineral en mayor proporción es la zeolita, son aluminosilicatos cristalinos hidratados, con alto grado de hidratación; estabilidad frente a

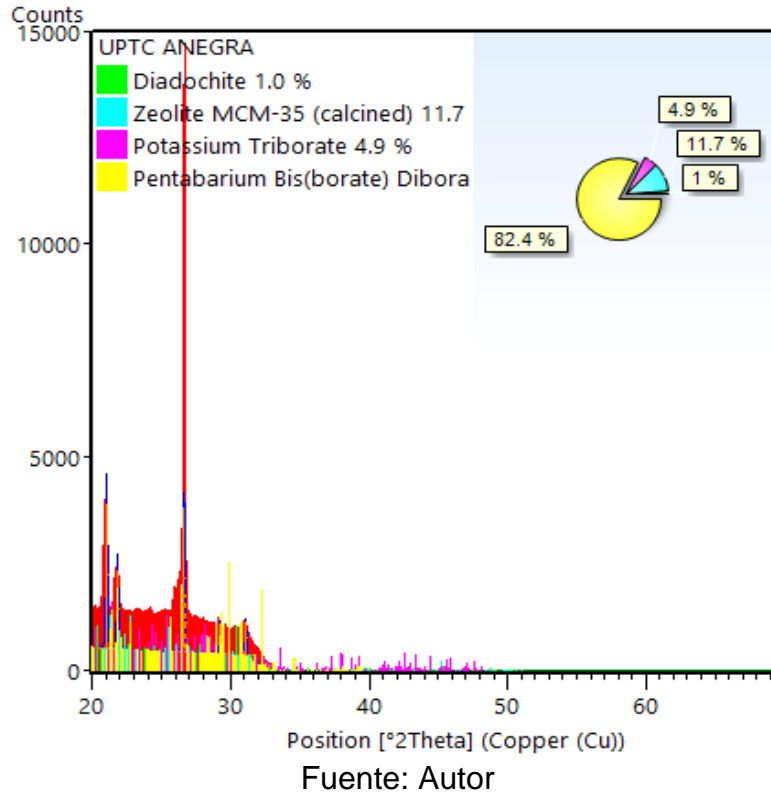
²⁹ Morales Güeto, J. (2005). Vidriado y decoración cerámica. Ediciones Díaz de Santos.

³⁰ MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 4741 de 2005.

"Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral". 30 Dic 2005.

tratamientos térmicos, alta adsorción de gases y vapores ³¹. La inclusión de cenizas de carbón presenta la particularidad de que la gran fase amorfa presente acelera las reacciones propias de la cerámica, por tanto, no es necesario alcanzar las temperaturas habituales de fabricación de ladrillos puesto que las cenizas, reducen la temperatura de cocción ³².

Gráfica 2. DRX ceniza de Carbón



6.6. CARACTERIZACIÓN FÍSICA

En la tabla 1, se presentan los resultados obtenidos del ensayo de límites de Atterberg (límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad) de cada una de las

³¹ Cechini, J. P. (2013). Incorporación de zeolitas en sistemas estructurados rígidos y flexibles. Argentina. Universidad Nacional del Litoral: INCAPE.

³² Castells, X. E. (2009). Residuos destinados a la fabricación de materiales densos. Ediciones Díaz de Santos. ProQuest Ebook Central, P. 30-35. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliotecaustasp/detail.action?docID=3228822>.

mezclas con adición de ceniza. Los cuales permiten establecer que el material se clasifica como arcilla inorgánica de alta plasticidad. El aumento de porcentaje de ceniza, trae consigo una variación mínima del índice de plasticidad, donde los valores tienden a disminuir, lo que conlleva a que el material se comporte como desgrasante, los cuales son encargados de disminuir la plasticidad de las arcillas y su contracción al secado ³³.

Tabla 1. Límites de Atterberg (I.N.V. E – 125 – 07)

Parámetro	A-100 % C-0 %	A-95% C-5 %	A-90% C-10 %	A-85% C-15 %
Límite líquido (%)	57.55	54.94	53.08	54.74
Límite plástico (%)	29.93	30.37	28.60	30.36
Índice de plasticidad (%)	27.62	24.57	24.47	24.38

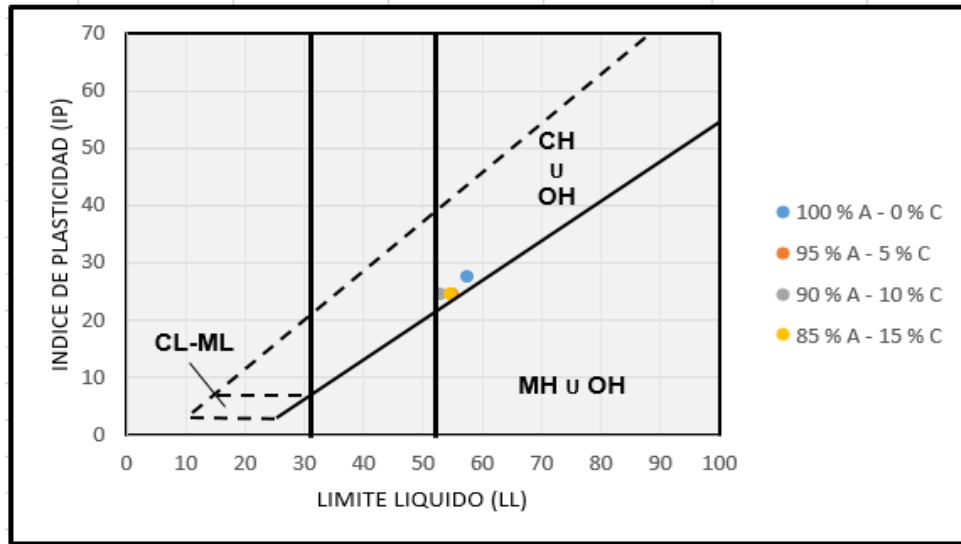
Fuente: Autor

En la carta de plasticidad (gráfica 3), se evidencia el comportamiento de las muestras ante los diferentes porcentajes de inclusión de CDC, la cual demuestra que, al aumentar la cantidad de adición del material sustituto, tiende a clasificarse como un suelo inorgánico de media plasticidad. Por ende, la cantidad de CDC está limitada por la pérdida de plasticidad¹⁹, lo que conllevaría a que se presenten contracciones muy bruscas de la masa que conducen al agrietamiento de las piezas³⁴.

³³ Dorado Guerra, H. F. (2015). Uso de subproductos de la industria de café y caña de azúcar como fundente y formador de poros en la manufactura de ladrillos de arcilla roja. Santiago De Cali: Universidad del Valle.

³⁴ Dorado Guerra, H. F. (2015). Uso de subproductos de la industria de café y caña de azúcar como fundente y formador de poros en la manufactura de ladrillos de arcilla roja. Santiago De Cali: Universidad del Valle.

Gráfica 3. Diagrama de Casa Grande



Fuente: Autor

6.7. PROPIEDADES FÍSICAS SEGÚN NTC 4205

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de absorción y resistencia a la compresión, los cuales surgen del análisis de 5 unidades para cada ensayo, utilizando valores promedios de los datos obtenidos en las pruebas realizadas, según lo establecido en la NTC 4017. Para analizar las anteriores propiedades fue necesario elaborar 120 especímenes.

6.7.1. Tasa Inicial de Absorción (T.I.A.). Los valores obtenidos del ensayo de tasa inicial de absorción de agua, se muestran en las tablas 2, donde se presenta el promedio de los 5 especímenes ensayados por cada porcentaje de inclusión de CDC.

Tabla 2. Tasa inicial de absorción

T.I.A	
% CDC	Prom. 5 Unidades
0	0.11
5	0.11
10	0.12
15	0.19

Fuente: Autor

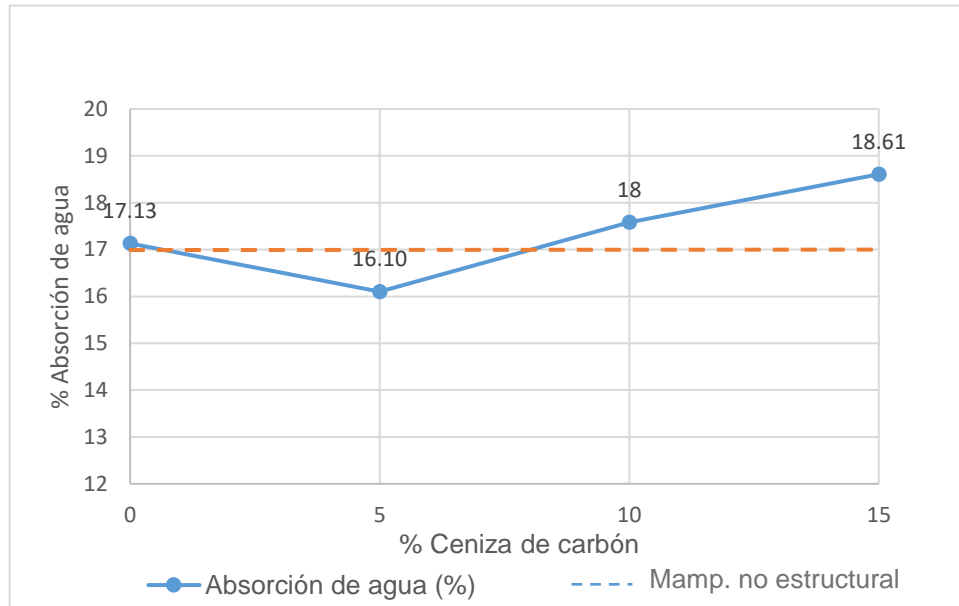
De acuerdo a los resultados obtenidos del ensayo de T.I.A, se puede establecer que los ladrillos requieren de un tiempo de humedecimiento previo de 0.5 a 1.0 min, con porcentajes de inclusión de CDC hasta un 10%, superando este valor es necesario pre humedecer los elementos cerámicos de 3 a 5 min. Estos valores obtenidos son óptimos, puesto que la NTC 4205, establece que la tasa inicial de absorción no debe superar 0.25 g/cm²/min. La relevancia de esta prueba radica en la cantidad de agua absorbida por la unidad de mampostería, puesto que puede ser afectado el fraguado normal del mortero y por ende la resistencia en la pega ³⁵.

NOTA: Ver Anexo 11, resultados tasa inicial de absorción para cada elemento ensayado.

6.7.1. Absorción de agua. En la gráfica 4, se presenta el porcentaje de absorción que se obtuvo de un promedio de 5 ladrillos. Según la NTC 4205, las unidades de mampostería deben tener una absorción máxima de agua de 17%, en mampostería no estructural y de 13 % para mampostería estructural, se puede observar que este requerimiento se satisface con un porcentaje de adición de ceniza de 5%, para mampostería no estructural de uso interior.

³⁵ Guzmán Sáenz, L. C., & Rubio González, L. C. (2015). Elaboración de ladrillos ecológicos incorporando como materia prima biosólidos de Ptar. Tunja: Universidad Santo Tomas Sede Tunja.

Gráfica 4. Absorción de agua



Fuente: Autor

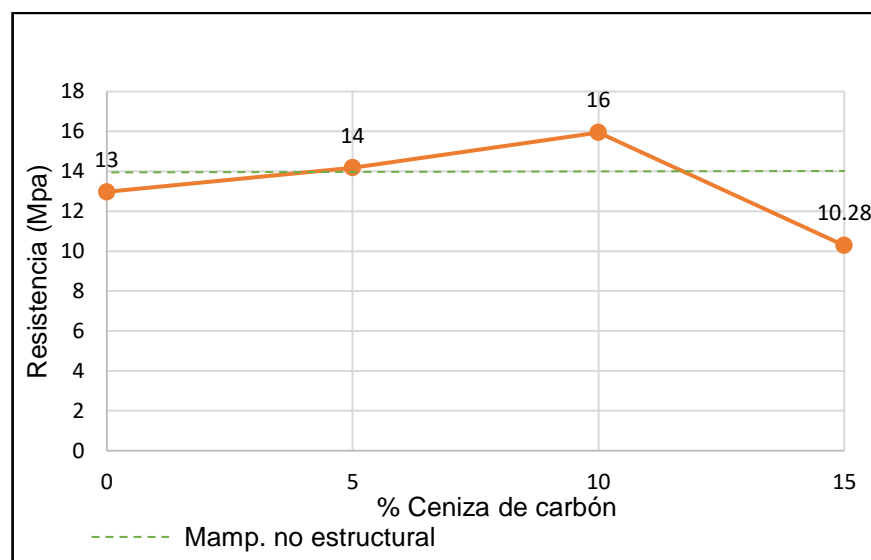
La absorción aumenta con el incremento en la adición de ceniza de carbón, Lo anterior se debe a la presencia de poros en el ladrillo, producto de la pérdida de materia orgánica durante el proceso de cocción ³⁶. Sin embargo, la porosidad del material se puede reducir con el incremento en la temperatura de cocción, a mayor temperatura hay mayor sinterización, lo que disminuye la porosidad abierta de los productos cocidos ³⁷.

³⁶ Guzmán Sáenz, L. C., & Rubio González, L. C. (2015). Elaboración de ladrillos ecológicos incorporando como materia prima biosólidos de Ptar. Tunja: Universidad Santo Tomas Sede Tunja.

³⁷ Sánchez Molina, J., Orozco Cacique, J. A., & Peñaloza Isidro, L. (2014). Evaluación de mezclas de arcillas para la fabricación de ladrillos refractarios que sirvan para la reconversión tecnológica de los hornos utilizados en norte de Santander. Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta-Colombia, 6.

6.7.2. Resistencia a la compresión. Según la NTC 4205; denominada unidades de mampostería no estructural, los mampuestos elaborados cumplen con las resistencias mínimas de compresión para un promedio de 5 unidades (14MPa), con porcentajes de sustitución de 5% y 10%, (gráfica 5), pueden ser utilizados como mampostería no estructural de uso interior. Al incrementar el contenido de ceniza de carbón el elemento cerámico pierde resistencia, como se puede evidenciar en la gráfica 5, donde al superar el 10% de adición de ceniza de carbón, se presenta una disminución de la resistencia, lo cual se asocia con el aumento de porosidad en los mampuestos.

Gráfica 5. Resistencia a la compresión



Fuente: Autor

Según los resultados obtenidos por Dorado Guerra, H, F, 2015, se observó que la resistencia a la compresión decrece al hacer adiciones de 10% de ceniza de cisco de café, independientemente de la temperatura de sinterización, mientras que en el estudio: “valorización de cenizas de la combustión de tableros de madera”³⁸, la resistencia a la compresión disminuía con adición en peso de hasta el 30% de

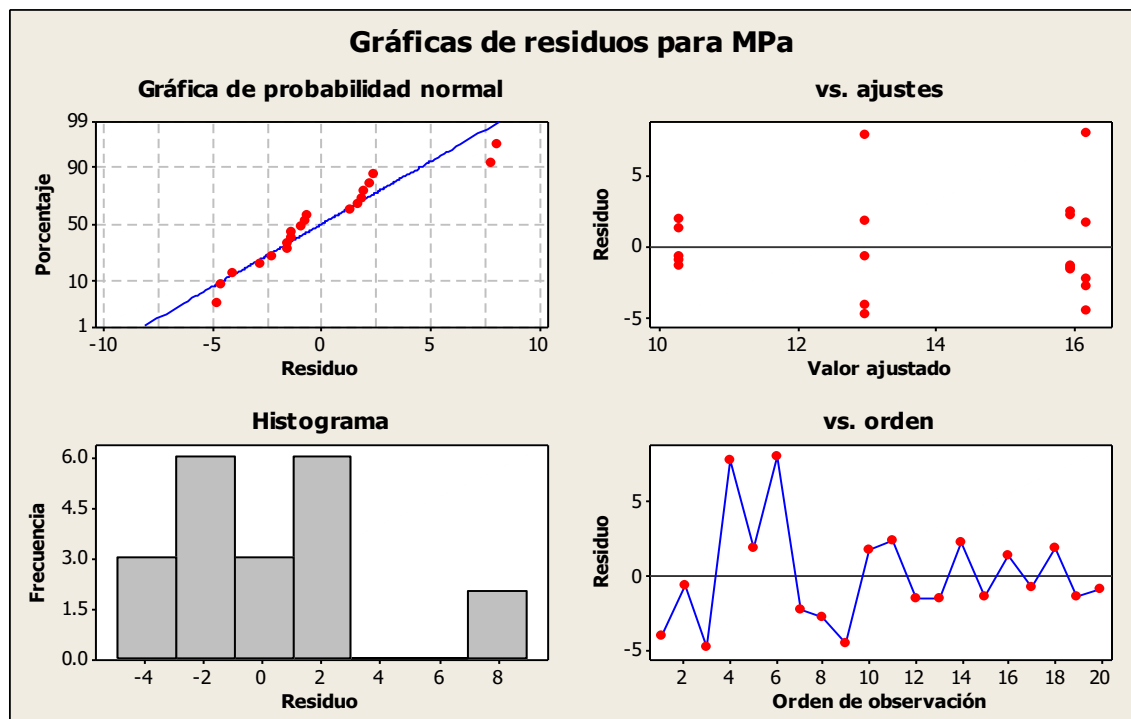
38 Quesada, D., Sesé, M., Martínez, S., & Infantes, A. (2016). Fabricación de ladrillos de arcilla sostenibles. Valorización de cenizas de la combustión de tableros de madera. Revista CONAMA, 1-14. Obtenido de <http://www.conama11.vsf.es/conama10/download/files/conama2016/CT%202016/1998971828.pdf>

ceniza de madera³⁹. Con la adición de ceniza de carbón se observa una disminución de este parámetro a partir del 10 % de sustitución. Lo que implica, que al superar este porcentaje no se garantiza la calidad de los ladrillos.

6.8. ANÁLISIS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

6.8.1. Primera variable de respuesta. Las gráficas de residuos para la resistencia a la compresión muestran la distribución de los puntos con respecto a la media evidenciándose que estos no se separan mucho de la media, lo que demuestra que la toma de los datos no es errónea.

Gráfica 6. Gráfica de residuos para resistencia a la compresión



Fuente: Autor

³⁹ Quesada, D., Sesé, M., Martínez, S., & Infantes, A. (2016). Fabricación de ladrillos de arcilla sostenibles. Valorización de cenizas de la combustión de tableros de madera. Revista CONAMA, 1-14. Obtenido de <http://www.conama11.vsf.es/conama10/download/files/conama2016/CT%202016/1998971828.pdf>

Tabla 3. Valores para establecer las hipótesis

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Porcentaje	3	116.2	38.7	2.65	0.084
Error	16	233.5	14.6		
Total	19	349.7			

Fuente: Autor

$S = 3.820$ R-cuad. = 33.24% R-cuad.(ajustado) = 20.72%

Hipótesis Nula. $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$, donde μ corresponde a las medias de cada valor de adición de cenizas de carbón (0,5,10 y 15%).

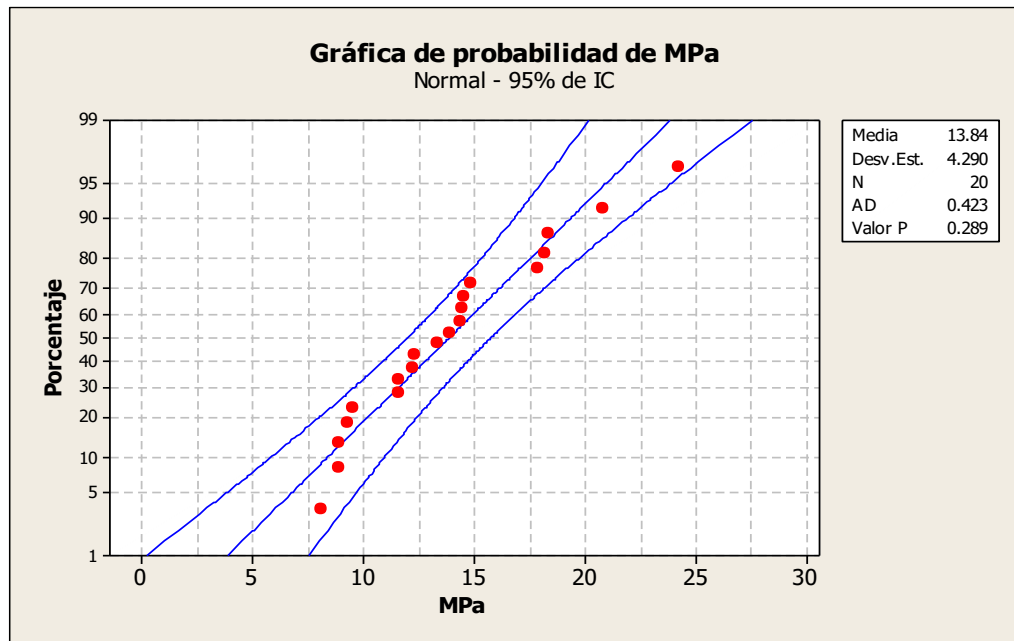
Hipótesis alterna: $H_a =$ al menos μ es diferente de las otras

Los datos relacionados con la prueba F se evalúan para aprobar o rechazar la hipótesis nula. En este caso específico para la resistencia a la compresión se tiene que el F para el diseño tomado es 2.65 y el $F_{3,16} = 3.24$ por tablas, quiere decir que F_o ó teórico es menor al de tablas, por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se aprueba la alterna, observando que hay una diferencia significativa entre las medias de la resistencia lo que significa que la adición de cenizas de carbón a los ladrillos si afectan significativamente la resistencia a la compresión de los especímenes analizados.

La gráfica de probabilidad (ver gráfica 7), también demuestra que los puntos ensayados no están lejos de la desviación estándar por lo tanto el error experimental será bajo y se concluye que los datos de resistencia fueron tomados de forma adecuada.

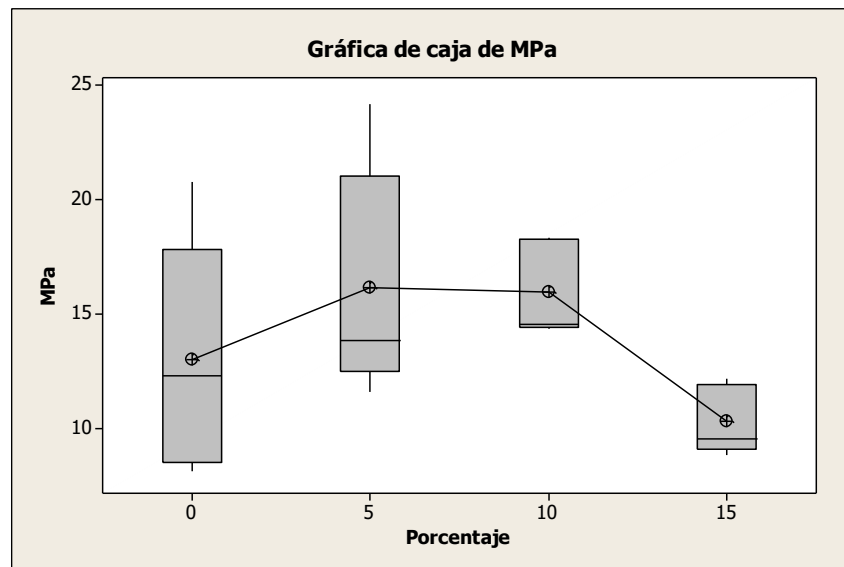
El diagrama de cajas y bigotes (ver gráfica 8), permite observar los valores de resistencia vs porcentaje de adición de ceniza de carbón, demostrando que se puede trabajar con 5% y 10% de inclusión para ladrillos no estructurales y mostrando que el del 5% permite obtener mayor resistencia a la compresión.

Gráfica 7. Probabilidad resistencia a la compresión vs porcentaje de inclusión de CDC



Fuente: Autor

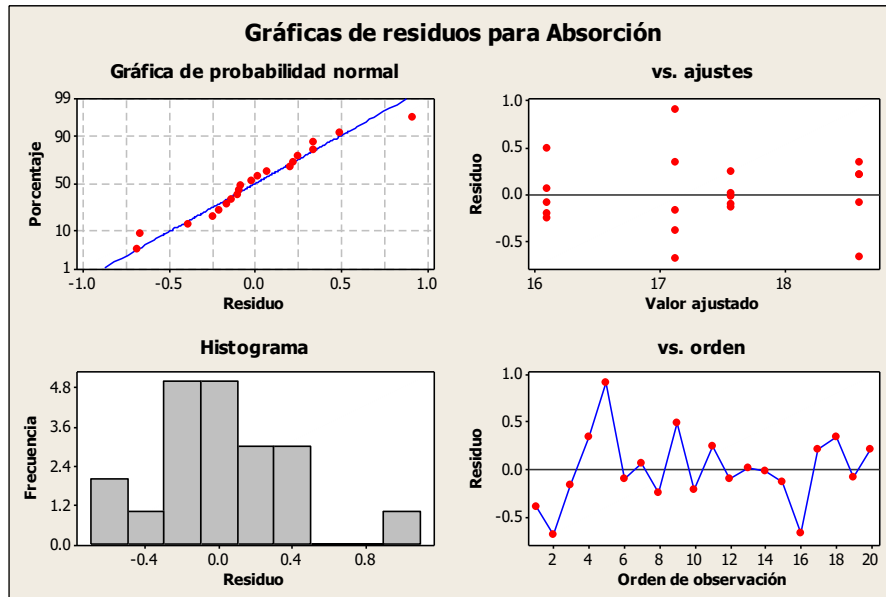
Gráfica 8. Diagrama de caja



Fuente: Autor

6.8.2. Segunda variable de respuesta. Para el porcentaje de absorción se tiene que las gráficas de residuos generadas muestran que la dispersión de los puntos es mínima es decir que el error será pequeño y los datos fueron tomados de una forma adecuada.

Gráfica 9. Residuos para absorción

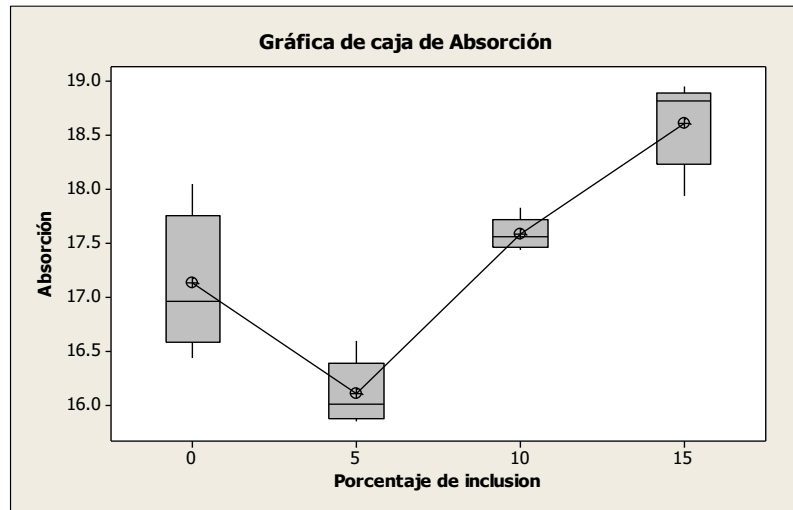


Fuente: Autor

Para este caso se analizó el diagrama de cajas y bigotes y se obtiene la gráfica 10.

La gráfica de cajas y bigotes para el porcentaje de absorción muestra que la única muestra que no se pasa de 17%, valor máximo según la norma es la de 5%, corroborando que este porcentaje de inclusión es el más adecuado.

Gráfica 10. Diagrama de caja para absorción



Fuente: Autor

7. CONCLUSIONES

La incorporación de ceniza de carbón en la fabricación de ladrillos tiene efectos positivos, ya que; los especímenes que fueron elaborados con adición de CDC hasta un 10%, presentaron aumento de resistencia a la compresión, siendo este uno de los criterios determinantes para la aceptación o rechazo de las unidades cerámicas (ladrillos).

El porcentaje de inclusión de CDC óptimo para ser utilizado como sustituto parcial en peso de la materia prima arcilla, es de 5%, mediante el cual se garantiza la calidad de los especímenes para ser utilizados como mampostería no estructural de uso interior, según lo establece la norma NTC 4205.

La caracterización mineralógica de las materias primas, demuestra que los materiales pueden ser utilizados en la fabricación de ladrillos. Donde la adición de CDC, se desempeña como material fundente, contribuyendo de esta manera con la reducción de temperatura de cocción y la minimización de la cantidad de arcilla a utilizar.

Esta investigación permite demostrar que se le puede dar un aprovechamiento al material residual (ceniza de carbón), del proceso de cocción de la ladrillera Bella Vista, mediante la incorporación en mampostería para uso no estructural, los cuales cumplen con los estándares de calidad exigidos por la norma.

8. RECOMENDACIONES

Se considera pertinente elaborar mampuestos utilizando diferentes temperaturas de cocción, para establecer un análisis comparativo de las propiedades físicas y mecánicas de los elementos cerámicos. Así mismo, es necesario implementar otros ensayos que permitan garantizar la calidad de los mampuestos.

La absorción obtenida en el estudio investigativo, solo cumple con un 5% de adición de ceniza, por tanto, es necesario ejecutar un ensayo térmico diferencial, donde se pueda establecer si falta temperatura de cocción para lograr la sinterización de los materiales y de esta manera reducir la cantidad de poros presentes en la matriz del elemento.

Se debe aplicar la prueba TCLP (prueba de lixiviación para característica de toxicidad), a los especímenes elaborados con CDC (ceniza de carbón), para estandarizar el nivel toxicidad de estos elementos cerámicos, puesto que la ceniza analizada mediante la difracción de rayos x, arrojó un porcentaje elevado de borato de bario y en el Decreto 4741 de 2005, se menciona el bario como un contaminante peligroso.

Es necesario aplicar la prueba TCLP, antes de implementar comercialmente el uso de la ceniza de carbón como sustituto parcial de arcilla en la elaboración de ladrillos, por tanto, se sugiere a la Ladrillera Bella Vista, no incorporar este desecho en los elementos cerámicos, hasta no establecer los efectos nocivos para la salud de este material inorgánico (ceniza de carbón).

9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Ca, M., Zhang, S., Dong, R., Wang, M., Jia, W., & Lu, Z. (2018). Corn Stalk Fiber-Based Biomass Brick Reinforced by Compact Organic/Inorganic Calcification Composites. *Revista Scopus*, 2086-2093. Obtenido de <https://www-scopus-com.bdatos.usantotomas.edu.co>.

Cabo, M. (2011). Ladrillo ecológico como material sostenible para la construcción. Universidad Pública de Navarra.

Castells, X. E. (2009). *Residuos destinados a la fabricación de materiales densos*. Ediciones Díaz de Santos. ProQuest Ebook Central, <https://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliotecaustasp/detail.action?docID=3228822>.

Coordinación General de Minería. (Diciembre de 2014). *Secretaría de economía*. Obtenido de Perfil de mercado del feldespatos: https://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/industria_comercio/informacionSectorial/minero/pm_feldespatos_2014.pdf

Dorado Guerra, H. F. (2015). *Uso de subproductos de la industria de café y caña de azúcar como fundente y formador de poros en la manufactura de ladrillos de arcilla roja*. Santiago De Cali: Universidad del Valle.

Gil Fúquene, J. C., & Rincón Suescún, C. D. (2017). *Evaluación de la sostenibilidad en la producción del ladrillo en la región de Boyacá, Colombia*. Tunja: Universidad Santo Tomas Sede Tunja.

Guzmán Sáenz, L. C., & Rubio González, L. C. (2015). *Elaboración de ladrillos ecológicos incorporando como materia prima biosólidos de Ptar*. Tunja: Universidad Santo Tomas Sede Tunja.

Ibañez, A., & Sandoval, F. (1993). La Wollastonita: propiedades, síntesis y aplicaciones cerámicas. *Instituto de Cerámica y Vidrio*, 5.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. (2018). *Métodos de muestreo y ensayos de unidades de mampostería de arcilla*. Bogotá, D.C: INCONTEC.

Latorre, M. (2017). *Reciclado de cáscara de almendra como materia prima secundaria en la fabricación de ladrillos de arcilla*. Andalucía: Universidad de Jaén. Obtenido de <http://tauja.ujaen.es/handle/10953.1/6591>

Martínez Amariz, A. D., & Cote Jiménez, M. L. (2014). Diseño y fabricación de ladrillo reutilizando materiales a base de PET. *INGE CUC*, vol. 10, 2.

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 4741 de 2005. "Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral". 30 Dic 2005. (s.f.).

Morales Güeto, J. (2005). *Vidriado y decoración cerámica*. Ediciones Díaz de Santos.

Mozo, W., Gómez, A., & Camargo, G. (2015). Efecto de la adición de biosólido (seco) a una pasta cerámica sobre la resistencia mecánica de ladrillos. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 4.

Norma, I.N.V. E – 125 – 07. *Determinación del límite líquido de los suelos*. (s.f.).

Páliz, D. (2015). Factibilidad del uso de Raquis de Palma Africana en mezcla con agregados de construcción para la fabricación de ladrillos ecológicos. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Peña Urueña, M. L. (2011). *Caracterización de cenizas de algunos carbones colombianos in situ por retrodispersión gamma-gamma*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Quarantana, N., Caligaris, M., López, H., Unsen, M., & Lalla, N. (2009). Inclusión de residuos industriales en la producción de materiales cerámicos. *REDISA*, 2.

Quesada, D., Sesé, M., Martínez, S., & Infantes, A. (2016). Fabricación de ladrillos de arcilla sostenibles. Valorización de cenizas de la combustión de tableros de madera. *Revista CONAMA*, 1-14. Obtenido de <http://www.conama11.vsf.es/conama10/download/files/conama2016/CT%202016/1998971828.pdf>

Roa Bohórquez, K. L., Paredes Roa, R. A., & Lara González, L. Á. (2017). Aplicación de $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ y cenizas volantes como refuerzo en la matriz de unidades cerámicas macizas. *Universidad de Medellín*, 3.

Rojas Pulido, L. (2015). *Fabricación y evaluación del desempeño de quince ladrillos refractarios elaborados con ceniza volante producto de la combustión del carbón en las calderas de la central Termozipa a diferentes temperaturas, de acuerdo a la norma ASTM C 113*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Sánchez Molina, J., Orozco Cacique, J. A., & Peñaloza Isidro, L. (2014). Evaluación de mezclas de arcillas para la fabricación de ladrillos refractarios que sirvan para la reconversión tecnológica de los hornos utilizados en norte de santander. *Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta-Colombia*, 6.

Santos Amado, J. D., Malagón Villafrades, P. Y., & Córdoba Tuta, E. M. (2009). Caracterización de arcillas y preparación de pastas cerámicas para la fabricación de tejas y ladrillos en la región de Barichara, Santander. *Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales*, 8-9.

Urueña, M. L. (2011). *Caracterización de cenizas de algunos carbones colombianos in situ por retrodispersión gamma-gamma*. CUNDINAMARCA, Bogotá.

Villalobos, I. (2004). *Gaceta ecológica*. *Google Scholar*, 24-34.

Web Mineral. (s.f.). Obtenido de Diadochite Mineral Data: <http://webmineral.com/data/Diadochite.shtml#.XNgHYo4zbIV>

Zeguang, L., Zhao, Z., Wang, M., & Jia, W. (2016). Effects of corn stalk fiber content on properties of biomass brick. *Revista ELSEVIER*, 11-17. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/bdatos.usantotomas.edu.co/science/article/pii/S0950061816315914>

