

**OBTENCIÓN DE LADRILLO DE CONSTRUCCIÓN A PARTIR DE RESIDUOS
SÓLIDOS URBANOS DEL MUNICIPIO DE CHARALÁ, SANTANDER**

**JAIRO ANDRES VERGEL GUTIERREZ
EDWIN LEONARDO VILLAMIZAR SUÁREZ**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES
BUCARAMANGA
2017**

**OBTENCIÓN DE LADRILLO DE CONSTRUCCIÓN A PARTIR DE RESIDUOS
SÓLIDOS URBANOS DEL MUNICIPIO DE CHARALÁ, SANTANDER**

**JAIRO ANDRES VERGEL GUTIERREZ
EDWIN LEONARDO VILLAMIZAR SUÁREZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO METALÚRGICO**

**Director
Msc. WALTER PARDAVÉ LIVIA
Ingeniero Metalúrgico**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES
BUCARAMANGA**

2017

DEDICATORIA

A Dios, por permitirnos el Don de la vida, por la oportunidad de adquirir una formación académica, por los conocimientos otorgados y capacidades adquiridas, por la constancia y perseverancia a pesar de los percances e inconvenientes, por mantener nuestra fe intacta, optimismo, humildad y entusiasmo, factores importantes en la culminación de nuestro sueño y proyecto de vida.

A nuestros seres queridos, presentes y ausentes, por ser sinónimo de motivación, por brindarnos desinteresadamente su apoyo incondicional, económico, por su compañía y voz de aliento en cada instante de este arduo camino.

Edwin Villamizar

Jairo Vergel.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Industrial de Santander, por brindarnos una formación académica personal y profesional. A nuestro director de proyecto, el profesor Walter Pardavé Livia, por su confianza, compromiso y conocimiento, en esta etapa de nuestras vidas.

A EcoSangil sas E.S.P, al permitirnos observar, recorrer y conocer su planta física, por enseñarnos cada proceso de su operación unitaria relacionada al reciclaje de los residuos sólidos urbanos, por compartir sus alternativas biotecnológicas para la solución de problemas ambientales y selección de residuos.

Al personal presente en planta de aceros, de la escuela de Ingeniería Metalúrgica: técnico Mario Navarrete, Domingo, Sergio, Oscar, Ambrosio y en especial al técnico Javier Gaitán por su disposición, conocimiento y empeño en la realización del proyecto.

Al laboratorio de la escuela de ingeniería mecánica, al docente Diego y en especial al auxiliar Nicolás López, por su paciencia, asesoría y colaboración a lo largo de este proyecto.

Al laboratorio de Rayos X por su colaboración y aporte en la solución de nuestras inquietudes, en especial al profesor Henao y personal encargado de la realización de los ensayos DRX y SEM.

A todas aquellas personas que de forma directa o indirecta brindaron aportes para la realización de este proyecto.

A la Doctora en ingeniería en materiales Erika Tatiana Badillo Campos, por su tiempo, conocimientos, motivación, y apoyo a lo largo de este proceso académico.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. ANTECEDENTES	17
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	20
2.1 LADRILLOS ECOLÓGICOS	20
2.2 NORMAS DE LADRILLOS	20
2.2.1 Unidades de Mampostería de Arcilla Cocida - Ladrillos y Bloques Cerámicos - NTC 4205 (2003)	20
2.2.2 Método para muestreo y ensayos de unidades de Mampostería y otros productos de arcilla- NTC 4017 (2005).	20
2.3 RESIDUOS SOLIDOS APROVECHABLE	21
2.4 LADRILLO FABRICADO CON RESIDUOS SÓLIDOS	21
2.5 ESTADO DEL ARTE	21
3. OBJETIVOS	24
3.1 OBJETIVO GENERAL	24
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	25
4.1 MATERIALES Y MÉTODOS	26
4.1.1 Caracterización de los materiales reciclables obtenidos de los residuos sólidos urbanos (RSU)	26
4.2 PREPARACIÓN Y EVALUACIÓN DE LAS PASTAS CERÁMICAS	27
4.2.1 Mezclado	27
4.2.2 Conformado	28
4.2.3 Secado	28
4.2.4 Tratamiento al calor	28
4.2.5 Ensayos de propiedades físicas y mecánicas	28
4.2.5.1 Ensayo de compresión	28
4.2.5.2 Ensayo de flexión	30

4.2.5.3 Ensayo de absorción de agua	32
4.2.5.4 Ensayo de choque térmico	32
4.3 SELECCIÓN DE LAS PASTAS MÁS ADECUADAS PARA LA FABRICACIÓN DE LOS LADRILLOS	33
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
5.1 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y GRANULOMÉTRICA	34
5.2 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS AL LADRILLO OBTENIDO	35
5.2.1 Ensayo de compresión	35
5.2.2 Ensayo de flexión	37
5.2.3 Ensayo de absorción de agua	39
5.2.4 Ensayo de choque térmico	41
6. CONCLUSIONES	44
7. RECOMENDACIONES	45
BIBLIOGRAFIA	47
ANEXOS	53

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama de flujo desarrollo experimental	25
Figura 2. Molde empleado en la fabricación del ladrillo ecológico	28
Figura 3. Carga aplicada área de contacto	29
Figura 4. Evidencia de falla luego del ensayo de compresión	29
Figura 5. Ensayo de flexión del ladrillo ecológico convencional	31
Figura 6. Resistencia a la compresión, muestras expuestas a la temperatura de tratamiento al calor 150 (°C)	35
Figura 7. Resistencia a la compresión, muestras expuestas a la temperatura de tratamiento al calor mínima 80 (°C)	36
Figura 8. Resistencia a la flexión muestras expuestas a la temperatura de tratamiento al calor máxima 150 (°C)	37
Figura 9. Resistencia a la flexión muestras expuestas a la temperatura de tratamiento al calor mínima 80 (°C)	38
Figura 10. Resultados prueba de absorción en diagrama de barras	40

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Mezclas utilizadas y sus equivalencias en masa (g) en la fabricación del ladrillo	27

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. CONDICIONES OPERATIVAS DE LOS ANÁLISIS DRX	54
ANEXO B. RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE EL ANÁLISIS DE DRX	55
ANEXO C. MATERIA PRIMA	59
ANEXO D. FICHA TÉCNICA MTS 370	61
ANEXO E. PRUEBA DE ABSORCIÓN	62
ANEXO F. PRUEBA DE CHOQUE TÉRMICO	63

RESUMEN

TÍTULO: OBTENCIÓN DE LADRILLO DE CONSTRUCCIÓN A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DEL MUNICIPIO DE CHARALÁ, SANTANDER.*

AUTORES: Gutiérrez Vergel Jairo Andrés
Villamizar Suárez Edwin Leonardo **

PALABRAS CLAVES: Residuos sólidos urbanos, Material reciclable, Ladrillo ecológico convencional.

DESCRIPCION

El propósito del presente trabajo consiste en el aprovechamiento de la gran cantidad de residuos urbanos generados por las grandes urbes, el objetivo principal es la obtención de un ladrillo de construcción que cumpla las especificaciones de normas ICONTEC NTC 4205 y NTC 4017, a partir de componentes generados en los desechos sólidos urbanos reciclables: chamota, tereftalato de polietileno (PET) , vidrio ; suministrados por la planta EcoSangil SAS E.S.P, Santander; separados mediante operaciones de beneficio de minerales y previa caracterización físico, química y granulométricamente. A partir de la caracterización de los residuos, se procede a la elaboración del ladrillo junto con la adición de aglomerantes (melaza, caolín y cal hidratada) mediante procesos de mezclado, compactación y tratamiento al calor. Las probetas fueron sometidas a pruebas de laboratorio, según las normas ICONTEC NTC 4017 y NTC 4205, para validar el producto. La puesta en marcha del proyecto, se desarrolló en varias fases. Lo primero y más importante, es la revisión bibliográfica, presente en el planteamiento del problema, así como en el transcurso del mismo. Seguido, el procedimiento para la fabricación de un ladrillo ecológico y requerimientos para realizar un correcto tratamiento al calor. Posteriormente, se llevó a cabo la caracterización física y química de la materia prima por difracción de rayos x (DRX); además de implementar los ensayos de resistencia a la compresión, módulo de rotura, absorción de agua y choque térmico establecidos en las normas ICONTEC. De acuerdo a los resultados obtenidos, es viable la obtención de ladrillos ecológicos convencionales, principalmente para ser usados en partes externas o tejados de viviendas.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: Walter Pardavé Livia

ABSTRACT

TITLE: OBTAINING BUILDING BRICK FROM SOLID URBAN WASTE OF THE MUNICIPALITY OF CHARALÁ, SANTANDER*

AUTHORS: Gutiérrez Vergel Jairo Andrés
Villamizar Suárez Edwin Leonardo**

KEY WORDS: Urban Solid Waste, Recyclable Material, Conventional ecological brick.

DESCRIPTION

The purpose of this work is to take advantage of the large amount of urban waste generated by large cities, the main objective is to obtain a construction brick that meets the specifications of ICONTEC standards NTC 4205 and NTC 4017, from components generated in recyclable municipal solid waste: chamotte, polyethylene terephthalate (PET), glass supplied by the EcoSangil SAS ESP plant, Santander; separated by operations of minerals benefit and previous physical, chemical and granulometrically characterization. From the characterization of the residues, the brick is elaborated along with the addition of binders (molasses, kaolin and hydrated lime) by means of mixing, compacting and heat treatment processes. The test pieces were subjected to laboratory tests, in accordance with ICONTEC standards NTC 4017 and NTC 4205, to validate the product. The implementation of the project was developed in several phases. The first and most important, is the bibliographical review, present in the approach of the problem, as well as in the course of the same. Next, the procedure for the manufacture of an ecological brick and requirements to perform a correct heat treatment. Subsequently, the physical and chemical characterization of the raw material was carried out by X-ray diffraction (XRD); in addition to implementing the tests of resistance to compression, rupture modulus, water absorption and thermal shock established in the ICONTEC standards. According to the obtained results, is feasible to obtain conventional ecological bricks mainly to be used in external sections or roof of houses.

* Degree project

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Director: Walter Pardavé Livia

INTRODUCCIÓN

A raíz de la demanda generada en el sector constructor en los últimos años motivado por el gran desarrollo, como consecuencia se atribuye el agotamiento de los recursos naturales y deterioro del medio ambiente. Una estrategia para mitigar dicha problemática es la utilización de los residuos sólidos urbanos presentes en las grandes urbes como alternativas viables a ser utilizados en la fabricación de ladrillos convencionales de arcilla cocida para ser empleados como material de construcción, sino también al problema del diseño económico de los edificios¹. El desarrollo de ladrillos mediante un enfoque más sostenible, sofisticado, constitucional y ecológico contribuirá a la protección del medio ambiente².

El método convencional de fabricación de ladrillo fomenta el consumo de materiales a base de tierra, arcilla, pizarra y arena. De igual forma su elaboración es perjudicial para el medio ambiente, ya que para su fabricación requiere alcanzar temperaturas muy elevadas con el uso de combustibles, que al quemarse liberan a la atmósfera CO_2 . A diferencia, los ladrillos ecológicos son similares en tamaño y textura, económicos, durables, resistentes y capaces de soportar cargas pesadas. Estos últimos ayudan a cuidar el medio ambiente y brindan un entorno saludable y sostenible que responde adecuadamente a las necesidades de los seres humanos, ya que no contienen productos peligrosos o contaminantes, y además favorecen el ahorro de energía³.

Dado que el reciclaje de residuos urbanos está especialmente dirigido a suplir las materias primas, entonces es apropiado que sean las propias autoridades las que

¹ SAFIUDDIN, M., JUMAAT, M., SALAM, M., ISLAM, M., & HASHIM, R. (18 de october de 2010). Utilization of solid wastes in construction materials . (A. Journals, Ed.) International Journal of the Physical Science, 1952-1963. Obtenido de <http://www.academicjournals.org/IJPS>

² PRYCE, W., CAMPBELL, J., & RODRÍGUEZ, C. (2016). LADRILLO: HISTORIA UNIVERSAL. BLUME, España.

³ (s.f.). El “ladrillo ecológico” como nuevo material para la construcción sustentable. Proyecto de investigación.

controlen y coordinen las actividades de reciclaje desde una completa evaluación de la gestión de materias primas en cada región⁴.

Ante dicha problemática, se vió la necesidad de realizar mediante un diseño experimental para confeccionar mezclas y fabricar adobes combinando varios residuos sólidos urbanos como: vidrio pulverizado, tereftalato de polietileno (PET), chamota, junto con melaza, caolín y cal hidratada; para mejorar la compactibilidad de los materiales; variando sus porcentajes volumétricos, y estudiando propiedades físicas y mecánicas según normas ICONTEC NTC 4205 (Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos) y NTC 4017 (Métodos para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla), para la obtención de ladrillos que cumplan estándares, con posible uso en la producción de materiales de construcción. En general, cualquier aplicación que conlleve a la reciclabilidad de los residuos sólidos urbanos es favorable⁵.

⁴ (s.f.). El “ladrillo ecológico” como nuevo material para la construcción sustentable. Proyecto de investigación.

⁵ *Ibíd.*

1. ANTECEDENTES

El ladrillo es uno de los materiales de construcción más antiguos y su historia se remonta a los orígenes de la civilización en el año 10000 a. C. Se desarrolló en Mesopotamia, hacia el año 5000 a. C. Su mayor logro fue la invención del ladrillo cocido, en el año 3500 a. C., permitiendo la construcción de estructuras permanentes en zonas donde anteriormente no había sido posible. Los antiguos romanos edificaron muchos de sus grandes edificios con ladrillo. Bizancio perfeccionó la fabricación del ladrillo romano. En Asia, China empleó alternativas para hacer que el ladrillo fuera más duro y fuerte. El islam difundió las técnicas de fabricación y adecuación a través del norte de África y Asia Central. El monaquismo cristiano lo introdujo a través de Europa, y el budismo lo propagó por India, Birmania y Tailandia⁶.

El uso del ladrillo perduró con el tiempo logrando expandirse hacia Norteamérica. Sin embargo, ya en América las antiguas culturas indígenas precolombinas empleaban este material para construir: las estructuras monumentales, usaban piedras o ladrillos de adobe que eran secados al sol. Se demuestra en las grandes pirámides de los olmecas, mayas y otros pueblos⁷.

En los años 70 al 80 del siglo XX, el avance en la tecnología de fabricación dio un gran impulso a la industria ladrillera, con una mayor eficiencia en la calidad del material y en la reducción de los tiempos de fabricación. En una fábrica moderna totalmente automatizada, donde el proceso es continuo, la elección de la cava es una operación determinante del producto final⁸.

⁶ PÉREZ, Á. (2012). Use of Crushed Recycled Brick Coarse as Aggregate in the Use of Crushed Recycled Brick Coarse as Aggregate in the Elaboration of Concrete. *Revista de la Facultad de Ingeniería*, 13(26), 116-125.

⁷ GARCÍA, M., & BOHÓRQUEZ, M. (octubre-diciembre de 2013). Mechanical Resistance of bricks made of mixtures of clay and sludge from sewage treatment. *revista tecnura*, 17(38), 68-81.

⁸ OSORIO, D. (28 de junio de 2013). BLOG 360° EN CONCRETO. Obtenido de <http://blog.360gradosenconcreto.com>

Los residuos de la actividad humana o basura, han sido un problema que ha ido incrementándose, lo cual, a lo largo de la historia, ha presentado inconvenientes como enfermedades, contaminación y empeoramiento de las condiciones de vida de algunas comunidades, no solo humanas sino también de otras especies.

Debido a esto el hombre ha intentado idear diversas soluciones para aminorar, y en algunos casos eliminar la producción de desperdicios; Gracias a la conciencia ambiental que ha ido aumentando en las nuevas generaciones de profesionales, se han mejorado los procesos de desarrollo de diferentes trabajos, haciendo que los mismos sean más eficientes reduciendo la emisión de agentes nocivos para el medio ambiente y la salud pública.

Una de las mejores soluciones que se han planteado para disminuir el impacto ambiental, ha sido el reciclaje proceso por el cual se recolecta los materiales de uso común y se transforman para el mismo u otro uso, evitando incurrir a usar más materia prima⁹

Debido a que la arcilla, materia prima principal en el proceso productivo de ladrillos, es un recurso limitado, es necesaria la búsqueda de alternativas que disminuyan el consumo de ésta. Se estudio la incorporación de residuos y materiales orgánicos, tales como residuos de la industria del papel. Así, como la utilización de varios residuos de actividades industriales y de agricultura como aserrín, tabaco y pasto para la fabricación de ladrillos y analizó los efectos de moldeo, plasticidad, densidad y propiedades mecánicas que se obtienen en los ladrillos a los que se les disminuye la cantidad de arcilla¹⁰.

⁹ KADIR, A., & MOHAJERANI, A. (4-6 de July de 2011). BRICKS: AN EXCELLENT BUILDING MATERIAL FOR RECYCLING WASTES – A REVIEW. Proceedings of the IASTED International Conference. doi: 10.2316/P.2011.736-029

¹⁰ ORTÍZ, M., & GONZÁLEZ, S. (27 de julio de 2016). Uso de residuos cerámicos en la producción de ladrillos de arcilla cocidos del sector alfarero de Candelaria. PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA , Cali. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11522/7796>.

La elaboración de ladrillos ecológicos responde a las necesidades de disminuir el gasto energético y el impacto ambiental provocado por subproductos provenientes de cultivos agrícolas e industriales y desechos urbanos, teniendo necesidad de aumentar la calidad medio ambiental. En este trabajo se propone la elaboración de ladrillos puzolánicos sin cocción y con materiales que no se degradan en la naturaleza¹¹.

¹¹ LAGUNA, M. (junio de 2011). LADRILLO ECOLÓGICO COMO MATERIAL SOSTENIBLE PARA LA CONSTRUCCIÓN.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 LADRILLOS ECOLÓGICOS

Entre los materiales ecológicos se encuentra el “ladrillo ecológico”, el cual es un buen aislante de frío y de calor exterior, por lo que permite significativas disminuciones de costos en el mantenimiento térmico de viviendas y edificios, y principalmente gasta menos energía. También es económico, resistente a los agentes naturales, durables y capaces de soportar cargas muy pesadas. Por otra parte, el ladrillo ecológico es similar en tamaño y textura al ladrillo convencional¹²

2.2 NORMAS DE LADRILLOS

2.2.1 Unidades de Mampostería de Arcilla Cocida - Ladrillos y Bloques Cerámicos - NTC 4205 (2003). Norma Técnica Colombiana Ingeniería Civil y Arquitectura-Colombia. Establece los requisitos que deben cumplir los ladrillos y bloques cerámicos utilizados como unidades de mampostería y fija los parámetros con que se determinan los distintos tipos de unidades, los valores se deben regir de acuerdo con el sistema internacional de unidades (ver la NTC 1000)¹³.

2.2.2 Método para muestreo y ensayos de unidades de Mampostería y otros productos de arcilla- NTC 4017 (2005). Norma Técnica Colombiana Ingeniería Civil y Arquitectura –Colombia. La norma cubre los procedimientos de muestreo y ensayo de unidades de mampostería de los ensayos incluyendo el módulo de rotura, resistencia a la compresión, absorción de agua, tasa inicial de absorción,

¹² Parnisari, Oscar (2014). Ladrillos Ecológicos, 18 de noviembre del 2016 [En línea] <http://www.ladrillosecologico.com.ar/>

¹³ Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC). (2003), NTC 4205, 20 de noviembre del 2016 [En línea] <http://docslide.us/documents/ntc-4205pdf.html>

determinación de la masa, tamaño, alabeo, uniformidad dimensional, choque térmico y expansión por humedad¹⁴].

2.3 RESIDUOS SOLIDOS APROVECHABLE

Es cualquier material, objeto, sustancia o elemento sólido que no tiene valor de uso directo o indirecto para quien lo genere, pero que es susceptible de incorporación a un proceso productivo ¹⁵

2.4 LADRILLO FABRICADO CON RESIDUOS SÓLIDOS

Es un ladrillo ecológico elaborado de arcilla y desechos aprovechables provenientes de plantas de tratamientos de basuras ó vertederos¹⁶.

2.5 ESTADO DEL ARTE

El Ladrillo es el material de construcción más antiguo fabricado por el hombre. En los primeros tiempos se comenzó elaborándolo en su forma cruda, que es el adobe. Su difusión se debió a que el hombre le dio tamaño que se acomodaba a su mano y para hacerlo recurrió a materias primas accesibles, que se pueden encontrar casi en cualquier parte.

No puede menos que llamarnos la atención que con elementos tan comunes como la tierra, el agua, el aire (para el secado) y el fuego (para la cocción) el hombre logró fabricar un material de construcción que, con muy pocas variantes

¹⁴ Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC). (2003), NTC 4017, 20 noviembre del 2016 [En línea] <https://es.scribd.com/doc/199898739/NTC-4017>

¹⁵ David Fernando R.N, Yezitd Andrés Cornejo. (2014). Estado del Arte de la Construcción con Material reciclable, universidad católica de Colombia, facultad de ingeniería, programa de ingeniería civil, Bogotá d.c 2014, 27 de noviembre del 2016.

¹⁶ Aeslina Abdul Kadir, Abbas Mohajerani. (2011). Bricks: An Excellent building material for recycling wastes. Environmental Management and Engineering (EME 2011), July 4-6, 2011 Calgary, AB, Canada

tecnológicas, siguen manteniendo plena vigencia y demanda hasta nuestros días. Se sabe que el ladrillo se originó en las antiguas civilizaciones del Medio Oriente que tenían sus centros en territorios que hoy corresponden a Irak e Irán aproximadamente, pero que extendían mucho más su influencia y se remontan en el tiempo a más de dos mil quinientos años antes de nuestra era. Desde esa región, las caravanas de pueblos nómades y, sucesivamente, las conquistas de Alejandro Magno, las del Imperio Romano y las rutas comerciales de Marco Polo pusieron en contacto a las diversas culturas y contribuyeron a generalizar, entre otras costumbres y modalidades, el uso del ladrillo¹⁷.

Los residuos de la actividad humana o basura, han sido un problema que ha ido incrementándose, lo cual, a lo largo de la historia, ha presentado inconvenientes como enfermedades, contaminación y empeoramiento de las condiciones de vida de algunas comunidades, no solo humanas sino también de otras especies.

Debido a esto el hombre ha intentado idear diversas soluciones para aminorar, y en algunos casos eliminar la producción de desperdicios; Gracias a la conciencia ambiental que ha ido aumentando en las nuevas generaciones de profesionales, se han mejorado los procesos de desarrollo de diferentes trabajos, haciendo que Los mismos sean más eficientes reduciendo la emisión de agentes nocivos para el medio ambiente y la salud pública.

Una de las mejores soluciones que se han planteado para mermar el impacto ambiental, ha sido el reciclaje proceso por el cual se recolecta los materiales de uso común y se transforman para el mismo u otro uso, evitando incurrir a usar más materia prima ¹⁸

¹⁷ Alejandro Salazar J. (1998) Producción de Eco materiales con Base en Residuos Sólidos Industriales y Escombros de Construcción. Universidad del Valle. [En línea] <http://www.ecoingenieria.org/docs/Ecoladrillos.pdf>

¹⁸ David Fernando R.N, Yezitd Andrés Cornejo. (2014). Estado del Arte de la Construcción con Material reciclable, universidad católica de Colombia, facultad de ingeniería, programa de ingeniería civil, Bogotá d.c 2014, 27 de noviembre del 2016.

Desde 1976 en el Departamento de Materiales de la Universidad del Valle y en la Corporación Construir desde 1997, se han realizado experiencias de laboratorio y de planta piloto para la producción de ladrillos y adoquines con base en residuos sólidos industriales. Hasta la fecha se han probado los siguientes materiales: residuos de cerámica roja de la producción de tejas y ladrillos, cenizas volantes y escorias gruesas de las carboeléctricas, escombros de construcción de la ciudad de Cali, residuo del apagado de la cal de la planta de potabilización de agua, arena del río Cauca, cenizas del bagazo de la caña de azúcar de las centrales azucareras, residuos de plantas de tratamiento de aguas residuales, polvos de plantas de trituración de agregados diabásicos. Los resultados en todos los casos satisfacen las normas que para el efecto hay en Colombia. Se han empleado tres métodos para el tratamiento hidrotérmico: un invernadero (temperatura media 42 [°C] y humedad relativa mayor del 95%), una cámara de curado con agua caliente (temperatura de 95 ± 4 [°C]) y una autoclave a 10.5 kg/cm². Para el confinamiento se han utilizado: una prensa manual CIMVA-RAM y varias prensas hidráulicas diseñadas para el efecto, aplicando presión entre los 50 y 280 [kg/cm²]¹⁹.

¹⁹ Alejandro Salazar J. (1998) Producción de Eco materiales con Base en Residuos Sólidos Industriales y Escombros de Construcción. Universidad del Valle. [En línea] <http://www.ecoingenieria.org/docs/Ecoladrillos.pdf>

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Obtener un ladrillo de construcción que cumpla las especificaciones de normas ICONTEC NTC 4205 y NTC 4017, a partir de componentes generados en los desechos sólidos separados mediante operaciones de beneficio de minerales.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

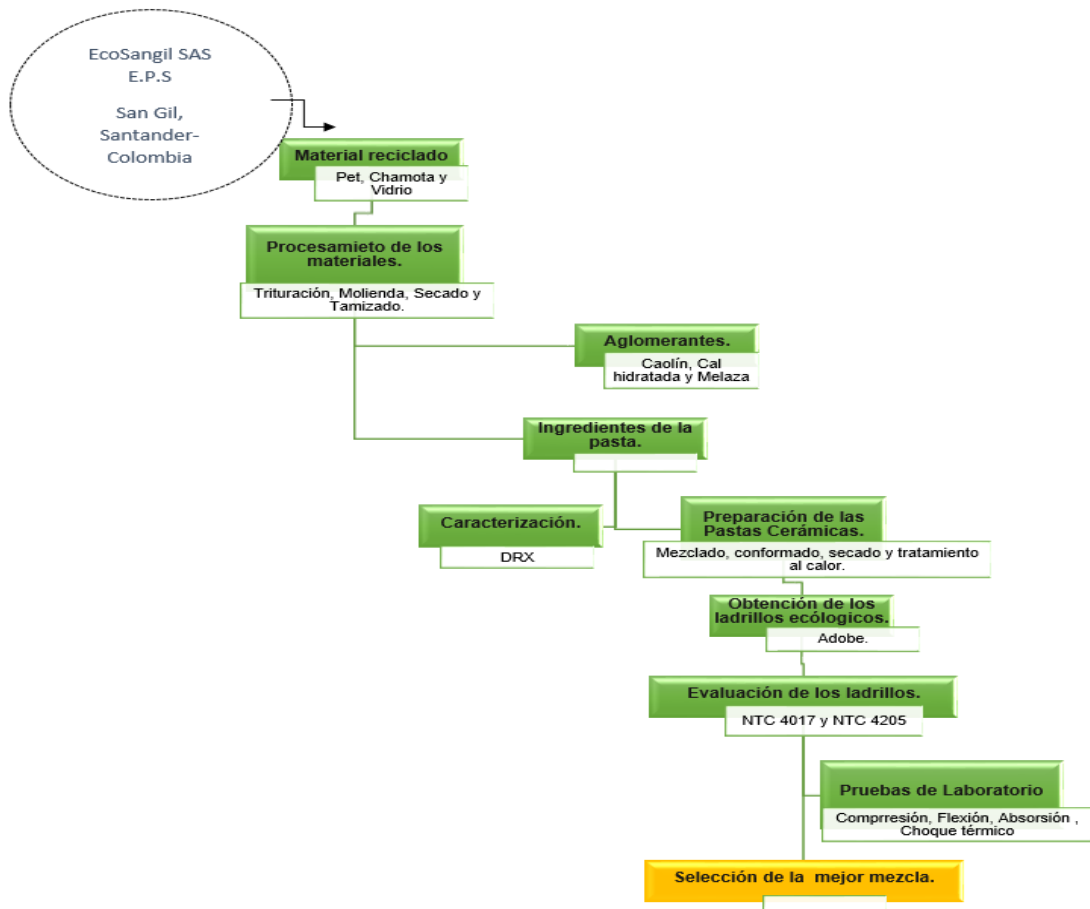
- Caracterizar física, química y granulométricamente los residuos sólidos reciclables del municipio de Charalá, Santander.
- Fabricar ladrillos de construcción mediante mezclado, compactación y tratamiento al calor, basados en la norma ICONTEC, NTC 4017.
- Realizar pruebas de resistencia a la compresión, módulo de rotura, absorción de agua, choque térmico, basadas en las normas ICONTEC NTC 4017 y NTC 4205, para validar el producto.

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

A continuación, se presenta el esquema del desarrollo experimental seguido en el proyecto (Ver figura 1).

La cual comprende cinco (5) etapas: Recolección materia prima, caracterización de los residuos y aglomerantes, preparación del ladrillo, pruebas o ensayos mecánicos y el informe final.

Figura 1. Diagrama de flujo desarrollo experimental



4.1 MATERIALES Y MÉTODOS

4.1.1 Caracterización de los materiales reciclables obtenidos de los residuos sólidos urbanos (RSU). El PET y vidrio utilizados en la realización del trabajo, provienen de una planta de manipulación y tratamiento de residuos sólidos urbanos e industriales llamada EcoSangil sas E.S.P ubicada a siete (7) kilómetros de distancia del casco urbano de San Gil, vía cabrera. Predio denominado el Trébol, vereda el Cucharo localizada en un área intermedia de los rellenos sanitarios de la Empresas EPSACOL y ACUASAN ²⁰

La planta recibe los residuos de 15 municipios cercanos como: Charalá, Barichara, Valle de San José, San Gil, entre otros. Su labor radica en la recolección de materiales clasificados y no clasificados, obtienen 250 (TON) por semana de material orgánico y 260 (TON) de material inerte; pero tan solo son aprovechados 15 (TON) por semana²¹. La chamota es proporcionada por la bodega de materiales Castro, localizada en el casco urbano de Charalá.

Para el desarrollo de la investigación, se recolectaron cerca de 40 (kg) tereftalato de polietileno (PET), 30 (kg) de vidrio, 20 (kg) de chamota, 5(kg) de cal hidratada, 15 (kg) de caolín y 5 (gal) de melaza (Ver Anexo C). Materiales como el vidrio y la chamota, fueron disgregados mediante una porra, para el PET se usó, tijeras y una trituradora de disco y luego fueron llevados al proceso de secado a la intemperie, reduciendo las medidas volumétricas y permitiendo su fácil almacenaje.

Posteriormente, se procesaron usando operaciones unitarias de beneficios de minerales como la trituración (Trituradora de mandíbulas y de cuchillas), molienda (molino de bolas), y tamizado (malla pasante 50 Tyler) para el vidrio y chamota.

²⁰ EcoSangil sas E.S.P. [En línea]< <http://www.ecosangil.com/>> [Consulta: 20 de agosto de 2017].

²¹ *Ibíd.*

Seguido, se caracterizaron químicamente por DRX; incluyendo también los aglomerantes.

4.2 PREPARACIÓN Y EVALUACIÓN DE LAS PASTAS CERÁMICAS

Los reciclables se sometieron a mezclas, estas pastas fueron preparadas usando variaciones volumétricas de los materiales, a través de un vaso medidor (taza) para la mezcla, cuyo propósito es la obtención de características adecuadas para la producción de ladrillos ecológicos convencionales de excelente calidad. Todas las pastas cerámicas fueron preparadas, conformadas, secadas y llevadas a tratamiento de calor.

4.2.1 Mezclado. Los materiales se mezclaron manualmente hasta lograr una homogeneidad y se elaboraron las mezclas respectivas según tabla 1. Se agregó una solución de agua con melaza de concentración $84,03 \left[\frac{g}{L}\right]$, dando el punto empíricamente, hasta formar una masa con una consistencia uniforme.

Tabla 1. Mezclas utilizadas y sus equivalencias en masa (g) en la fabricación del ladrillo

COMBINACIONES				Materia prima	[g]
A1 (taza)		A2 (taza)			
$\frac{1}{4}Ca(OH)_2$	$\frac{3}{4}Chamota$	$\frac{1}{2}Ca(OH)_2$	$\frac{3}{4}Chamota$	$\frac{1}{4}Ca(OH)_2$	34,41
$\frac{1}{4}RSU$	$\frac{1}{2}Caolín$	$\frac{1}{4}RSU$	$\frac{3}{4}Caolín$	$\frac{1}{4}RSU$	41,03
Solución : 96 (ml)		Solución : 115 (ml)		$\frac{1}{4}Cemento$	62,13
B1 (taza)		B2 (taza)			
$\frac{1}{4}Ca(OH)_2$	$\frac{3}{4}Chamota$	$\frac{1}{4}Ca(OH)_2$	$\frac{3}{4}Chamota$	$\frac{1}{4}Caolín$	33,545
$\frac{1}{2}RSU$	$\frac{3}{4}Caolín$	1 RSU	$\frac{3}{4}Caolín$	$\frac{1}{4}Chamota$	61,77
Solución : 120 (ml)		Solución : 130 (ml)			

*RSU: Residuos sólidos urbanos (50% PET y 50% Vidrio, en masa)

4.2.2 Conformado. La fabricación de las probetas fue por apisonado manual de las pastas, con dimensiones: 2(cm) x 4(cm) x 8(cm) gracias a la utilización de una formaleta, lubricación respectiva y desmoldeo (Ver figura 2).

Figura 2. Molde empleado en la fabricación del ladrillo ecológico



4.2.3 Secado. Se realizó a la intemperie bajo sombra por 6 días, para prevenir agrietamientos durante el tratamiento al calor y la eliminación brusca del agua.

4.2.4 Tratamiento al calor. Las probetas se calentaron en una estufa, a una temperatura entre 80(°C) y 150 (°C) por 1 (h) para asegurar la aglomeración de los materiales, garantizando que el PET no se quemara, con una velocidad de calentamiento baja, evitando cambios bruscos de temperatura.

4.2.5 Ensayos de propiedades físicas y mecánicas. Por último, los ladrillos ecológicos obtenidos con las diferentes mezclas fueron evaluadas de acuerdo con la norma técnica colombiana NTC 4017(Métodos para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla).

4.2.5.1 Ensayo de compresión. El ensayo de compresión se realizó de acuerdo con la norma técnica colombiana NTC 4017 (Métodos para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla) a las ocho combinaciones con dimensiones: 2(cm) x 4(cm) x 8(cm), las cuales se secaron a

la intemperie por 6 días, la temperatura del tratamiento al calor fue 80 (°C) y 150 (°C) por 1 (h) en la estufa, luego se enfriaron a temperatura ambiente, finalmente fueron llevadas a una MTS 370-02 LOAD FRAME de 25 (KN) con una velocidad de carga de 8000 (N/min) y velocidad de desplazamiento 1,1 (mm/min) (Ver Anexo D). Y se aplicó carga en el área de contacto hasta llevarlas a la falla (Ver figuras 3 y 4).

Figura 3. Carga aplicada área de contacto



Fuente: Laboratorio de Ingeniería Mecánica-UIS.

Figura 4. Evidencia de falla luego del ensayo de compresión



Fuente: Laboratorio de Ingeniería Mecánica-UIS.

Los resultados del ensayo se expresan en unidades de esfuerzo ($\text{MPa} = \frac{N}{\text{mm}^2}$); el

valor de resistencia corresponde al comportamiento de un ladrillo apoyado con una carga distribuida en toda la superficie superior y su cálculo obedece a la siguiente ecuación.

$$\delta = \frac{\omega}{ab}$$

En donde:

δ = Esfuerzo a la compresión, en ($\text{MPa} = \frac{N}{\text{mm}^2}$)

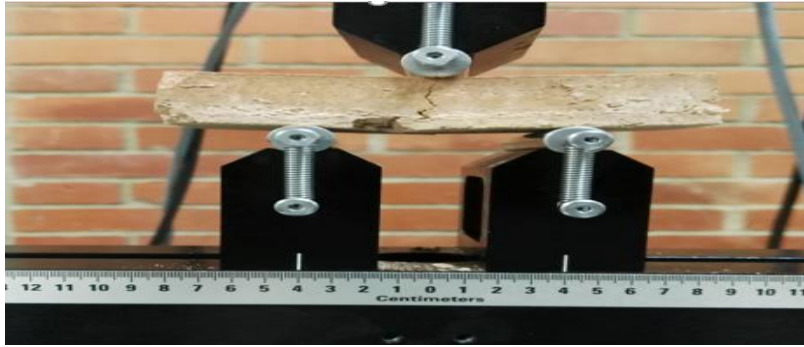
ω = Carga máxima indicada por la máquina de prueba, en (N = kgf)

a = Ancho neto (distancia de cara a cara), en (mm)

b = Largo neto (distancia desde la cara exterior hasta la cara interior), en (mm)

4.2.5.2 Ensayo de flexión. El ensayo de flexión se realizó de acuerdo con la norma técnica colombiana NTC 4017 (Métodos para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla) a las ocho combinaciones con dimensiones: 2(cm) x 4(cm) x 8(cm), las cuales se secaron a la intemperie por 6 días, la temperatura de tratamiento al calor fue 80 (°C) y 150 (°C) por 1 (h) en la estufa, luego se enfriaron a temperatura ambiente, finalmente fueron llevadas a una MTS 370-02 LOAD FRAME de 25 (KN) con una velocidad de carga de 8000 (N/min) y velocidad de desplazamiento 1,1 (mm/min) (Ver Anexo D), y se aplicó carga en el área de contacto hasta llevarlas a la falla (Ver figura 5).

Figura 5. Ensayo de flexión del ladrillo ecológico convencional



Fuente: Laboratorio de Ingeniería Mecánica- UIS.

Los resultados del ensayo se expresan en unidades de esfuerzo ($\text{MPa} = \frac{N}{\text{mm}^2}$); el valor de resistencia corresponde al comportamiento de un ladrillo apoyado con una carga central y su cálculo obedece a la siguiente ecuación:

$$MR = \frac{3\omega\left(\frac{L}{2}-X\right)}{bd^2}$$

En donde:

MR = Módulo de rotura en el plano de falla, en ($\text{MPa} = \frac{N}{\text{mm}^2}$)

ω = Carga máxima indicada por la máquina de prueba, en (N = kgf)

L = Distancia entre los soportes (medida centro a centro), en (mm)

b= Ancho neto (distancia de cara a cara) de la muestra en el plano de falla, en (mm)

d = Profundidad (distancia desde la cara superior hasta el plano de apoyo) de la muestra en el plano de falla, en (mm)

X= Distancia promedio del plano de falla al centro de la pieza, medida en la dirección de la línea centro de la superficie sometida a tensión, en (mm).

4.2.5.3 Ensayo de absorción de agua. Según la NTC 4017 (Métodos para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla), se seleccionaron ocho combinaciones, con dimensiones volumétricas, proceso de secado y tratamiento al calor, similares que fueron empleadas en los ensayos de resistencia a la compresión y flexión.

Se halló la masa seca para sumergir en agua por 24 (h), pasado el tiempo de inmersión, se secan y a través del uso de una balanza BJ 1000C, se procede a tomar respectivamente los pesos.

La evaluación de la absorción durante las 24 (h) se determina con la ecuación

$$\% \text{ Absorción} = \left(\frac{W_{ss} - W_s}{W_s} \right) * 100\%$$

En donde:

Ws= Masa seca el espécimen antes de inmersión, en (g)

Wss= Masa sumergida en agua del espécimen saturado luego de inmersión en agua, en (g).

4.2.5.4 Ensayo de choque térmico. De acuerdo con la adaptación de la norma técnica colombiana NTC 1432 (Determinación de la resistencia al choque térmico). Se precalentó el horno y estandarizó a una temperatura de 200 (°C), seguido se introdujeron las probetas durante 10 (min), transcurrido el tiempo se extraen y revisan que no cuenten con ninguna alteración en su matriz o superficie. Al no

presenciar cambio alguno, se repite el proceso hasta observar la aparición de daños superficiales, se tendrá en cuenta el tiempo de exposición del ladrillo.

4.3 SELECCIÓN DE LAS PASTAS MÁS ADECUADAS PARA LA FABRICACIÓN DE LOS LADRILLOS

Los ladrillos cumplen distintas funciones, por ende, tienen diferentes requisitos de calidad, se ha tomado la norma técnica colombiana NTC 4205 (Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos), como criterio de selección de la pasta más conveniente en la elaboración de ladrillos ecológicos, respectivamente.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y GRANULOMÉTRICA

Luego del proceso de selección y posterior limpieza de los componentes de los residuos sólidos urbanos: PET, chamota, vidrio pulverizado; se procede mediante operaciones unitarias de beneficio de minerales a la conminución de la materia prima hasta un tamaño de partícula menor a malla 50 Tyler.

Los resultados de las pruebas de DRX realizados en los laboratorios de Guatiguará incluyen un reporte que muestra un listado con diferentes composiciones, fórmulas químicas, parámetros cristalográficos y los difractogramas correspondientes a las materias primas utilizadas (Ver Anexo B).

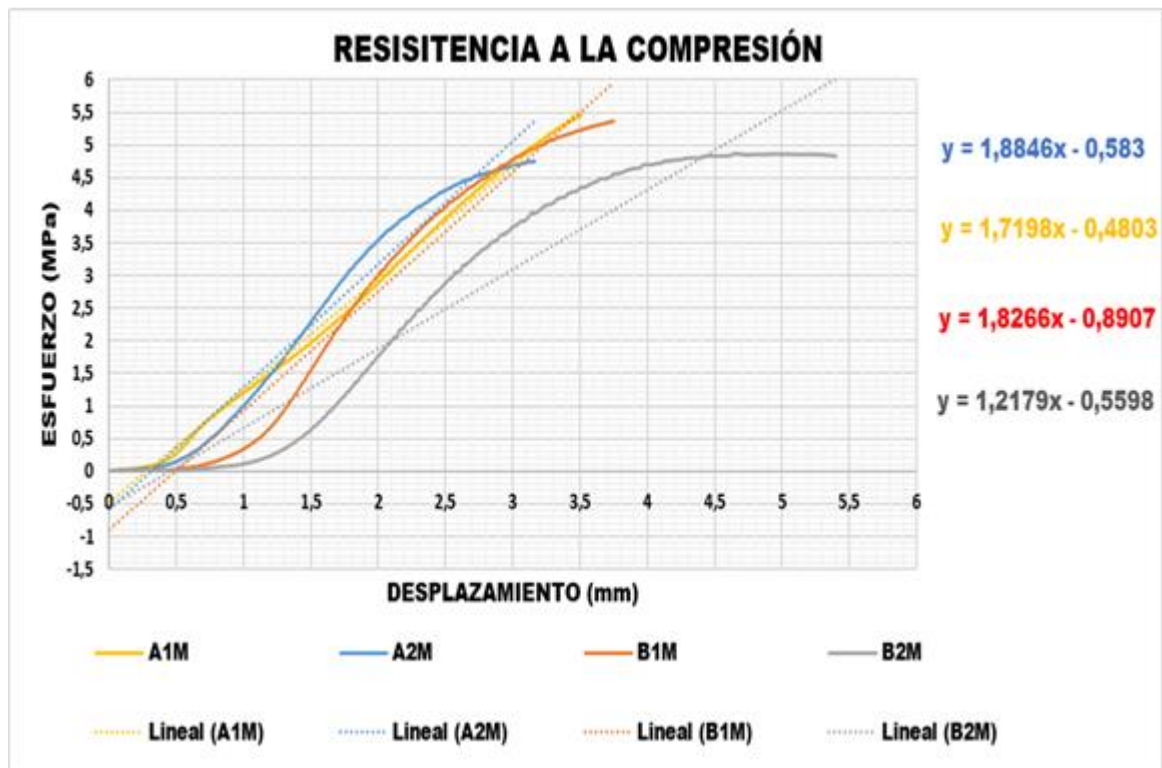
Para interpretar estos resultados de DRX se utilizó el programa XRD Pert HighScore Plus, el cual permite seleccionar cada uno de los componentes que aparece en la lista organizado en mayor porcentaje y asignando un color, de esa forma tal color se ubica en diferentes picos en el difractograma, lo cual permite recorrer la presencia de cada uno de los componentes.

Se resalta la presencia de compuestos de gran interés en la chamota, caolín, como el cuarzo (SiO_2) con porcentajes de 71,9 %, 52.6 % (ver tabla 3 y 4), respectivamente. Adicionalmente, materias primas como el PET y vidrio pulverizado no cuentan con un listado de composiciones identificable debido a su comportamiento amorfo (Ver figura 15 y 16).

5.2 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS AL LADRILLO OBTENIDO

5.2.1 Ensayo de compresión

Figura 6. Resistencia a la compresión, muestras expuestas a la temperatura de tratamiento al calor 150 (°C)



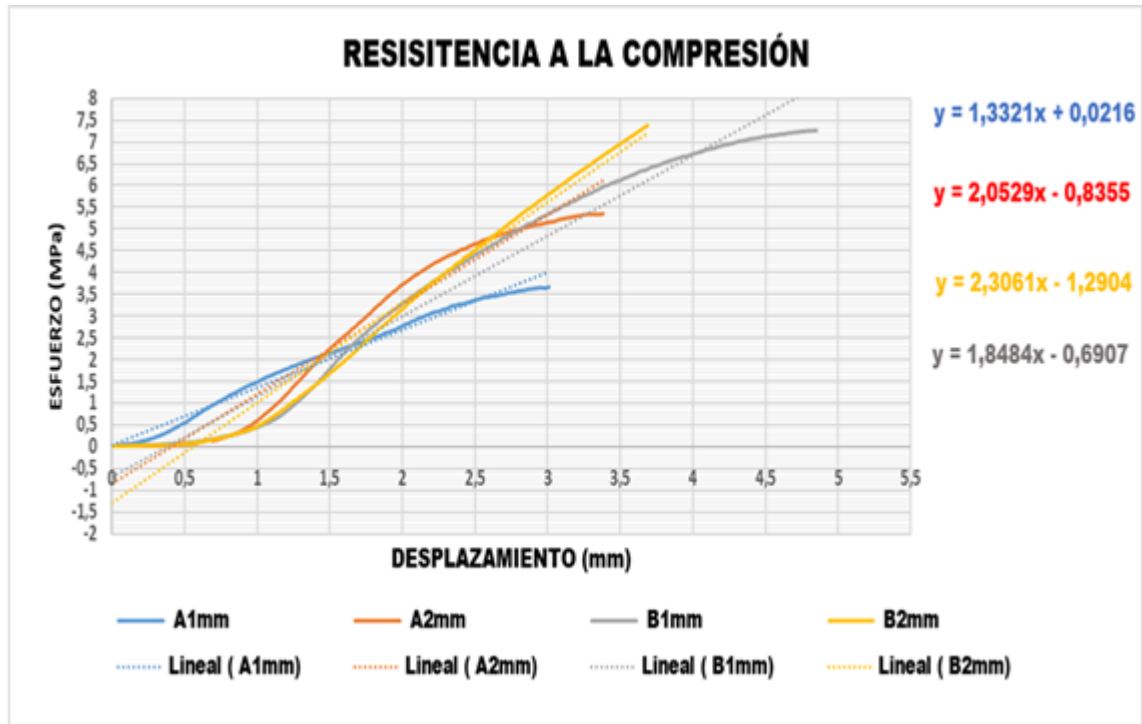
$$\text{Nota: } A1M = \frac{1}{4} \text{Ca(OH)}_2; \frac{3}{4} \text{Chamota}; \frac{1}{4} \text{RSU}; \frac{1}{2} \text{Caolin}$$

$$A2M = \frac{1}{2} \text{Ca(OH)}_2; \frac{3}{4} \text{Chamota}; \frac{1}{4} \text{RSU}; \frac{3}{4} \text{Caolin}$$

$$B1M = \frac{1}{4} \text{Ca(OH)}_2; \frac{3}{4} \text{Chamota}; \frac{1}{2} \text{RSU}; \frac{3}{4} \text{Caolin}$$

$$B2M = \frac{1}{4} \text{Ca(OH)}_2; \frac{3}{4} \text{Chamota}; 1 \text{RSU}; \frac{3}{4} \text{Caolin}$$

Figura 7. Resistencia a la compresión, muestras expuestas a la temperatura de tratamiento al calor mínima 80 (°C)



$$\text{Nota: A1m} = \frac{1}{4} \text{Ca(OH)}_2; \frac{3}{4} \text{Chamota}; \frac{1}{4} \text{RSU}; \frac{1}{2} \text{Caolín}$$

$$\text{A2m} = \frac{1}{2} \text{Ca(OH)}_2; \frac{3}{4} \text{Chamota}; \frac{1}{4} \text{RSU}; \frac{3}{4} \text{Caolín}$$

$$\text{B1m} = \frac{1}{4} \text{Ca(OH)}_2; \frac{3}{4} \text{Chamota}; \frac{1}{2} \text{RSU}; \frac{3}{4} \text{Caolín}$$

$$\text{B2m} = \frac{1}{4} \text{Ca(OH)}_2; \frac{3}{4} \text{Chamota}; 1 \text{RSU}; \frac{3}{4} \text{Caolín}$$

Figuras 6 y 7, representan el promedio de 3 muestras para cada mezcla, sometidas a temperaturas de 80 (°C) y 150 (°C), el comportamiento de las mezclas A1M y B2mm excede la máxima capacidad de carga 25(KN) provista por la máquina de ensayos MTS 370-02 LOAD FRAME, equipo usado por la disponibilidad al momento de realizar el ensayo, motivado por su grado de compactación; los resultados obtenidos pueden atribuirse a las características heterogéneas de las mezclas, presentando una mejor distribución debido a su longitud por lo cual la distribución de esfuerzos internos probablemente presentó mejor capacidad de absorber y redistribuir las cargas .

La exposición de los ladrillos ecológicos a temperatura mínima 80 (°C), incrementa de forma leve la resistencia a la compresión de 0 (Mpa) a 8 (Mpa), comparada con los expuestos a la temperatura máxima 150 (°C) de 0 (Mpa) a 6 (Mpa) tomando como referencia el valor de resistencia más alto; a excepción de la mezcla A1M cuyo rendimiento fue bajo, ocasionado por la mínima cantidad de aglomerantes y baja compatibilidad [17]. Las mezclas A1, A2 y B1 presentan estadísticamente una tendencia similar en su comportamiento a la compresión.

5.2.2 Ensayo de flexión

Figura 8. Resistencia a la flexión muestras expuestas a la temperatura de tratamiento al calor máxima 150 (°C)

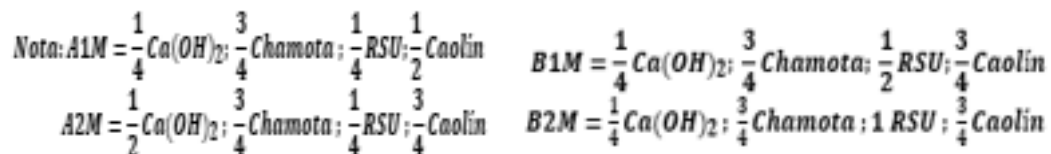
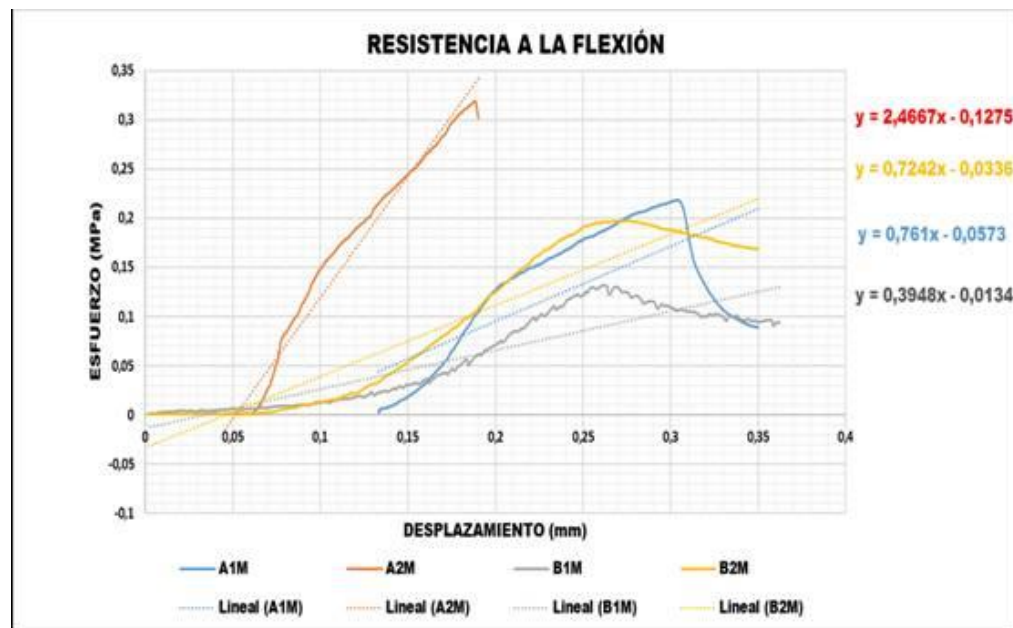
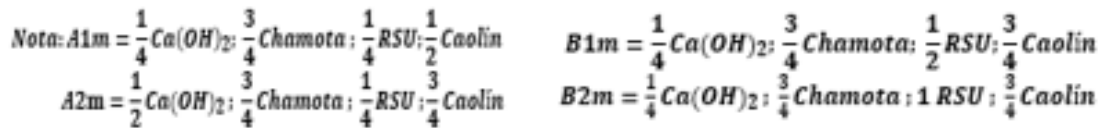


Figura 9. Resistencia a la flexión muestras expuestas a la temperatura de tratamiento al calor mínima 80 (°C)



Las figuras 8 y 9, son el resultado de promediar 3 especímenes por cada mezcla, mostrando los resultados de la resistencia a la flexión al ser expuestos a una temperatura de 80 (°C) y 150 (°C). Se observa el comportamiento de las mezclas A2M y B2mm que poseen los valores de módulo de rotura más altos: 0.33 (MPa) y 0.31 (MPa) respectivamente, resaltando A2M por su poco desplazamiento, indicando una mejor resistencia, característica apreciable de los cerámicos tradicionales.

Las combinaciones B1M y B1mm, representan el más bajo valor de módulo de rotura con desplazamientos cortos. Señalando la gran importancia de la cantidad

de residuos sólidos, producto de una mejor compactación. Es importante resaltar la tendencia mostrada en las mezclas B2M y B2m caracterizadas por contener el mayor porcentaje de RSU (1 taza : 50 % vidrio y 50 % PET , en masa) con respecto a las mezclas B1M y B1m cuyo porcentaje de RSU es la mitad (1/2 taza : 50 % vidrio y 50 % PET , en masa) , se aprecia que incide en la capacidad de soportar mayor cantidad de esfuerzo , por poco lo duplica antes de llegar a la falla ; atribuyendo su comportamiento a la distribución granulométrica , variable de suma importancia , dado que de ella va a depender el grado de empaquetamiento de las partículas, por tanto las propiedades físicas mecánicas tales como absorción de agua y resistencia a la flexión.

Variables como la temperatura mínima 80 (°C), adición máxima de aglomerantes y residuos sólidos urbanos (RSU: 50% PET y 50% vidrio), fomentan el incremento de la resistencia a la flexión (Ver figura 9). Las propiedades de cualquier sistema heterogéneo dependen de las características físicas y químicas de los materiales que lo componen y de las interacciones entre ellos. La forma y textura de los agregados también influyen. Agregados de forma cúbica y rugosa permiten mayor adherencia, respecto de los agregados redondeados y lisos, aumentando la resistencia²².

Las mezclas A1m, B2M presentan estadísticamente una tendencia similar en su comportamiento de resistencia a la flexión; a diferencia de las combinaciones mostradas en la figura 9, las cuales no evidencia un comportamiento similar entre ellas.

5.2.3 Ensayo de absorción de agua. En la tabla 5, se muestran los resultados obtenidos al realizar el ensayo de absorción de agua. (Ver Anexo E)

²² OSORIO, D. (28 de junio de 2013). *BLOG 360° EN CONCRETO*. Obtenido de <http://blog.360gradosenconcreto.com>

La evaluación de la absorción durante las 24 (h) para cada combinación se determinó empleando la ecuación:

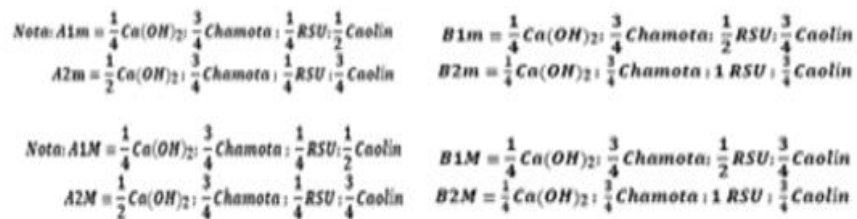
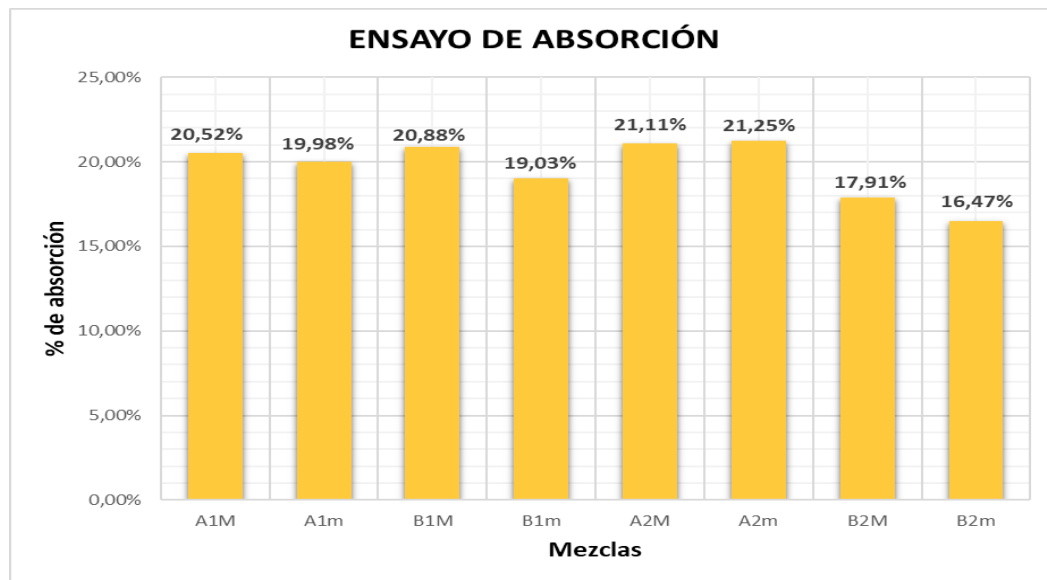
$$\% \text{ Absorción} = \left(\frac{W_{ss} - W_s}{W_s} \right) * 100\%$$

En donde:

W_s = Masa seca el espécimen antes de inmersión, en (g)

W_{ss} = Masa sumergida en agua del espécimen saturado luego de inmersión en agua, en (g).

Figura 10. Resultados prueba de absorción en diagrama de barras



A partir de los valores obtenidos según figura 10 , la mezclas expuesta a una temperatura de 80 (°C) (A1m,B1m,B2m) obtuvieron los menores valores , destacando B2m con un mejor comportamiento registrando el valor más bajo 16,47 %, indicando una alta compactación de los materiales al momento de su fabricación , motivado por la poca presencia de espacios intermoleculares o poros responsables ,en gran medida del comportamiento permeable; a diferencia de las mezclas sometidas a temperaturas de 150 (°C) (A1M,B1M,A2M) con los porcentajes más altos , producto de las reacciones en el interior de la arcilla generando gases que buscan salida y crean un nuevo sistema de poros; este es el fenómeno de hinchazón, que es una dilatación general de la pieza , repercutiendo en los porcentajes de absorción de agua²³.

5.2.4 Ensayo de choque térmico. En la tabla 6, se observan los valores obtenidos por el ensayo de choque térmico. (Ver Anexo F).

Combinaciones como A1M y B1M, resistieron mayor número de comprobaciones (6) seis y (4) cuatro respectivamente, soportando por más tiempo su apariencia y masa original, antes de la aparición de daños macroscópicos, como delaminación o agrietamiento (ver figura 11 y 12). Al contrario de A2m y B1m, las cuales mostraron un desarrollo progresivo de microgrietas en la primera comprobación, debido al efecto acumulativo de las tensiones térmicas, producto de las tensiones internas que se generan a través del espesor de las probetas, al ser enfriadas al ambiente desde una temperatura de 200 (°C), causando tensiones de tracción en la superficie y de compresión en el interior. Cuando esas tensiones de tracción alcanzan un valor crítico dado, se generan microgrietas, primero en la zona periférica de las probetas, que luego se propagan hacia el interior con sucesivos choques térmicos²⁴.

²³ OSORIO, D. (28 de junio de 2013). *BLOG 360° EN CONCRETO*. Obtenido de <http://blog.360gradosenconcreto.com>

²⁴ LAGUNA, M. (junio de 2011). LADRILLO ECOLÓGICO COMO MATERIAL SOSTENIBLE PARA LA CONSTRUCCIÓN

Figura 11. Evidencia de daños en la cara frontal del ladrillo



Figura 12. Evidencia de daños, cara posterior del ladrillo



Tabla 2. Resultados más representativos, obtenidos por los ensayos realizados al ladrillo ecológico Convencional

ENSAYO	$\delta_{MÁX}$ (MPa)	δ_{MIN} (MPa)	DESP _{MÁX} (mm)	DESP _{MIN} (mm)	NORMA NTC	LADRILLO CONVENCIONAL (cumple)
COMPRESIÓN	11 (B2mmC)	3,5 (A1mmC)	6 (B2mmC)	3 (A1mmC)	4205	NO
FLEXIÓN	0,32 (A2M)	0,13(B1M)	0,6 (B2mm)	0,13 (A1mm)	4205	NO
ENSAYO	PORCENTAJE MÁX (%Peso)		PORCENTAJE MIN (%Peso)		NORMA NTC	LADRILLO CONVENCIONAL (cumple)
ABSORCIÓN	21,25 (A2m)		16,47 (B2m)		4205	NO
ENSAYO	N° DE CHOQUES MÁX		N° DE CHOQUES MIN		NORMA NTC	LADRILLO CONVENCIONAL (cumple)
CHOQUE TÉRMICO (200°C)	6(A1M)		1 (B1m y A2m)		1432 adaptada	NO

6. CONCLUSIONES

El proceso de caracterización físico, química y granulométrica de las materias primas empleadas en la fabricación del ladrillo ecológico, permitió conocer la composición aproximada de cada uno de ellos y establecer su naturaleza, la chamota con [71.9%] Cuarzo (SiO_2), el caolín con [52.6%] Cuarzo (SiO_2), [19.7%] Caolinita-IA ($\text{Al}_2(\text{SiO}_2)(\text{OH}_4)$) y el vidrio, material amorfo con un alto porcentaje de SiO_2 ; según se evidencia en el DRX. Los materiales anteriormente mencionados son alternativas de reemplazo al consumo de arcilla, materia prima en el proceso productivo de la elaboración de ladrillos; motivando la reciclabilidad de los residuos sólidos urbanos, producto de la actividad humana.

El producto final de este proyecto de investigación, se obtiene siguiendo el proceso de fabricación de un ladrillo convencional, variando parámetros como temperatura ($T^{\circ}\text{min}$: 80°C ; $T^{\circ}\text{max}$: 150°C), cantidades volumétricas de los residuos sólidos urbanos y aglomerantes (Min: $\frac{1}{4}$ taza; Max: 1 taza). Dando como resultado, un ladrillo similar en tamaño, textura, considerándose como una alternativa sustentable y sostenible para uso en la construcción.

De acuerdo con los resultados obtenidos en los ensayos practicados según NTC 4017, se puede concluir que la exposición del ladrillo a temperatura de 80°C junto con la adición máxima de residuos sólidos urbanos (B2m), brinda la mejor respuesta en cuanto a resultados, comparado con las demás mezclas. Según los parámetros establecidos por la NTC 4205 [> 15 (Mpa) en compresión, $< 15\%$ en absorción, ≥ 5 % (Mpa) en flexión], lo cual indica que no alcanza el valor crítico de aceptación; sin embargo, con estos resultados se concluye que es viable técnicamente para ladrillos a la vista (decorativo) y ladrillo de techo, donde sus requerimientos mecánicos no son por cargas axiales.

7. RECOMENDACIONES

Con el fin de abarcar una mayor área de conocimiento con respecto a la fabricación de ladrillos ecológicos a partir de operaciones unitarias y tratamientos al calor, se recomienda lo siguiente para próximos trabajos de investigaciones sobre el tema:

Acordar y realizar el plan de trabajo, teniendo presente las limitaciones en cuanto a disponibilidad, funcionalidad y demanda de equipos de beneficios de minerales y equipos de caracterización.

Evaluar mediante pruebas de SEM y EDS el ladrillo final con el objetivo de obtener mayor información morfológica, topográfica y elemental, para brindar un análisis completo con respecto a las propiedades.

Estudiar la posibilidad de trabajar con diferentes materias primas procedentes de los residuos sólidos urbanos a las utilizadas en este proyecto, con el fin de observar su comportamiento, características y factibilidad.

Utilizar otras normativas (ASTM C56-10, ASTM C216-13 , ASTM C20-00), que aporten un número suficiente de pruebas para realizarle a los ladrillos, brindando así una mejor validación y caracterización del producto.

Mejorar los requisitos de aceptación en cuanto a resistencia mecánica de un ladrillo de construcción implicará el uso de insumos convencionales (Arcilla Caolinita) al momento de su fabricación.

Considerar la temperatura de tratamiento al calor empleada en la fabricación del ladrillo ecológico y su temperatura de exposición del ladrillo, dado que presentará

una afectación directa en sus propiedades mecánicas y acabado superficial, motivado por el carácter físico y químico de las materias primas empleadas.

BIBLIOGRAFIA

(s.f.). *El “ladrillo ecológico” como nuevo material para la construcción sustentable*. Proyecto de investigación.

Aeslina Abdul Kadir, Abbas Mohajerani. (2011). *Bricks: An Excellent building material for recycling wastes*. Environmental Management and Engineering (EME 2011), July 4-6, 2011 Calgary, AB, Canada.

AFANADOR, N., GUERRERO, G., & MONROY, R. (junio de 2012). MECHANICAL & PHYSICAL PROPERTIES OF SOLID, MASONRY CERAMIC BRICKS. *CIENCIA E INGENIERÍA NEOGRANADINA*, 22(1), 43-58.

Alejandro Salazar J. (1998) *Producción de Eco materiales con Base en Residuos Sólidos Industriales y Escombros de Construcción*. Universidad del Valle. [En línea] <http://www.ecoingenieria.org/docs/Ecoladrillos.pdf>

AMORÓS, M. (2011). *Desarrollo de un nuevo ladrillo de tierra cruda, con aglomerantes y aditivos estructurales de base vegetal*. Tesis(Master), E.U. de Arquitectura Técnica (UPM).

BARRANZUELA, J. (2014). *PROCESO PRODUCTIVO DE LOS LADRILLOS DE ARCILLA PRODUCIDOS EN LA REGIÓN PIURA*. Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil , Universidad de Piura, Perú.

BOCCACCINI, A., BOCCACCINI, D., PEARCE, D., & JANCZAK-RUSCH, J. (s.f.). Assessment of thermal shock induced damage in silicon carbide fibre reinforced glass matrix composites. *Materiales de construcción*, 48(251).

BUYLE, M., BRAET, J., & AUDENAERT, A. (October de 2013). Life cycle assessment in the construction sector: A review. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 26, págs. 379-388).

CASTAÑO, J., RODRÍGUEZ, R., LASSO, L., CABRERA, A., & OCAMPO, M. (octubre - diciembre de 2013). Gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en Bogotá: perspectivas y limitantes. *17(38)*, 121-129.

David Fernando R.N, Yezitd Andrés Cornejo. (2014). *Estado del Arte de la Construcción con Material reciclable, universidad católica de Colombia, facultad de ingeniería, programa de ingeniería civil, Bogotá d.c 2014, 27 de noviembre del 2016.*

EcoSangil sas E.S.P. [En línea]< <http://www.ecosangil.com/>> [Consulta: 20 de agosto de 2017].

GAGGINO, R. (august de 2008). RECYCLED PLASTIC BRICKS AND PANELS FOR SELFCONSTRUCTION. *Revista INVI*, 63, 137-163.

GALLERO, M. (2013). AGROINDUSTRIAS FAMILIARES EN MISIONES. FÁBRICAS DE LADRILLO Y ALMIDÓN DE MANDIOCA DE ALEMANES-BRASILEÑOS(1919-2009). *Población & Sociedad*, 20(1), 41-75.

GARCÍA, M., & BOHÓRQUEZ, M. (octubre-diciembre de 2013). Mechanical Resistance of bricks made of mixtures of clay and sludge from sewage treatment. *revista tecnura*, 17(38), 68-81.

GE, Z., WANG, Y., SUN, R., WU, X., & GUAN, Y. (2015). Influence of ground waste clay brick on properties of fresh and hardened concrete. En *Construction and Building Materials* (Vol. 98, págs. 128-136).

GE, Z., YUE, H., & SUN, R. (15 de September de 2015). Properties of mortar produced with recycled clay brick aggregate and PET. 93, 851-856.

GÓMEZ, G., BLANCO, E., & SÁNCHEZ, H. (22 de marzo de 2016). Analysis of temperatures during the firing bricks and final properties solid. *Revista Tecnura*, 21(51), 118-131. doi: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.1.a01>

HAHN, N., & LAURITZEN, E. (s.f.). Producción de residuos de construcción y reciclaje. *Revista Residuos*. Obtenido de <http://habitat.aq.upm.es/boletin/n2/aconst2.html>

Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC). (2003), NTC 4017, 20 noviembre del 2016 [En línea] <https://es.scribd.com/doc/199898739/NTC-4017>

Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC). (2003), NTC 4205, 20 de noviembre del 2016 [En línea] <http://docslide.us/documents/ntc-4205pdf.html>

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC). Unidades de mampostería de arcilla cocida, ladrillos y bloques cerámicos, 2008. NTC 4205.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC). Métodos para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla, 11 de noviembre de 2005. NTC 4017

JONES, C. (august de 2012). Grand challenges for the future of ecological engineering. En *Ecological Engineering* (Vol. 45, págs. 80-84).

KADIR, A., & MOHAJERANI, A. (4-6 de July de 2011). BRICKS: AN EXCELLENT BUILDING MATERIAL FOR RECYCLING WASTES – A REVIEW. *Proceedings of the IASTED International Conference*. doi: 10.2316/P.2011.736-029

LAGUNA, M. (junio de 2011). LADRILLO ECOLÓGICO COMO MATERIAL SOSTENIBLE PARA LA CONSTRUCCIÓN.

LAGUNA, M. (junio de 2011). LADRILLO ECOLÓGICO COMO MATERIAL SOSTENIBLE PARA LA CONSTRUCCIÓN.

LEYVA, A. (2012). *PROYECTO PARA UNA EMPRESA PRODUCTORA DE LADRILLOS DE PET*. INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, México.

MARTÍNEZ, A., & COTE, M. (Diciembre de 2014). Design and Construction of Bricks reusing PEt-based Materials. *INGE CUC*, 10(2), 76-80.

MOLINA, J., OROZCO, J., & ISIDRO, L. (1 de noviembre de 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. *Revista Investigacion Universitaria Quindío*, 26(1), 57-64.

MONTEIRO, S., & FONTES, C. (october de 2014). On the production of fired clay bricks from waste materials: A critical update. En *Construction and Building Materials* (Vol. 68, págs. 599-610).

ORTÍZ, M., & GONZÁLEZ, S. (27 de julio de 2016). *Uso de residuos cerámicos en la producción de ladrillos de arcilla cocidos del sector alfarero de Candelaria*. PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA , cali. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11522/7796>.

OSORIO, D. (28 de junio de 2013). *BLOG 360° EN CONCRETO*. Obtenido de <http://blog.360gradosenconcreto.com>

OSORIO, D. (28 de junio de 2013). *BLOG 360° EN CONCRETO*. Obtenido de <http://blog.360gradosenconcreto.com>

Parnisari, Oscar (2014). Ladrillos Ecológicos, 18 de noviembre del 2016 [En línea] <http://www.ladrillosecologico.com.ar/>

PÉREZ, Á. (2012). Use of Crushed Recycled Brick Coarse as Aggregate in the Use of Crushed Recycled Brick Coarse as Aggregate in the Elaboration of Concrete Elaboration of Concrete. *Revista de la Facultad de Ingeniería*, 13(26), 116-125.

PINTO, C., & FIGUEROA, L. (2016). *DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN CONCRETO ADICIONADO CON FIBRA DE FIQUE A PARTIR DE SU RESISTENCIA A LA TRACCIÓN, FLEXIÓN Y COMPRESIÓN*. Tesis para optar al título de Ingeniero Metalúrgico, UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, Bucaramanga.

PRYCE, W., CAMPBELL, J., & RODRÍGUEZ, C. (2016). *LADRILLO: HISTORIA UNIVERSAL*. BLUME, España.

SAFIUDDIN, M., JUMAAT, M., SALAM, M., ISLAM, M., & HASHIM, R. (18 de october de 2010). Utilization of solid wastes in construction materials . (A. Journals, Ed.) *International Journal of the Physical Science*, 1952-1963. Obtenido de <http://www.academicjournals.org/IJPS>.

SHAKIR, A., & MOHAMMED, A. (3 de septiembre de 2013). Manufacturing of Bricks in the Past, in the Present and in the Future: A state of the Art Review. *Institute of Advanced Engineering and Science*, 2(3), 145-156.

SHAKIR, A., NAGANATHAN, S., & MUSTPHA, K. (2013). Development Of Bricks From Waste Material: A Review Paper . *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 7(8), 812-818.

SUÁREZ, S., & TARAZONA, R. (2013). *OBTENCIÓN DE UN MORTERO DE CONTRUCCIÓN A PARTIR DE COLAS DE BENEFICIO GRAVIMÉTRICO DEL ORO*. Universidad Industrial de Santander, Santander, Bucaramnga.

TAAFFE, J., O'SULLIVAN, S., RAHMAN, M., & PAKRASHI, V. (August de 2014). Experimental characterisation of Polyethylene Terephthalate (PET) bottle Eco-bricks. *60*, 50-56.

ANEXOS

ANEXO A. CONDICIONES OPERATIVAS DE LOS ANÁLISIS DRX

Prueba DRX:

Preparación de las muestras	Los especímenes seleccionados de las muestras fueron molturados y homogenizados en un mortero de ágata y llevados. Posteriormente, los especímenes seleccionados de las muestras fueron montados en un porta-muestra de polimetilmetacrilato (PMMA) mediante la técnica de llenado frontal																								
Condiciones de medición	<p>Se realizó en un difractómetro de polvo marca BRUKER modelo D8 ADVANCE con Geometría DaVinci bajo las siguientes condiciones:</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 60%;">Voltaje</td> <td style="text-align: right;">40 (kV)</td> </tr> <tr> <td>Corriente</td> <td style="text-align: right;">40 (mA)</td> </tr> <tr> <td>Rendija de Divergencia</td> <td style="text-align: right;">0,6 mm</td> </tr> <tr> <td>Rendijas Soller Primario y Secundario</td> <td style="text-align: right;">2,5°</td> </tr> <tr> <td>Muestreo</td> <td style="text-align: right;">0,02035° 2Theta</td> </tr> <tr> <td>Rango de Medición</td> <td style="text-align: right;">3,5°-70,0° 2Theta</td> </tr> <tr> <td>Radiación</td> <td style="text-align: right;">CuKα</td> </tr> <tr> <td>Filtro</td> <td style="text-align: right;">Níquel</td> </tr> <tr> <td>Uso de Anti-dispersor de Aire</td> <td style="text-align: right;">Sí</td> </tr> <tr> <td>Detector</td> <td style="text-align: right;">Lineal LynxEye</td> </tr> <tr> <td>Tipo de barrido</td> <td style="text-align: right;">A pasos</td> </tr> <tr> <td>Tiempo de muestreo</td> <td style="text-align: right;">0,8 segundos</td> </tr> </table>	Voltaje	40 (kV)	Corriente	40 (mA)	Rendija de Divergencia	0,6 mm	Rendijas Soller Primario y Secundario	2,5°	Muestreo	0,02035° 2Theta	Rango de Medición	3,5°-70,0° 2Theta	Radiación	CuK α	Filtro	Níquel	Uso de Anti-dispersor de Aire	Sí	Detector	Lineal LynxEye	Tipo de barrido	A pasos	Tiempo de muestreo	0,8 segundos
Voltaje	40 (kV)																								
Corriente	40 (mA)																								
Rendija de Divergencia	0,6 mm																								
Rendijas Soller Primario y Secundario	2,5°																								
Muestreo	0,02035° 2Theta																								
Rango de Medición	3,5°-70,0° 2Theta																								
Radiación	CuK α																								
Filtro	Níquel																								
Uso de Anti-dispersor de Aire	Sí																								
Detector	Lineal LynxEye																								
Tipo de barrido	A pasos																								
Tiempo de muestreo	0,8 segundos																								
Ensayos	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis Cualitativo <p>Los análisis cualitativos de las fases presentes en los especímenes seleccionados de las muestras se realizaron mediante la comparación de los perfiles observados con los perfiles de difracción reportados en la base de datos PDF-2 (2014) del International Centre for Diffraction Data (ICDD).</p> <ul style="list-style-type: none"> • Análisis Cuantitativo <p>Los análisis cuantitativos de las fases encontradas se realizaron mediante el refinamiento por el Método de Rietveld entre los perfiles observados y los perfiles de difracción reportados en la base de datos. Los porcentajes reportados corresponden a la relación entre las fases policristalinas refinadas sin considerar el porcentaje de material amorfo. El porcentaje de las fases adicionales que no pudieron ser identificadas se encuentran dentro del material amorfo no determinado.</p>																								
Tratamiento de las muestras	<ul style="list-style-type: none"> • Ninguno 																								

ANEXO B. RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE EL ANÁLISIS DE DRX

Resultados obtenidos por DRX en la muestra de chamota

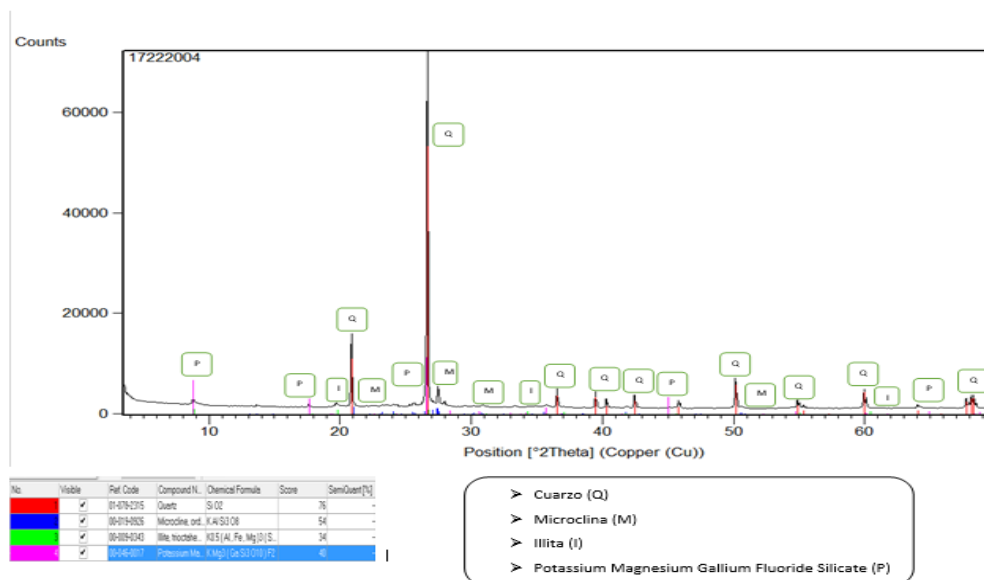
	FASE	PDF No.	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalino	Si O ₂	010-75-0443	Cuarzo	71,9%
	(K _{0.95} Na _{0.05}) Al Si ₃ O ₈	010-84-1455	Microclina	11,7%
	K Al ₂ (Al Si ₃ O ₁₀) (OH) ₂	010-79-2363	Moscovita-2M1	4,9%
	(K _{0.8} Ca _{0.03} Na _{0.01}) (Al _{1.86} Mg _{0.14}) ((Si _{3.27} Al _{0.73}) O ₁₀ (OH) ₂)	010-78-5136	Illita-1M	6,1%
	Fe ₂ O ₃	010-73-2234	α-Hematita	1,1%
	(Na _{0.98} Ca _{0.02}) (Al _{1.02} Si _{2.98} O ₈)	010-70-3752	Albita	4,3%
	Na (Al Si ₃ O ₈)	010-71-6218	Albita baja HP	N.C

Nota:

- **N.C = No Cuantificable** (La(s) fase(s) es (son) identificada(s) pero debido a su baja proporción no es posible realizar su respectiva cuantificación).

Fuente: Datos obtenidos experimentalmente en este proyecto

Análisis comparativo por difracción de rayos-X de las fases identificadas en la chamota



Fuente: Laboratorio DRX -Edificio investigación Guatiguara

Resultados obtenidos por DRX en la muestra de caolín

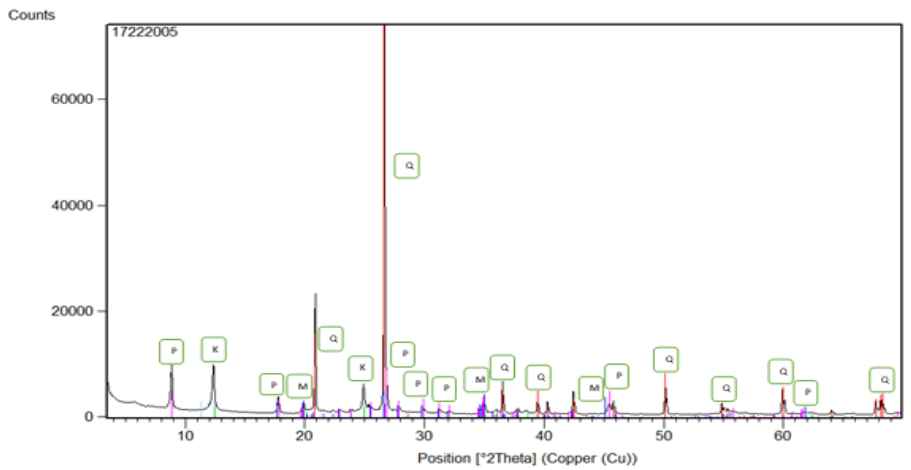
	FASE	PDF No.	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalino	Si O ₂	010-87-2096	Cuarzo	52,6%
	(K _{0.86} Na _{0.1}) (Al _{1.9} Fe _{0.07} Mg _{0.06} Ti _{0.01}) (Si _{3.02} Al _{0.98}) O ₁₀ (OH) ₂	010-82-3725	Moscovita 2MI	26,4%
	Ti O ₂	010-75-2546	Anatasa	0,8%
	Al ₂ (Si ₂ O ₅) (OH) ₄	010-80-0885	Caolinita-1A	19,7%
	K Al Si ₃ O ₈	010-76-0918	Microclina	0,2%
	Ca (C O ₃)	010-80-2804	Calcita	N.C
	Ca _{0.5} (Al ₂ Si ₄ O ₁₁) (OH)	010-76-8291	Montmorillonita	0,3%

Nota:

- **N.C = No Cuantificable** (La(s) fase(s) es (son) identificada(s) pero debido a su baja proporción no es posible realizar su respectiva cuantificación).

Fuente: Datos obtenidos experimentalmente en este proyecto

Análisis comparativo por difracción de rayos-X de las fases identificadas en el caolín

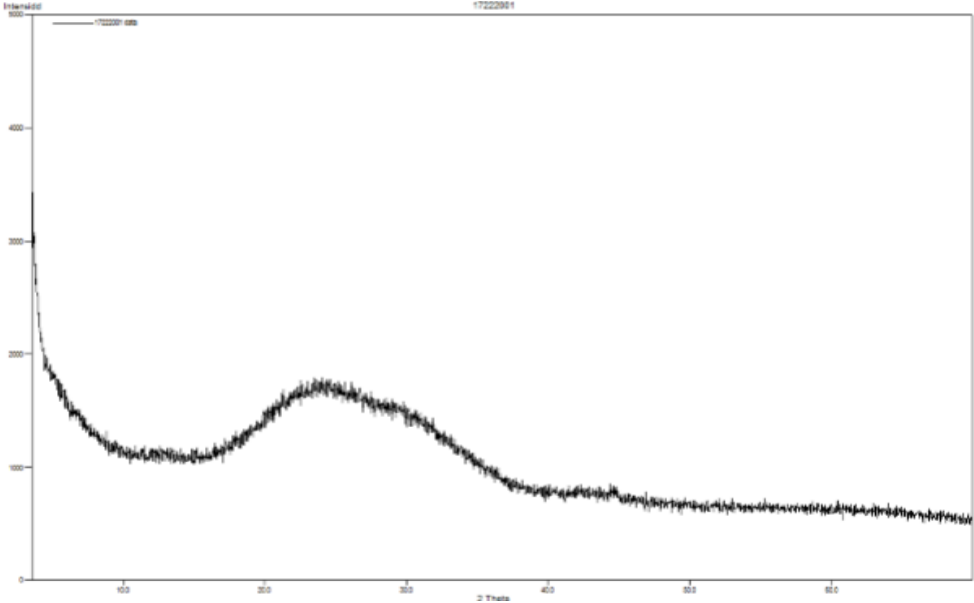


No.	Visible	Ref. Code	Compound N.	Chemical Formula
1	<input checked="" type="checkbox"/>	01-079-1916	Quartz	Si O ₂
	<input checked="" type="checkbox"/>	00-007-0032	Muscovite 2M	K Al ₂ Si ₃ Al O ₁₀ (OH) ₂
	<input checked="" type="checkbox"/>	00-029-1488	Kaolinite-1YT	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
	<input checked="" type="checkbox"/>	00-040-0020	Potassium Ma.	K (Mg, Al) ₂ O ₄ (Si ₃ Si ₃)

- > Cuarzo (Q)
- > Moscovita (M)
- > Caolinita (K)
- > Potassium Magnesium Gallium Fluoride Silicate (P)

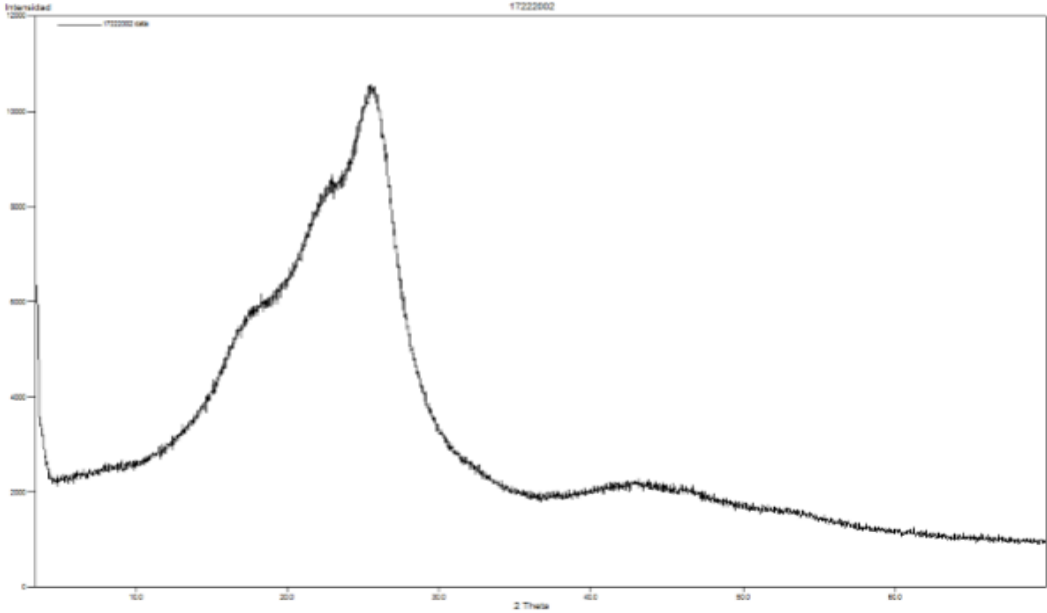
Fuente: Laboratorio DRX -Edificio investigación Guatiguara

Análisis comparativo por difracción de rayos-X de las fases identificadas en el vidrio pulverizado



Fuente: Laboratorio DRX -Edificio investigación Guatiguara

Análisis comparativo por difracción de rayos-X de las fases identificadas en el tereftalato de polietileno (PET)



Fuente: Laboratorio DRX -Edificio investigación Guatiguara

ANEXO C. MATERIA PRIMA

Residuos de Tereftalato de polietileno (PET)



Residuos de vidrio



Residuos de Chamota



ANEXO D. FICHA TÉCNICA MTS 370

Características MTS 370 Axial Torsional Material Testing System



Fuente: Laboratorio de Ingeniería Mecánica-UIS.

ANEXO E. PRUEBA DE ABSORCIÓN

Resultados ensayo de absorción

RESULTADOS ENSAYO DE ABSORCIÓN TIEMPO 24[h]											
COMBINACIÓN	Peso Inicial[g]	Peso Final[g]	PromedioPo[g]	PromedioPf[g]	%Absorción	COMBINACIÓN	Peso Inicial[g]	Peso Final[g]	PromedioPo[g]	PromedioPf[g]	%Absorción
A1M	88,92	107,47	90,14	108,64	20,52	A1m	89,12	107,61	92,22	110,65	19,98
	88,6	106,7					95,33	113,69			
	92,89	111,76					94,93	NA			
B1M	93,07	112,7	90,9	109,88	20,88	B1m	88,41	105,35	89,27	106,26	19,03
	92,14	111,11					86,76	103,63			
	87,49	105,82					92,65	109,81			
A2M	88,09	106,67	99,77	111,14	21,11	A2m	92,18	111,8	92,07	111,64	21,25
	89,98	109,37					91,96	111,49			
	97,23	117,37					92,07	111,64			
B2M	84,51	99,53	85,05	100,29	17,91	B2m	90,84	106,93	89,31	104,02	16,47
	85,6	101,06					91,2	106,88			
							85,87	98,15			

Nota: A1m = $\frac{1}{4} \text{Ca(OH)}_2$; $\frac{3}{4}$ Chamota; $\frac{1}{4}$ RSU; $\frac{1}{2}$ Caolin
 A2m = $\frac{1}{2} \text{Ca(OH)}_2$; $\frac{3}{4}$ Chamota; $\frac{1}{4}$ RSU; $\frac{3}{4}$ Caolin

B1m = $\frac{1}{4} \text{Ca(OH)}_2$; $\frac{3}{4}$ Chamota; $\frac{1}{2}$ RSU; $\frac{3}{4}$ Caolin
 B2m = $\frac{1}{4} \text{Ca(OH)}_2$; $\frac{3}{4}$ Chamota; 1 RSU; $\frac{3}{4}$ Caolin

Nota: A1M = $\frac{1}{4} \text{Ca(OH)}_2$; $\frac{3}{4}$ Chamota; $\frac{1}{4}$ RSU; $\frac{1}{2}$ Caolin
 A2M = $\frac{1}{2} \text{Ca(OH)}_2$; $\frac{3}{4}$ Chamota; $\frac{1}{4}$ RSU; $\frac{3}{4}$ Caolin

B1M = $\frac{1}{4} \text{Ca(OH)}_2$; $\frac{3}{4}$ Chamota; $\frac{1}{2}$ RSU; $\frac{3}{4}$ Caolin
 B2M = $\frac{1}{4} \text{Ca(OH)}_2$; $\frac{3}{4}$ Chamota; 1 RSU; $\frac{3}{4}$ Caolin

ANEXO F. PRUEBA DE CHOQUE TÉRMICO

Resultados ensayo de choque térmico

CHOQUE TÉRMICO [200°C]	
MEZCLAS	CHOQUES TÉRMICOS
A1m	2
A1M	6
B1m	1
B1M	4
A2m	1
A2M	2
B2m	3
B2M	2

Nota: $A1m = \frac{1}{4} Ca(OH)_2; \frac{3}{4} Chamota; \frac{1}{4} RSU; \frac{1}{2} Caolin$ $B1m = \frac{1}{4} Ca(OH)_2; \frac{3}{4} Chamota; \frac{1}{2} RSU; \frac{3}{4} Caolin$
 $A2m = \frac{1}{2} Ca(OH)_2; \frac{3}{4} Chamota; \frac{1}{4} RSU; \frac{3}{4} Caolin$ $B2m = \frac{1}{4} Ca(OH)_2; \frac{3}{4} Chamota; 1 RSU; \frac{3}{4} Caolin$

Nota: $A1M = \frac{1}{4} Ca(OH)_2; \frac{3}{4} Chamota; \frac{1}{4} RSU; \frac{1}{2} Caolin$ $B1M = \frac{1}{4} Ca(OH)_2; \frac{3}{4} Chamota; \frac{1}{2} RSU; \frac{3}{4} Caolin$
 $A2M = \frac{1}{2} Ca(OH)_2; \frac{3}{4} Chamota; \frac{1}{4} RSU; \frac{3}{4} Caolin$ $B2M = \frac{1}{4} Ca(OH)_2; \frac{3}{4} Chamota; 1 RSU; \frac{3}{4} Caolin$