

**DESEMPEÑO Y DURABILIDAD DE LADRILLOS ALIGERADOS A PARTIR DE
COLAS DE MINERÍA AURÍFERA Y RESIDUOS AGROINDUSTRIALES
(CASCARA DE YUCA Y ARROZ)**

MARIO ALBERTO SAUCEDO COLEY

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA
2017**

**DESEMPEÑO Y DURABILIDAD DE LADRILLOS ALIGERADOS A PARTIR DE
COLAS DE MINERÍA AURÍFERA Y RESIDUOS AGROINDUSTRIALES
(CASCARA DE YUCA Y ARROZ).**

MARIO ALBERTO SAUCEDO COLEY

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
GEÓLOGO**

Director:

CARLOS ALBERTO RÍOS

Geólogo Ph.D. en Ciencias Aplicadas

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2017

DEDICATORIA

A ISABELA, la luz de mis ojos, el ángel que Dios me regaló, para ser el motor que impulsa mi vida, mi motivación y la principal razón para esforzarme y ser un buen ejemplo a seguir. A mis padres se cuan grandes han sido sus esfuerzos para cuidarme, formarme como persona y conseguir este logro. A mi ABUELO, mi segundo padre sé que donde te encuentras aún cuidas de mí como cuando era niño, en compañía de mi hermano BETO, algún día Dios nos volverá a reunir. A todos los miembros de mi familia que, de uno u otro modo, me han ayudado a salir adelante y por todas las enseñanzas y experiencias que han compartido conmigo. A Gloria por ser un gran apoyo y una mano amiga en todo momento. A Guillermo y Camila por la colaboración y por motivarme a culminar este proyecto. A mis amigos, compañeros por los momentos vividos y por todo el tiempo de amistad.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por llenar mi vida de bendiciones y por ser mi guía.

A mi director el profesor Ph. D Carlos Ríos por la confianza brindada para la realización de este proyecto y por sus asesorías.

Al Laboratorio de Microscopía del Parque Tecnológico Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander, por su colaboración y disposición en el préstamo de equipos durante este proyecto.

A mis profesores por el conocimiento transmitido y contribuir en mi formación profesional.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	16
1. OBJETIVOS	17
1.1 Objetivo general.	17
1.2 Objetivos específicos	17
2. ANTECEDENTES	18
3. GENERALIDADES	25
3.1 ubicación	25
3.1.1 Ubicación geográfica del municipio de Girón..	25
3.1.2 Ubicación de la ladrillera Bautista y Cáceres Ltda.	26
3.2 Unidades geológicas y litologías en la zona.	27
3.2.1 Formación Girón.	27
3.2.2 Formación Meseta de Bucaramanga.	28
3.2.3 Miembro Órganos (Qbo)..	29
3.2.4 Nivel Inferior del Miembro Órganos.	30
4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	31
4.1 OBTENCIÓN DE LA MATERIA PRIMA	31
4.1.1 Arcilla.	31
4.1.2 Cascara de Yuca.	31
4.1.3 Cascara de Arroz.	31
4.1.4 Residuo de Minería Aurífera.	32
4.1.5 Aceite Mineral.	32
4.2 PRETRATAMIENTO DE LA MATERIA PRIMA	32

4.2.1 Extendido y Secado	32
4.2.2 Triturado.....	33
4.2.3 Tamizaje.....	34
4.3 Caracterización de la materia prima	35
4.3.1 Difracción De Rayos X.	35
4.3.2 Microscopía Electrónica De Barrido (SEM)..	35
4.4 Preparación De Las Probetas.....	35
4.4.1 Moldeo y Compactación.....	37
4.4.2 Acopio y Curado..	38
4.4.3 Cocción de las Unidades.	39
4.5 PRUEBAS REALIZADAS.....	41
4.5.1 Ensayo de Compresión.	41
4.5.2 Ensayos de Flexión.....	41
4.5.3 Inmersión en Soluciones.....	44
5. RESULTADOS	45
5.1 DIFRACCIÓN DE RAYOS X.....	45
5.1.1 Arcilla.....	45
5.1.2 Residuo de Minería.	47
5.1.3 Cascarilla de Arroz.....	47
5.1.4 Cascara de Yuca.....	48
5.2 ESPECTROMETRIA ELECTRONICA DE BARRIDO (SEM).....	49
5.2.1 Arcilla.....	49
5.2.2 Residuo De Minería.	53
5.2.3 Cascarilla De Arroz.	54

5.2.4 Cascara de yuca.....	57
5.3 COCCIÓN DE LOS LADRILLOS.	59
5.4 ENSAYO DE COMPRESIÓN.	63
5.5 ENSAYO DE FLEXIÓN.....	67
5.6 INMERSIÓN EN SOLUCIONES.	71
6. CONCLUSIONES	75
7. RECOMENDACIONES	77
BIBLIOGRAFIA.....	78
ANEXOS	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación geográfica de Girón.	25
Figura 2. Ubicación de la ladrillera Bautista y Cáceres.....	26
Figura 3. Distancia en línea recta de la ladrillera al parque principal de Girón.....	26
Figura 4. Extendido y secado	33
Figura 5. Equipo de Tamizaje.	34
Figura 6. Modelo a escala 1:3 para elaboración de muestras	36
Figura 7. Materia prima para elaboración de probetas	37
Figura 8. Muestras en acopio.....	38
Figura 9. Fase de pesado y cocción de probetas	40
Figura 10. Muestras sometidas a compresión y equipo usado.. ..	42
Figura 11. Muestras bajo ensayo de flexión.. ..	43
Figura 12. Muestras sumergidas en soluciones a) probetas sumergidas en ácido sulfúrico, b) probetas sumergidas en solución de NaCl.....	44
Figura 13. Muestras después de tamizaje	45
Figura 14. Difractograma de Arcilla	46
Figura 15. Difractograma de residuo de minería.....	47
Figura 16. Difractograma cascarilla de arroz.....	48
Figura 17. Difractograma cascara de yuca.....	49
Figura 18. Micrografías arcilla	50
Figura 19. Micrografías residuo de cascarilla de arroz	52
Figura 20. Micrografías residuo de minería.....	54
Figura 21. Micrografías residuo de cascarilla de arroz a	56
Figura 22. Micrografías residuo de cáscara de yuca,.....	58
Figura 23. Porcentaje de pérdida de peso después del proceso de cocción.....	62
Figura 24. Muestras antes y después del proceso de cocción.....	62
Figura 25. Valores promedio de la resistencia para cada porcentaje de residuo...	64
Figura 26. Variación de la compresión con respecto al porcentaje de residuo.....	64

Figura 27. Fragmentos de probetas después del ensayo de compresión.....	66
Ffigura 28. Valores promedio del módulo para cada porcentaje de residuo.....	68
Figura 29. Variación del módulo de rotura con respecto al porcentaje de residuo.	68
Figura 30. muestras después de ensayo de flexión	71
Figura 31. Imágenes de los ladrillos ser retirados de las soluciones,	73
Figura 32. muestras después de ser retiradas de las soluciones.	73
Figura 33. Ejemplo de categorías de eflorescencia.....	74

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Diseño de las mezclas.	36
Tabla 2. Reducción de peso de las muestras después del proceso de horneado .	59
Tabla 3. Promedios para cálculo de resistencia a la compresión.	63
Tabla 4. Resistencia de cálculo de las fábricas de ladrillos macizos	65
Tabla 5. Promedios para cálculo del módulo de rotura.	67
Tabla 6. Resistencia característica a la flexión de fábricas usuales.	70
Tabla 7. Mediciones de las muestras antes del proceso de inmersión en solución ácida	71
Tabla 8. Mediciones de las muestras después del proceso de inmersión en solución ácida.	72
Tabla 9. Mediciones de las muestras antes del proceso de inmersión en solución salina.	72
Tabla 10: Mediciones de las muestras después del proceso de inmersión en solución ácida.	72

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Dimensiones y peso de las muestras antes del proceso de quema.	83
Anexo B. Dimensiones y peso de las muestras después del proceso horneado ...	84
Anexo C. Resultados y cálculos de ensayo de compresión.....	85
Anexo D. Resultados y cálculos ensayo de flexión	86

RESUMEN

TITULO: DESEMPEÑO Y DURABILIDAD DE LADRILLOS ALIGERADOS A PARTIR DE COLAS DE MINERÍA AURÍFERA Y RESIDUOS AGROINDUSTRIALES (CASCARA DE YUCA Y ARROZ)*.

AUTOR: Saucedo Coley Mario Alberto**

PALABRAS CLAVE: Colas de minería; arcillas; residuos agroindustriales; ladrillos; ensayos de compresión.

El presente trabajo de investigación pretende hacer un aporte a la industria ladrillera, de la construcción y el desarrollo sustentable, evaluando las propiedades físicas, químicas y mecánicas de ladrillos modificando su composición. Para este fin se adicionaron a las mezclas de arcilla, porcentajes definidos de colas de minería, cascara de yuca y cascara de arroz, luego las muestras fueron sometidas a ensayos de esfuerzos y ataques con ácidos, para evaluar el comportamiento mecánico de los mismos y su desempeño en condiciones extremas.

La materia prima (arcilla) suministrada por la ladrillera Bautista & Cáceres Ltda, fue analizada por microscopía electrónica de barrido (SEM), para conocer los aspectos estructurales e identificar la composición mineralógica, también se hicieron estudios de rayos X (RX), para definir y conocer ampliamente las propiedades y características de la arcilla y de cada uno de los residuos utilizados.

Se elaboró un ladrillo patrón es decir sin modificar sus propiedades, simplemente se mezcló arcilla y agua, posteriormente se elaboraron las muestras adicionando los residuos seleccionados para este trabajo, en incrementos de 5% en cada muestra hasta llegar a 15% de cada residuo, también se elaboraron muestras combinando todos los residuos, luego se realizaron los ensayos de durabilidad y esfuerzos, sometiendo cada una de las muestras a esfuerzos de compresión y flexión (según NTC 4017).

* Trabajo de grado

** Facultad de Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Carlos Alberto Ríos, PhD. en Ciencias Aplicadas.

ABSTRACT

TITLE: PERFORMANCE AND DURABILITY OF LIGHTWEIGHT BRICKS, FROM MINING TAILINGS AND AGRO INDUSTRY WASTE (CASSAVA PEEL AND RICE HUSKS)*.

AUTHOR: Saucedo Coley Mario Alberto **

KEY WORDS: Mining Waste, Clays, Agro-Industrial Waste, Bricks, Compression Tests.

This research work, aims to contribute to the brick industry, construction and sustainable development, by assessing the physical, chemical and mechanical properties of bricks changing its composition. For this purpose, they were added to the mixtures of clay, percentages defined of mining tailings, cassava peel and rice husks, then the samples were subjected to testing efforts and acid attacks, to assess the mechanical behavior of the same and performance under extreme conditions.

The raw material (clay) provided by the brick Bautista & Caceres Ltda, was analyzed by scanning electron microscopy (SEM), to meet the structural aspects and identify the mineralogical composition, X-ray studies (RX) is also made to define and widely known properties and characteristics of the clay and each of the waste used.

A pattern brick was developed that is without modifying their properties, just clay and water are mixed, then the samples were prepared by adding the selected waste for this job, in increments of 5% in each sample up to 15% of each residue, Samples were also prepared by combining all waste, then durability testing and efforts were made, by subjecting each sample to compression and bending (as NTC 4017).

* Bachelor Thesis

** Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Geology. Director: Carlos Alberto Ríos.

INTRODUCCIÓN

En muchos países del mundo, es común el uso de ladrillos cocidos para la construcción de edificaciones y viviendas en general, por su bajo costo y su sencillo proceso de elaboración, aparte por sus propiedades térmicas con respecto a la temperatura ambiente, (son frescos en momentos de calor y cálidos en tiempos fríos), pueden ser reutilizados y son resistentes al sol y la lluvia.

Existen en la actualidad muchos residuos provenientes de la actividad industrial, minera, agraria, petrolera, etc., que pueden ser reutilizados, tanto porque son producidos a gran escala como porque no pueden volver al ambiente en forma sustentable, el área de la construcción es una buena opción para darle uso a muchos de esos residuos, debido al auge que tiene este sector en la actualidad.

Por el tema de conservación del medio ambiente, se ha tratado de reutilizar los desechos de la actividad industrial, agraria y antrópica en general, mayoritariamente con los materiales reciclables y los no biodegradables o que tienen un largo tiempo para biodegradarse, en este aspecto los materiales de construcción no escapan a dicho intento, entre otros los ladrillos, se han desarrollado investigaciones para incorporar icopor, plástico, caucho, etc., en los ladrillos cocidos, para mejorar sus propiedades y para darle uso a muchos de esos residuos; que de lo contrario terminarían causando efectos negativos en el medio ambiente.

En el proyecto *Desempeño y durabilidad de ladrillos aligerados a partir del uso de colas de minería aurífera y residuos agroindustriales (cascara de yuca y arroz)*, se intentan evaluar e implementar el uso de nuevos residuos en la elaboración de ladrillos cocidos, adicionando dichos residuos para contribuir tanto a la industria de la construcción como al medio ambiente.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL.

Llevar a cabo la preparación de ladrillos aligerados a partir del uso de colas de minería y residuos agroindustriales, con el fin de evaluar su desempeño y durabilidad en ambientes extremos, y contribuir con el desarrollo sostenible.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar los diferentes materiales utilizados para la preparación de ladrillos (arcilla, residuo de minería del oro, cascara de arroz y cascara de yuca), por medio de DRX Y SEM.
- Diseñar las mezclas de preparación de ladrillos y evaluar cual presenta mejores propiedades mecánicas con cada residuo.
- Determinar el comportamiento de los ladrillos en ambientes corrosivos.
- Realizar ensayos que permitan evaluar el comportamiento mecánico de ladrillos aligerados (compresión, flexión).
- Lograr un aligeramiento de los ladrillos induciendo una porosidad mediante el proceso de cocción.

2. ANTECEDENTES

En la industria ladrillera, se presenta un porcentaje no despreciable de pérdidas, como consecuencia de la contracción de las piezas durante la fase de secado, puesto que se producen fisuras, roturas o ladeamientos, por lo general se busca la solución agregando arcillas magras o desengrasantes, pero no siempre resulta tan fácil realizar esta mezcla, porque es cierto que se encuentran en abundancia, pero es difícil hallarlas sin cal ni piedras; además en algunas ocasiones no resulta conveniente agregar desengrasante, porque la arcilla con la que se trabaja no es lo suficientemente grasa para soportar la adición, o porque se requiere una alta plasticidad para elaborar las piezas y al agregar algún desengrasante, se reduciría considerablemente la plasticidad de la pasta. “En estos casos, e incluso en todos los casos, no hay inconveniente en mezclar productos vegetales secos, como paja, cáscaras de arroz, aserrín, etc.”. La paja resulta una alternativa mucho mejor que la tierra desengrasante, porque permite conservar la plasticidad de la arcilla, no modifica sus características principales y evita que se produzcan fisuras o roturas en las piezas al momento de contraerse, eso se da como consecuencia de que al momento de ser humedecidos, los materiales vegetales aumentan de volumen y cuando se van secando dejan espacios en el interior de la pieza, los cuales permiten que la arcilla se contraiga, sin que se generen esfuerzos bruscos que dañen las piezas.¹

La elaboración del ladrillo, por lo general ha sido a base de pasta de arcilla, siendo la arena la estructura de la masa, secándose al aire libre o al sol para luego colocarla al horno y lograr su cocción, una de las dificultades se ha evidenciado con el secadero y su capacidad de producción, en razón a las variaciones que se presentan con el clima, siendo necesario utilizar hornos y máquinas para su

¹ ROBUSTE, Eloy. Técnica y práctica de la industria ladrillera. 5º edición. Barcelona: Industrias Gersa, 1969. 209p.

cocción. El ladrillo es una masa cuyo elemento básico es la arcilla, la cual cuando esta húmeda permite un manejo fácil y un moldeo adecuado, para la etapa de cocción se realiza en los hornos con temperaturas de 900°C a 1200°C, hasta estar completamente cocidos, alcanzando una gran resistencia el material, inmunes al intemperismo y cumplen ciertas condiciones de resistencia a la compresión y de permeabilidad del agua. (Reverté²).

La utilización de ceniza de cáscara de arroz en ladrillos elaborados con mezclas de arcilla, evidencian contracción lineal, densidad, resistencia a la compresión y la absorción de agua, siendo ladrillos ligeros, sin tener ningún deterioro en la calidad; permitiendo mayor resistencia a la compresión de los ladrillos, la duración de cocción óptima de 4 horas a 1000°C. Concluyéndose que la mezcla de arcilla con ceniza de cascarilla de arroz puede ser utilizada en paredes de soporte de cargas por que presenta las mejores condiciones en los cambios presentados en las propiedades de los ladrillos.³

Los ladrillos hechos con plástico reciclado y cascara de cacahuate, tienen su origen en el Centro Experimental de la Vivienda Económica de Argentina. Los envoltorios, botellas de plástico, o las cascara de cacahuate, son combinados con cemento, sin necesitar el uso de maquinarias de gran valor o presupuesto, ni terrenos de donde extraer la materia prima, ni grandes instalaciones para procesarla; son ladrillos más ligeros y permiten un mejor manejo de su material, facilitando el autoconstrucción, lo cual se convierte en una alternativa para las personas que no pueden acceder a una vivienda convencional. (Bar⁴).

² REVERTÉ, Pedro. La industria ladrillera: moldeo manual y mecánico de los ladrillos, secaderos y hornos modernos. 3ª edición. Buenos Aires: Gustavo Gili, 1979. 339p.

³ RAHMAN, Abdur. Properties of clay-sand-rice huskashmixedbricks. Department of Civil Engineering, University of Ife, Ile-Ife, Nigeria. Vol. 23, Number 1, 1987, 10p

⁴ BAR, Nora. Un desarrollo tecnológico del Conicet, diario La Nación. Recuperado de <http://www.lanacion.com.ar/849741-ya-se-pueden-construir-casas-con-ladrillos-de-plastico-y-cemento>.

Los residuos de plástico, según el proyecto SANDPLAST, financiado por el programa EUREKA, buscar desarrollar un método para producir materiales de construcción haciendo uso de residuos poliméricos y rellenos inertes, por ejemplo con botellas de plástico, cartones o envases de yogurt, logrando convertir los poliméricos termoplásticos en una sustancia aglutinante, que podría mezclarse con arena y formar un hormigón polimérico sin cemento, “los ladrillos de hormigón polimérico tienen el mismo aspecto que los ladrillos comunes de cemento”, agregó el Dr. Juris Balodis, entre las ventajas se encuentra la absorción menor de agua, razón por la cual se tornaría resistente a altas temperaturas, actualmente se dice que se elaboran tres ladrillos por minuto, siendo estos ladrillos más económicos que los ladrillos comunes.(Balodis⁵, 2008).

La utilización de residuos como, el aserrín proveniente de la materia prima (eucalipto), presenta buena porosidad, buena resistencia mecánica, térmica y acústica, lo óptimo es preparar una mezcla de arcilla, con un equilibrado contenido de aserrín que asegure la obtención del producto final. En este caso, el residuo agregado actúa como formador de poros, obteniéndose un ladrillo que responde a la tipología de ladrillo alivianado. (Escudero⁶)

La elaboración de ladrillos con yuca, está conforme al desarrollo sostenible del medio ambiente, ya que su fabricación no libera partículas de CO₂, la manipueira es un líquido que sobra del prensado de la yuca, existiendo una ventaja pues no requiere la quema del ladrillo, mezclando solo el barro con la manipueira, colocando tal mezcla en un molde dejándola al aire libre, ya que por su evaporización endurece el material de la misma forma que lo haría el fuego, reduciendo entonces el uso del agua, y la disminución de la energía eléctrica,

⁵ BALODIS, Juris. In with recycled plastic bricks, out with cement. <http://cordis.europa.eu/new/29365>.

⁶ ESCUDERO, Carlos; FIOI, Nuria; POCH, Jordi; VILLAESCUSA, Isabel. Modeling of Kinetics of Cr(VI) Sorption On to Grape Stalk Waste in a Stirred Batch Reactor. J. Hazard Mater. Vol. 170 (1), 2009, 286-291.

siendo una técnica de construcción natural, pues el ladrillo crudo no necesita cemento, este proceso no es nuevo, ya había sido utilizado, colocando como ejemplo la construcción de la muralla China, la construcción con este material que es resistente y soporta altas temperaturas. Moraes⁷.

En Colombia el principal uso que se le da a la cascara de yuca, está relacionado con la obtención de alimento para animales de granja tales como, cerdos, bovinos. Se han desarrollado proyectos con muy buenos resultados, utilizando la cascara de yuca; para remover metales pesados principalmente Pb, Cd y Zn, de soluciones acuosas, tal como lo reportan estudios previos (Albis⁸; Tejada, ⁹ Rojas¹⁰) combinan además la cascara de yuca con acetato de polivinilo (Colbón) para elaborar tableros de partículas, los cuales son materiales novedosos y amigables con el medio ambiente que a futuro pueden sustituir a los tableros de virutas de madera virgen y adhesivos generadores de emisiones.

Un Ladrillo ecológico permite el desarrollo adecuado de la actividad de construcción en armonía con la protección del medio ambiente, empleando residuos derivados por ejemplo del cultivo del arroz, que lógicamente permite un menor costo y uso energético, el ladrillo ecológico elaborado con un suelo arcilloso, marga gris, 5% de cal hidráulica natural, 8% de cenizas de cáscaras de arroz residuo de la industria de la biomasa, y un 5% de cascarillas de arroz subproducto de la cosecha del mismo. Es un producto con óptimas características mecánicas, mostrando mayor resistencia a compresión y a inmersión en agua, así

⁷ MORAES; Acácio. Portal El Paralex. Noticias de Arquitectura. <http://www.elparalex.com/ladrillos-ecologicos-de-yuca>

⁸ ALBIS, Alberto; MARTÍNEZ, Jader; SEVERICHE, María; GARCÍA, José. Remoción de plomo de soluciones acuosas usando cáscara de yuca modificada con ácido cítrico. 2016.

⁹ TEJADA, Candelaria; MONTIEL, Zaida; ACEVEDO, Diofanor. Aprovechamiento de Cáscaras de Yuca y Ñame para el Tratamiento de Aguas Residuales Contaminadas con Pb (II), Información tecnológica, Vol. 27, 2017, 09-20p.

¹⁰ ROJAS, Lyda.; VIEJO, Fernando. Obtención y caracterización de materiales compactados a partir de cáscara de yuca para la fabricación de tableros de partículas. Revista Colombiana de Materiales, Vol.5, 2013,158-163p.

como buen manejo frente a temperaturas extremas, sin notar grandes cambios visualmente frente a otros ladrillos. (Laguna¹¹).

Los efectos de la ceniza de cáscara de arroz, además, en las propiedades físicas y mecánicas en la construcción de ladrillos ligeros de arcilla fueron investigados. Diferentes proporciones de CCA de 10-50% en masa fueron mezclados con el crudo de ladrillos de arcilla. Todas las muestras de ensayo fueron producidas por método de prensa hidráulica y expuesto a 1050°C. Esta investigación ha demostrado una forma factible de utilizar CCA para producir un ladrillo de alta calidad. Las características orgánicas dan una contribución adicional a la entrada de calor del horno. De acuerdo con resultados de pruebas, una mezcla de hasta 50% de aditivos CCA en peso se puede utilizar en la construcción de la producción de ladrillo cocido, en particular para ladrillo ligero. La temperatura de cocción más económica se determinó como 1050°C. CCA puede ser utilizada como una especie orgánica de aditivo formador de poros en el cuerpo de arcilla sin ningún efecto perjudicial sobre los otros parámetros de fabricación de ladrillos. El uso de material de CCA en la mezcla de arcilla mejorado las propiedades físicas y mecánicas. La utilización de residuos en la producción de ladrillos CCA proporciona una contribución económica y también sirve como materia de eficiencia energética para la construcción. Se indica que CCA podría ser una materia prima alternativa para la producción de ladrillos de arcilla y amigable al medio ambiente. (Toonayopas¹²).

Los residuos orgánicos, es decir aserrín y café molido, mostraron un potencial de aditivos en ladrillos de arcilla crudos en este estudio. La adición de residuos

¹¹ LAGUNA, María. Ladrillo ecológico como material sostenible para la construcción. Proyecto de grado. Escuela Técnica superior de Ingenieros Agrónomos. Departamento de proyectos e ingeniería rural. 2011, 1-117 p.

¹² TONNAYOPAS, Danupon; PERAPONG, Tekasakul.; SARAWUT, Jaritgnam. Effects of Rice Husk Ash on Characteristics of Lightweight Clay Brick. Technology and Innovation for Sustainable Development Conference (TISD2008). Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Thailand. 2008, 39-36p.

orgánicos está diseñada principalmente para producir ladrillos de arcilla cocidos ligeros y más porosos. La cocción de ladrillos de arcilla de los especímenes entre 900 y 1100°C y el aumento del contenido de la adición de residuos orgánicos llevan a aumentos en la contracción y absorción de agua. Además, el aumento del contenido de residuos orgánicos en ladrillos de arcilla aumentó la porosidad aparente. Se encontró que la porosidad aparente se produjo cuando los residuos orgánicos se quemaron durante el proceso de cocción. Los resultados revelaron que los residuos orgánicos podrían considerarse como una posible adición a las materias primas utilizadas en la fabricación de ladrillos de arcilla cocidos ligeros. (Phonphuak, ¹³).

La explotación excesiva de los recursos naturales y la gran generación de desechos provenientes de la actividad humana, han ocasionado un deterioro del medio ambiente, por lo tanto a nivel mundial ha crecido el interés por mitigar el impacto ambiental, en consecuencia muchos investigadores han desarrollado proyectos, para reutilizar los residuos contribuyendo así, a la disminución de la explotación de los recursos naturales y a la conservación del medio ambiente; muchas de esas investigaciones han sido direccionadas a la industria de la construcción, en cuanto a ladrillos se refiere se han realizado estudios para incorporar residuos a la pasta para elaborarlos, tales como colillas de cigarrillo (Aeslina¹⁴), escoria de acero (Shih¹⁵; El-Mahllawy¹⁶), ceniza (Sarkar ¹⁷; Cultrone¹⁸),

¹³ PHONPHUAK, Nonthaphong. Effects of organic residues on physical and mechanical properties of fired clay brick. Science and Engineering Symposium International Science, Social Science, Engineering and Energy Conference, 2012, 479-485p.

¹⁴ ABDUL, Aeslina; MOHAJERANI, Abbas; RODDICK, Felicity, and BUCKERIDGE, John. Density, strength, thermal conductivity and leachate characteristics of light weight fired clay bricks incorporating cigarette butts. International Journal of Environmental Science and Engineering. 2010, 179-184 p.

¹⁵ SHIH, Pai-Haung, WU, Zong-Zheng; CHIANG, Hung-Lung. Characteristics of bricks made from waste steel slag. Waste Management. Vol.24, 2004, 1043-1047p.

¹⁶ EL-MAHLLAWY, Medhat. Characteristics of acid resisting bricks made from quarry residues and waste steel slag. Construction and Building Materials. Vol. 22, 2008, 1887-1896 p.

¹⁷ Sarkar, R., Singh, N. and Das, S.K., Effect of addition of pond ash and fly ash on properties of ash-clay burnt bricks. Waste Management Research, 25, pp. 566-571, 2007.

¹⁸ CULTRONE, Giuseppe; SEBASTIÁN, Eduardo. Fly ash addition in clayey materials to improve the quality of solid bricks. Construction and Building Materials. Vol. 23, 2009, 1178-1184 p.

casaca de arroz (Chiang¹⁹; Luna ²⁰), vidrio (Dondi²¹); estos estudios sustentan mejoras en algunas propiedades de los ladrillos y ahorro de energa en la producci3n de los mismos.

¹⁹ CHIANG, Kung-Yuh; CHOU, Ping-Huai; HUA, Ching-Rou., CHIEN, Kuang-Li and CHESSEMAN, Chris. Lightweight-bricks manufactured from water treatment sludge and rice husks. *Journal of Hazardous Material*. 2009, 76-82 p.

²⁰ LUNA, Lisset; RIOS, Carlos; QUINTERO, Luz. Recycling of agroindustrial solid wastes as additives in brick manufacturing for development of sustainable construction materials. *DYNA*, Vol. 81, n3mero 188, 2014, 34-41 p.

²¹ DONDI, Micheli., GUARINI, Guia; CHIARA, Zanelli. Recycling PC and TV waste glass in clay bricks and roof tiles. *Waste Management*. Vol. 29, 2009, 1945-1951p.

3. GENERALIDADES

3.1 UBICACIÓN

La arcilla requerida para la elaboración de este proyecto fue suministrada por la ladrillera Bautista y Cáceres Ltda. Ubicada en el municipio de Girón, en malpaso 1 km 6 vía al porvenir.

3.1.1 Ubicación geográfica del municipio de Girón. El municipio de Girón se encuentra ubicado al SW de Bucaramanga y limita con Floridablanca, Betulia, Zapatoca, Los santos, Piedecuesta, Floridablanca, Bucaramanga, Lebrija y Sabana de Torres, como se puede observar en el mapa escala 1: 855.000 de la (Figura 1).

Figura 1: Ubicación geográfica de Girón.



Fuente Tomado de <http://www.zonu.com/fullsize2/2011-08-19-14409/Mapa-fsico-de-Santander.html>

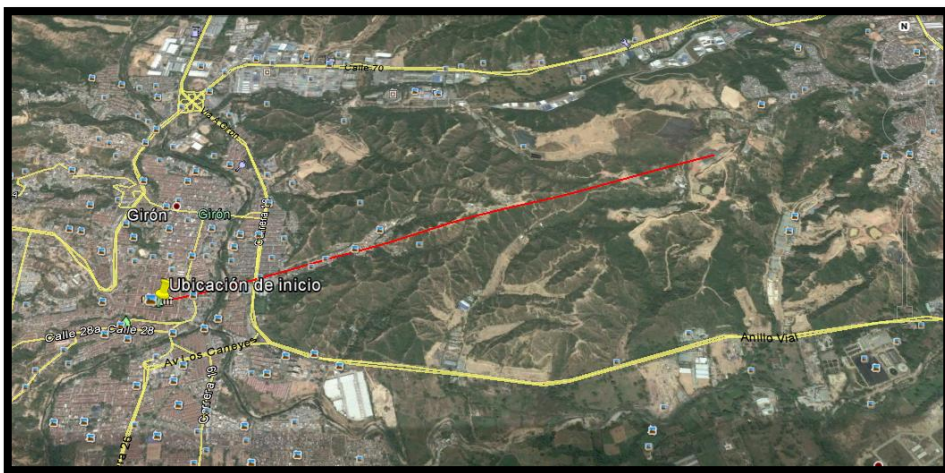
3.1.2 Ubicación de la ladrillera Bautista y Cáceres Ltda. La ladrillera Bautista y Cáceres se encuentra ubicada al Este del parque principal el municipio de Girón en la calle 105 No 5-06, Malpaso 1 km 6 vía al porvenir, cuyas coordenadas son latitud $7^{\circ} 4' 34.62''$ N y longitud $73^{\circ} 8' 16.20''$ O. Ver (Figura 2 y 3). En la figura 3 se observa la distancia entre el parque principal de Girón y la ladrillera Bautista y Cáceres Ltda. (Línea roja).

Figura 2. Ubicación de la ladrillera Bautista y Cáceres.



Fuente: Tomado de Google Earth.

Figura 3. Distancia en línea recta de la ladrillera al parque principal de Girón.



Fuente: Tomado de Google Earth.

3.2 UNIDADES GEOLÓGICAS Y LITOLOGÍAS EN LA ZONA.

“Depósitos residuales de arcillas arenosas con buena plasticidad se explotan en diferentes zonas de Santander; su acumulación es producto de la erosión y el transporte de material arcilloso proveniente principalmente de rocas sedimentarias y metamórficas. En el área metropolitana de Bucaramanga se encuentran numerosos chircales o ladrilleras que aprovechan los niveles arcillosos de la unidad Meseta de Bucaramanga y de la Formación Girón”.²²

3.2.1 Formación Girón. “El nombre “Girón” fue definido por (Hettner²³, Ward²⁴) para designar un conjunto grueso de areniscas, conglomerados y limolitas de color marrón rojizo. La formación Girón aflora sobre el costado oeste del valle del río de Oro y como “ventanas” en las zonas bajas de las quebradas que drenan el escarpe occidental de la meseta de Bucaramanga. En el cauce actual del río de Oro se encuentran afloramientos en ambas márgenes en el sitio de Tumba Viejas hasta puente Nariño y en el sector de La Playa al Túnel cerca a la confluencia con el río Suratá. Litológicamente la formación Girón se caracteriza por presentar capas competentes de conglomerados y de areniscas cuarzo feldespáticas de colores crema verdoso, con predominio del color rojo intercaladas con lodolitas violetas masivas”. (CDMB²⁵)

Se han realizado perforaciones de pozos profundos tal es el caso de “llano grande-1”, un pozo perforado para el acueducto metropolitano de Bucaramanga, en el cual “la formación Girón subyace bajo un grueso depósito del miembro Órganos de 109 metros de espesor, la formación Girón

²² CLAVIJO, Jairo; ROYERO, José María. Mapa Geológico Generalizado de Santander. Memorias Explicativas. (2001).

²³ HETTNER, Alfred. Die Kordillere von Bogotá, Gotha, Paternans Mitteil. Vol. 22, 1892, 131 p.

²⁴ WARD, Dwight. Recursos minerales de parte de los departamentos de Norte de Santander. INGEOMINAS. Boletín Geológico. Volumen XVIII, No. 3, 1970, 1-140 p.

²⁵ CDMB, Documento de Diagnóstico Amenazas de Inundación y Erosión en el Río de Oro. Vol. 1, cap. 6 (2005).

bajo este depósito corresponde a una sucesión de areniscas medias, gruesas y conglomerados, rojizos y amarillentos, cuarzosos y feldespáticos, micáceos en matriz limosa intercalados con niveles arcillosos violáceos”²⁶.

3.2.2 Formación Meseta de Bucaramanga. La formación Bucaramanga está conformada por cuatro miembros; de base a techo, según fue definido por (Hubach²⁷) miembro Órganos (Qbo), miembro fino (Qbf), miembro gravoso (Qbg), miembro limos rojos (Qblr), de los cuales son interesantes y son explotados en la actualidad por la industria ladrillera, el miembro fino y el nivel inferior del miembro Órganos, por tener un contenido significativo de arcilla.

Descrita por De Porta²⁸, corresponde a un depósito sedimentario aluvial de edad Cuaternario, morfogenéticamente definido como un abanico aluvial, asociado a un control tectónico en su desarrollo y depositación. El espesor del depósito aumenta de oriente a occidente en la meseta de Bucaramanga y aunque el valor real de éste se desconoce, siendo actualmente motivo de investigación, algunos cortes geológicos permiten estimar, en los sectores más profundos, valores promedio cercanos a los 250 m”. (INGEOMINAS²⁹).

²⁶ *Ibíd.*

²⁷ HUBACH, Enrique. Mina de Carbón de “Chía” en el Páramo del Almorzadero (Santander). Servicio Geológico Nacional. Informe 809, Bogotá 1951, 3p.

²⁸ DE PORTA, Jaime. Lexique Stratigraphique International. Centre National Recherche Scientifique. Volume V. Amerique Latine, fascicule 4b, París, 1974, 692 p.

²⁹ INGEOMINAS; zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga. Bogotá D.C. (2001).

3.2.3 Miembro Órganos (Qbo). Definido por Hubach³⁰. Aflora en las laderas y escarpes de la parte occidental de la Meseta de Bucaramanga y el Área Metropolitana, en los alrededores del municipio de Girón, anillo vial, en las estribaciones de la parte norte de la mesa de Ruitoque y en los cortes de la carretera que comunica la población de Girón con la ciudad de Bucaramanga (INGEOMINAS³¹).

Con base en las columnas realizadas, correlaciones estratigráficas y cortes topográficos, se estima que su espesor podría superar los 180 m, siendo el nivel más potente de la Formación Bucaramanga (CDMB³²).

“De acuerdo con el documento de diagnóstico de amenaza de la (CDMB³³), de aspecto conglomerático, en alternancia con capas y lentes limo arenosos, con variaciones laterales y verticales en composición y textura. La edad del Miembro Órganos podría abarcar el Pleistoceno medio. Geomorfológicamente este segmento desarrolla una forma típica que da origen a su nombre Órganos por la similitud de los estoraques con los tubos de estos instrumentos, dando la geomorfología típica de las llamadas tierras malas con pendientes de 30-70 grados. El drenaje es denso dendrítico y de cañadas profundas”. (CDMB³⁴).

³⁰ HUBACH Op. cit

³¹ *Ibíd.*

³² CDMB Op.cit

³³ CDMB Op.cit

³⁴ CDMB Op.cit

3.2.4 Nivel Inferior del Miembro Órganos. “El nivel Inferior constituido por niveles arcillosos, arcillo arenosos y limos arcillosos de color amarillento y verdosos, compactos, de consistencia firme con algunas interposiciones de lentes conglomeráticos; estos niveles se reconocen principalmente en la margen izquierda del Río de Oro desde Bahondo, sector de Gallineral y en afloramientos aislados en el cauce del Río de Oro, hasta el sector del Parque Industrial al sur de la Falla de Río de Oro. Niveles litológicamente similares fueron identificados en el Pozo Llano Grande-1 a 61 m de profundidad con un espesor 38 m y constituidos por arcillas arenosas con gravas, gruesas capas de arcillas verdes e intercalaciones de arcillas con arcillas arenosas y arenas arcillosas con lentes conglomeráticos”.³⁵

³⁵ CDMB Op.cit

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Antes de llegar a la obtención de las muestras de ladrillos cocidos para realizar las pruebas correspondientes, fue necesario realizar una serie de pasos y procesos, desde la obtención del material, análisis estructurales y químicos, elaboración de probetas de ladrillos, etc. tal como se describe a continuación:

4.1 OBTENCIÓN DE LA MATERIA PRIMA

Los materiales que fueron utilizados para el desarrollo de este proyecto son:

4.1.1 Arcilla. Suministrada por la ladrillera Bautista & Cáceres Ltda, es la arcilla que en dicha empresa utilizan para la elaboración de las piezas que comercializan; es el producto de la mezcla de varias arcillas ya trituradas y sometidas a intemperismo, lista para ser combinada con el agua para su posterior moldeo y continuar el proceso de elaboración del ladrillo.

4.1.2 Cascara de Yuca. Se obtuvo de un puesto de la plaza de mercado San Francisco, de este material se recolectaron 20 libras aproximadamente.

4.1.3 Cascara de Arroz. Este material se conoce también con el nombre de tamo y fue suministrada por la arrocera LA GRANJA; la cual entrego dos bolsas de aproximadamente 5 libras cada una.

4.1.4 Residuo de Minería Aurífera. Conocido también como cola de minería, es la arena que resulta al final del proceso de obtención de oro, después de ser triturada y amalgamada para extraer el mineral de interés, proveniente de la mina de oro Elsy ubicada en el municipio de Betas (Santander) y fue suministrada por el laboratorio de beneficio mineral de la planta de aceros de la UIS. Se recolectaron aproximadamente 8 libras del residuo de la actividad minera.

4.1.5 Aceite Mineral. Es un subproducto obtenido en el proceso de destilación de petróleo crudo, es una sustancia incolora suministrada por el laboratorio de beneficio mineral de la escuela de ingeniería metalúrgica de la UIS, se obtuvo un frasco de aproximadamente 750 ml.

4.2 PRETRATAMIENTO DE LA MATERIA PRIMA

La materia prima recolectada fue sometida a procesos de: Extendido y secado, triturado y tamizaje. Estos pretratamientos se realizaron con el fin de mejorar, homogenizar y limpiar los materiales para la caracterización y preparación de las probetas.

4.2.1 Extendido y Secado. Las cascaras de yuca y de arroz, fueron dispersados sobre papel (Figura 4) y colocados al sol durante 10 horas, resguardados de la lluvia. Este proceso se hizo durante 5 días con el fin de retirar la humedad presente en dichos residuos.

Figura 4. Extendido y secado



4.2.2 Triturado. Posterior al proceso de secado las cascaras de yuca y arroz, se sometieron a un proceso de molienda, el cual se hizo con un molino convencional utilizado para moler maíz; los residuos tostados fueron pasados por el molino dos veces, hasta lograr obtener un material más fino.

La arcilla fue extendida sobre cartón y golpeada con un martillo geológico que hacía las veces de pisón, para disgregar los grumos que se dan como resultado del intemperismo y la humedad del ambiente. El residuo de minería no fue necesario triturarlo, puesto que este proceso ya se hace por parte de la industria minera.

4.2.3 Tamizaje. Se utilizó una tamizadora ubicada en la planta de aceros de la UIS (Figura 5b). Para este proceso se seleccionaron los tamices número: 20, 30, 60, 80 y 100 (Figura 5a). El tiempo utilizado fue de 3 minutos por cada tamiz.

Para la arcilla se tomaron las partículas tales que $100 < X < 80$, es decir las que quedaban en el tamiz # 100. Para los residuos se tomaron las partículas tales que $60 < X < 30$, esto con el objetivo de que los residuos al tener un tamaño de partícula mayor al de la arcilla, ocupen un espacio mayor en la mezcla, el cual en el momento de hornear se queme el contenido orgánico de los mismos generando una porosidad, cuyo fin es disminuir el peso final del ladrillo.

Figura 5. Equipo de Tamizaje: a) Tamices 20, 30, 60, 80 y 100. B) Tamizadora de la planta de aceros Univeridad Industrial de Santader - UIS.



4.3 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

4.3.1 Difracción De Rayos X. Esta técnica fue aplicada a todos los componentes en el laboratorio de rayos X de la universidad industrial de Santander ubicado en la sede de Guatiguará, se pulverizaron las muestras y se montaron directamente en un porta-muestras de polimetilmetacrilato (PPMM), mediante la técnica de llenado total; El análisis se desarrolló en un difractómetro de polvo, marca BRUKER modelo D8 advance con geometría Da Vinci. Se obtuvieron difractogramas para cada una de las muestras analizadas.

4.3.2 Microscopía Electrónica De Barrido (SEM). Esta técnica se aplicó a todos los componentes en el laboratorio de microscopía de la universidad industrial de Santander ubicado en la sede de Guatiguará, el equipo utilizado fue el Quanta feg 650, para el desarrollo de las pruebas se pulverizaron las muestras para el desarrollo de la prueba, por medio de la cual se pudieron obtener micrografías y EDS correspondientes a cada uno de ellos.

4.4 PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS.

En esta etapa se tomó como referencia, el ladrillo TEMOSA convencional macizo, sin perforaciones cuyas medidas son 33cm X 15cm X 7,5cm; luego se diseñó un molde a escala 1:3 cuyas medidas fueron 11cm X 5cm X 2,5cm, con capacidad para preparar 30 muestras. (Figura 6).

Los porcentajes de cada residuo para adicionar fueron definidos en 5%, 10% y 15%; el porcentaje de agua se determinó empíricamente en el proceso de producción, en este trabajo el porcentaje de agua utilizado para todas las muestras fue de 20%, Según la literatura, “lo corriente en las fábricas de cerámica es trabajar con un 25 o un 30% de agua, que aun así es excesivo, pero en muchas de ellas se ven obligadas a hacerlo debido a la mala preparación de las tierras y a

la poca resistencia de la galletera. Trabajando mejor la pasta, pueden obtener unas piezas magníficas trabajando con una humedad inferior al 20%” (Robuste³⁶). Por lo tanto, la fracción restante para completar 100% corresponde a la arcilla.

Figura 6. Modelo a escala 1:3 para elaboración de muestras.



Con el objetivo de preparar las muestras con los porcentajes de cada residuo definidos previamente, se procedió a pesar cada uno de los elementos que hacen parte de la mezcla (Figura 7), por lo tanto, la distribución de los componentes para cada ladrillo quedó conformada de la siguiente manera:

Tabla 1. Diseño de las mezclas.

Residuo (%)	Residuo (gr)	Arcilla (%)	Arcilla (gr)	Agua (%)	Agua (gr)	Total (gr)
0	0	80	240	20	60	300
5	15	75	225	20	60	300
10	30	70	210	20	60	300
15	45	65	195	20	60	300

³⁶ ROBUSTE, Op. cit

Para las muestras en las cuales se adicionaron los tres residuos, se divide el peso correspondiente a cada porcentaje entre tres y el resultado es la fracción correspondiente de cada residuo que se adicionó en la mezcla. Después de pesar los residuos y la arcilla, estos se depositaron en un recipiente en el cual se revolvieron en seco, para que se integraran; posteriormente se agrega el agua y se amasa hasta que la mezcla tome una consistencia similar a la plastilina

Figura 7. Materia prima para elaboración de probetas



4.4.1 Moldeo y Compactación. Después de obtener la mezcla homogénea de todos los elementos que forman parte del ladrillo, y obtener una consistencia similar a la plastilina, se procedió a introducir la pasta en el molde; el cual fue recubierto, con el aceite mineral haciendo las veces de lubricante y aislante, para evitar que los ladrillos se adhirieran al molde y poder ser retirados con mayor facilidad.

La pasta se fue introduciendo poco a poco en el molde siendo golpeada con el pisón de acero, para lograr que se fuera compactando, cuando el molde estuvo completamente lleno, se procedió a nivelar la superficie usando una tabla húmeda, deslizándola para retirar el exceso y colocarla a ras con el molde.

Las muestras permanecieron por dos días en el molde antes de ser retiradas, para que tomaran resistencia inicial y evitar que durante el desmolde se rompieran; después de los dos días se retiraron del molde.

4.4.2 Acopio y Curado. Una vez retiradas las muestras del molde, fueron marcadas para ser diferenciadas y se dejaron en un lugar seco donde no quedaron expuestas al sol ni a la lluvia, a temperatura ambiente (Figura 8), posteriormente fueron rociadas con agua utilizando un atomizador; dejando un espacio de 12 horas para rociarlas nuevamente, el proceso se repitió durante 8 días.

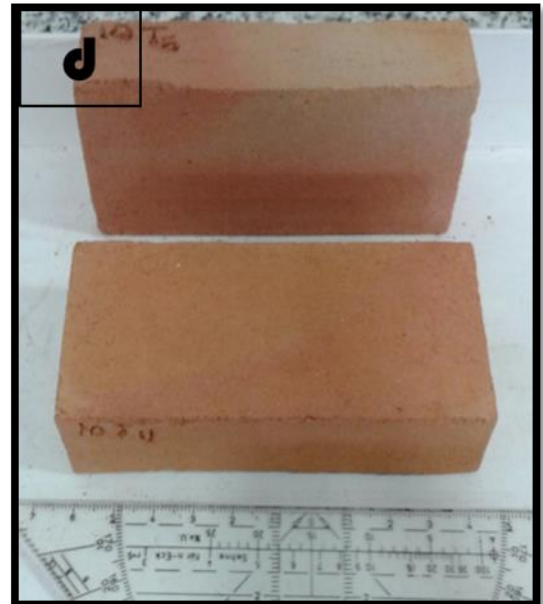
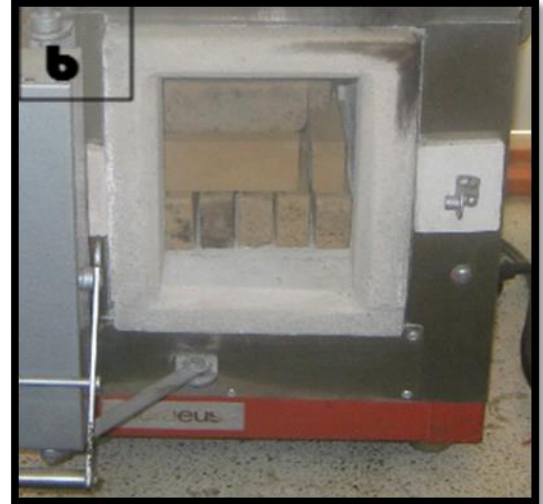
Figura 8. Muestras en acopio.



4.4.3 Cocción de las Unidades. Después del proceso de acopio y curado, las muestras permanecen a temperatura ambiente por 3 días, Antes de ser horneadas (Figura 9a) cada probeta fue pesada y su peso registrado. (Anexo A), luego se procede a cocinar las unidades en un horno HERAEUS a 900°C, para este fin se acomodaron las probetas de ladrillo en la mufla dejando un pequeño espacio entre las muestras (Figura 9b), se cierra herméticamente y se colocó el equipo a una temperatura de 106 °C; una vez alcanzada esta temperatura se contabilizó un tiempo de 2 horas y se incrementó la temperatura a 200 °C, permaneciendo a esta temperatura por 1 hora. De igual se procedió para las siguientes temperaturas 350 °C, 500 °C, 650 °C y 800 °C (Figura 9c), cuando la mufla alcanzó los 900°C, se dejaron las muestras a dicha temperatura por un tiempo de dos horas; al finalizar se apagó la mufla. Las muestras se retiran al día siguiente cuando la temperatura de la mufla se iguala a la del ambiente (Figura 9d).

En el momento que los ladrillos con las composiciones indicadas de cada residuo son retirados de la mufla, posterior al proceso de cocción; se toman nuevamente las medidas de sus tres dimensiones y los pesos correspondientes a cada muestra, tomando nota de ello lo cual se presenta en el (Anexo B).

Figura 9. Fase de pesado y cocción de probetas a) probetas de ladrillo pesadas antes de hornear b) acomodación de probetas y mufla utilizada; c) proceso de cocción, mufla a 800°C; d) muestras después de hornear



4.5 PRUEBAS REALIZADAS.

Las probetas de ladrillos fueron sometidas a una serie de pruebas para evaluar el comportamiento mecánico de las mismas, siguiendo la NTC 4017, para tal fin se realizaron los ensayos siguientes:

4.5.1 Ensayo de Compresión. Esta prueba se desarrolló en el laboratorio de ingeniería Civil de la UIS, en una máquina universal de ensayo MTS 810, (Figura 10a) con capacidad para aplicar una carga de 50 toneladas. Se montaron dos cabezales o platinas de acero de superficie plana, sobre la platina inferior se montó la pieza a ensayar, el cabezal de la parte superior aplicó el esfuerzo. Para la realización de esta prueba, se tomaron 39 especímenes, es decir 3 probetas por cada composición, las cuales se ubicaron con la cara del ladrillo de mayor área superficial, paralela a los cabezales de la máquina y perpendicular a la dirección de la fuerza aplicada (Figura 10b), posteriormente se fue aumentando la fuerza hasta lograr que el material fallara, este procedimiento se repitió en cada una de las probetas con las diferentes composiciones diseñadas.

4.5.2 Ensayos de Flexión. Esta prueba se desarrolló en el laboratorio de ingeniería Civil de la UIS, en una máquina universal de ensayo MTS 810, (Figura 11a) con capacidad para aplicar una carga de 2 toneladas.

Se utilizó una placa de acero de 1.5 cm de espesor y 3 varillas de acero de 0.5 mm de diámetro, los esfuerzos para este ensayo fueron aplicados en los tercios medios, para tal fin fue necesario marcar cada una de las probetas con unas líneas sobre las cuales se colocaron las varillas de acero, se marcó una línea en la cara superior en la mitad de la muestra, en la cara contraria se marcan dos líneas en los tercios medios (Figura 11b). Para el desarrollo de la prueba se colocó la placa de acero en la parte inferior, encima de la

placa se colocaron las dos varillas de acero, sobre estas se colocó la muestra a ensayar, haciendo coincidir las varillas con las líneas marcadas en el ladrillo, encima del cual se puso la otra varilla de acero sobre la línea marcada en la mitad de la muestra (Figura 11c), posteriormente se bajó el cabezal de la parte superior y se aplicó un esfuerzo hasta lograr que la muestra fuera fracturada (Figura 11d), El procedimiento se repitió con las 39 probetas utilizadas para este ensayo.

Figura 10. Muestras sometidas a compresión y equipo usado. a) Máquina universal de ensayos MTS 810; b) ensayo de compresión en probeta.

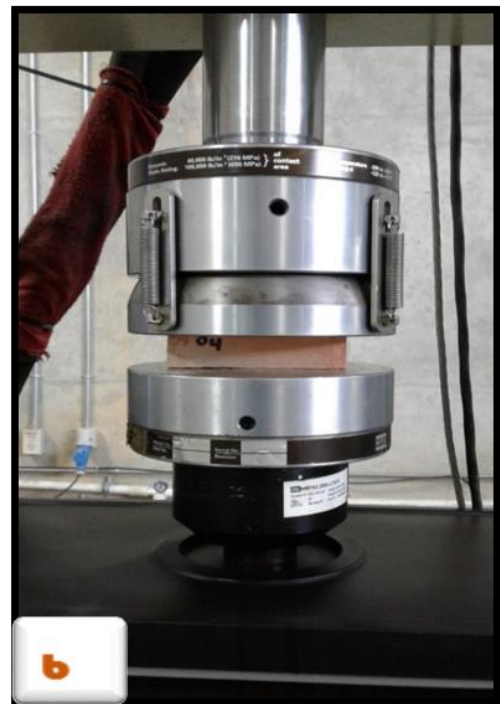
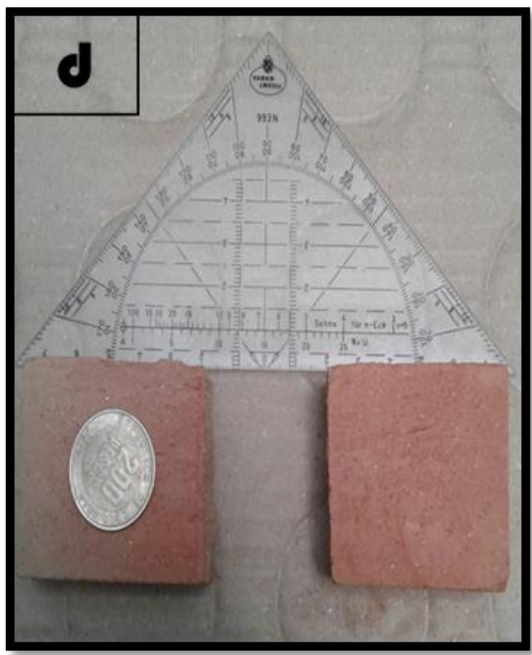
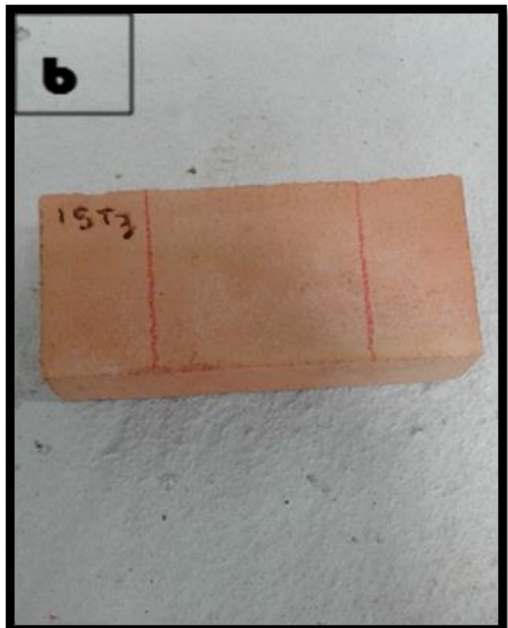
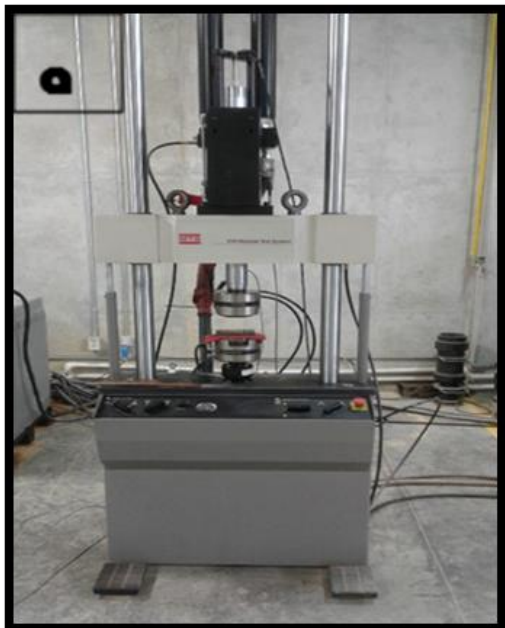
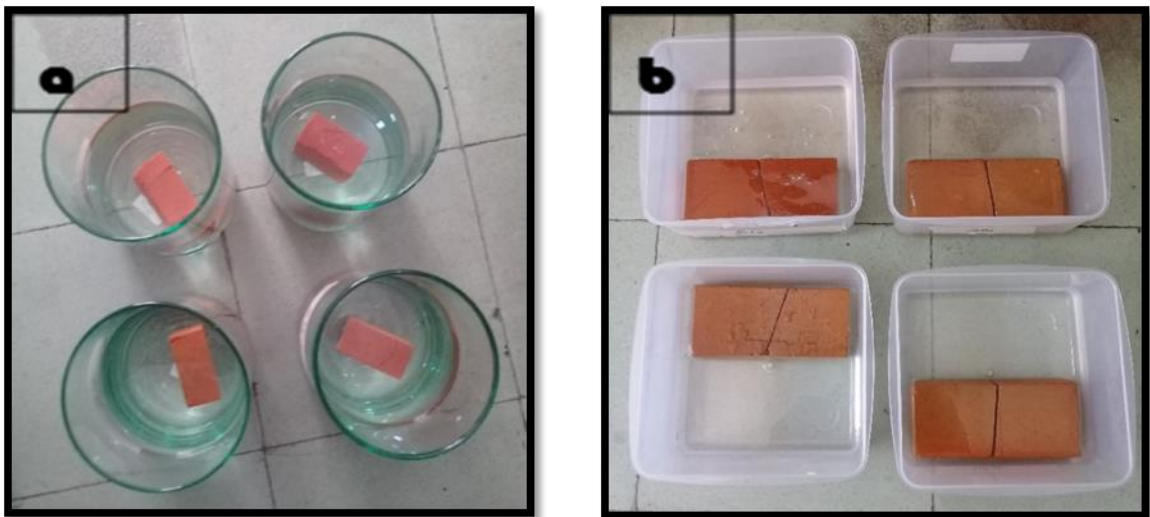


Figura 11. Muestras bajo ensayo de flexión. a) Máquina universal de ensayos MTS 810; b) Marcación de los ladrillos para flexión; c) Ensayo de flexión en probeta; d) Muestra fracturada después de flexión.



4.5.3 Inmersión en Soluciones. Esta prueba se realizó con el fin de evaluar el comportamiento de los ladrillos en ambientes corrosivos, en primer lugar, se seleccionaron las 4 muestras que presentaron mejor desempeño en las pruebas mecánicas (compresión y flexión), posteriormente se tomaron el peso y las medidas de cada una de las muestras antes de ser sumergidas. Seguido a esto se preparó una solución 0.25 molar de ácido sulfúrico, que fue vertida en 4 recipientes de vidrio en los cuales se depositaron las muestras seleccionadas. (Figura 12a). El mismo procedimiento se realizó con una solución 0.25 molar de cloruro de sodio, que fue vertida en 4 recipientes plásticos, en las cuales se sumergieron las probetas previamente seleccionadas (Figura 12b).

Figura 12. Muestras sumergidas en soluciones a) probetas sumergidas en ácido sulfúrico, b) probetas sumergidas en solución de NaCl.

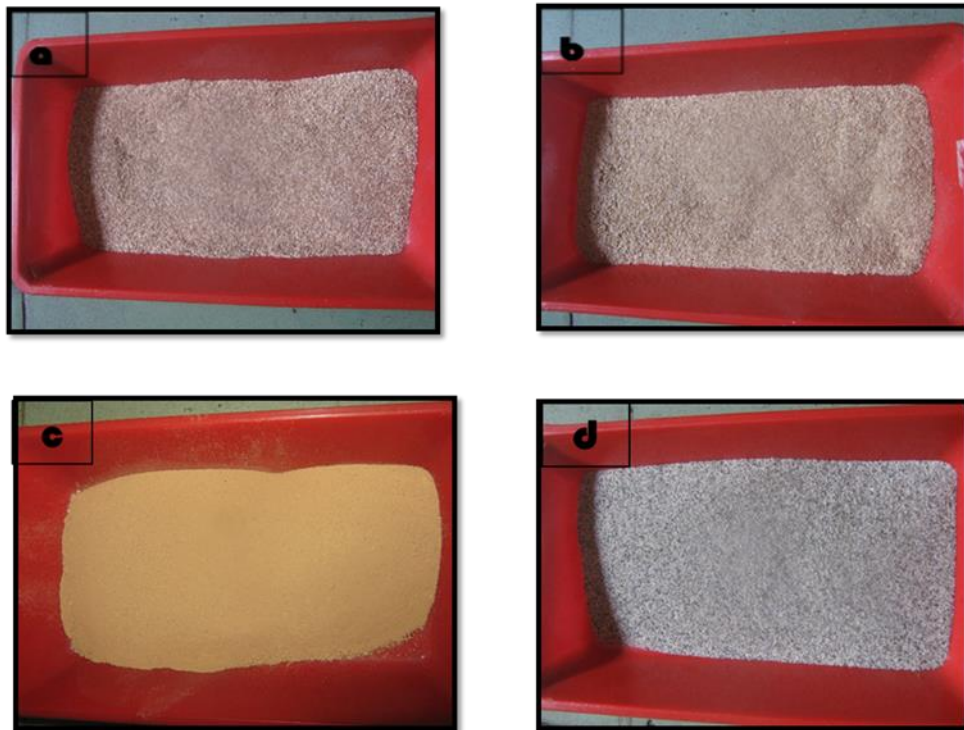


Los ladrillos permanecieron inmersos en las soluciones durante un periodo de 7 días y finalmente fueron retiradas de las soluciones, volviéndose a tomar los pesos y las medidas de cada una de las probetas.

5. RESULTADOS

En la Figura 13, se aprecian los materiales después del proceso de tamizaje, en la cual se puede observar el tamaño al que fueron reducidos cada uno de los elementos a utilizar para la preparación de las probetas.

Figura 13. Muestras después de tamizaje a) Cascara de yuca, b) Cascara de yuca, c) Arcilla, d) Cola de minería.



5.1 DIFRACCIÓN DE RAYOS X

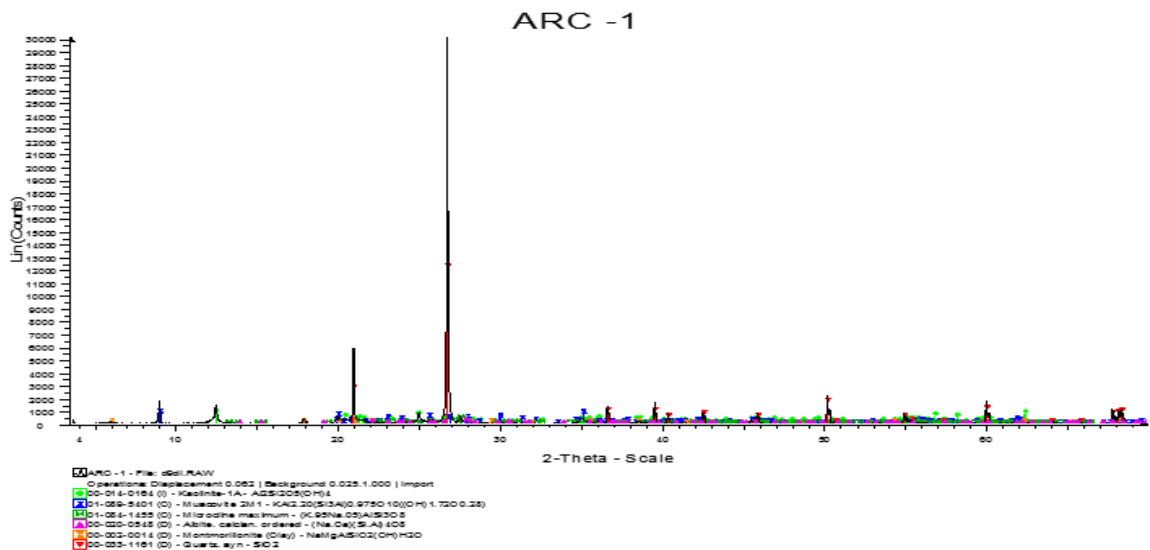
5.1.1 Arcilla. P.F. Kerr clasifica los materiales arcillosos en tres grupos:

- 1) Grupo del Caolín conformado por (Nacrita, Dickita, Caolinita, Halloysita, Anauxita, Alófano)
- 2) Grupo de la Montmorillonita integrado por (Montmorillonita, Beidelita, Nontronita, Saponita).

3) Grupo de la Esmeclita, en el cual se encuentran (Metabentonita, Hidromica). (Güeto³⁷).

Debido a que en la muestra analizada fue posible identificar minerales de arcilla de distintos grupos, se caracteriza la muestra como una combinación de diferentes tipos de arcilla, lo cual es muy utilizado en la industria ladrillera para facilitar, la manipulación del material y lograr mejoras en algunas etapas de fabricación de las piezas de cerámica. Después de analizar la muestra se obtuvo el difractograma (Figura 14)

Figura 14. Difractograma de Arcilla.



Los principales minerales identificados en la muestra de arcilla corresponden a cuarzo, feldespato potásico (microclina), feldespato sódico cálcico (albita cálcica), minerales arcillosos correspondientes al grupo de los filosilicatos (caolinita, moscovita, montmorillonita).

³⁷ GUETO, Juan. Tecnología de los materiales cerámicos. Ediciones Diaz de Santos. Comunidad de Madrid, consejería de educación. 2005, 400p.

5.1.2 Residuo de Minería. Los principales minerales identificados en la muestra (Figura 15) corresponden a cuarzo, feldespato potásico (microclina), feldespato sódico cálcico (albita cálcica), minerales arcillosos correspondientes al grupo de los filosilicatos (caolinita, moscovita, anfíbol (riebeckita), composicionalmente el residuo de minería es muy semejante a la muestra de arcilla analizada.

Figura 15. Difractograma de residuo de minería.

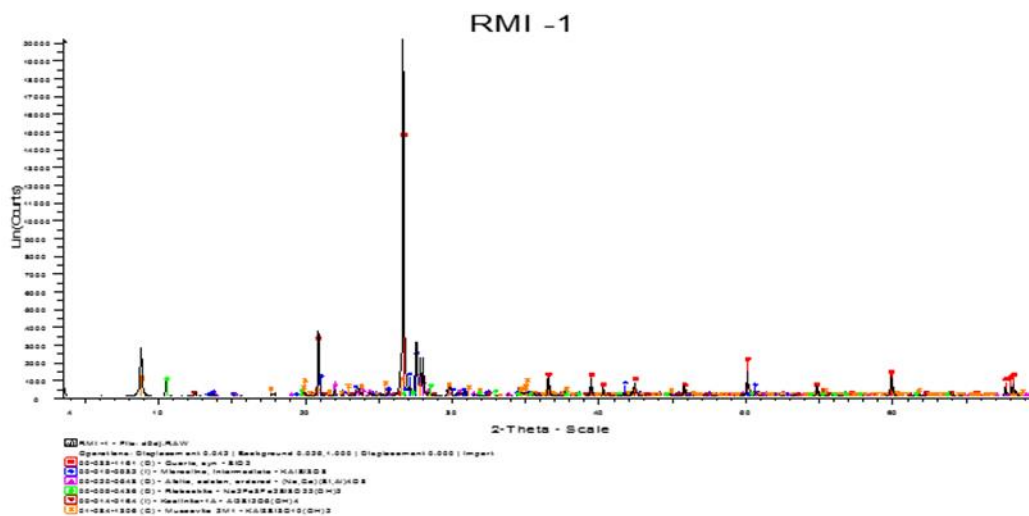
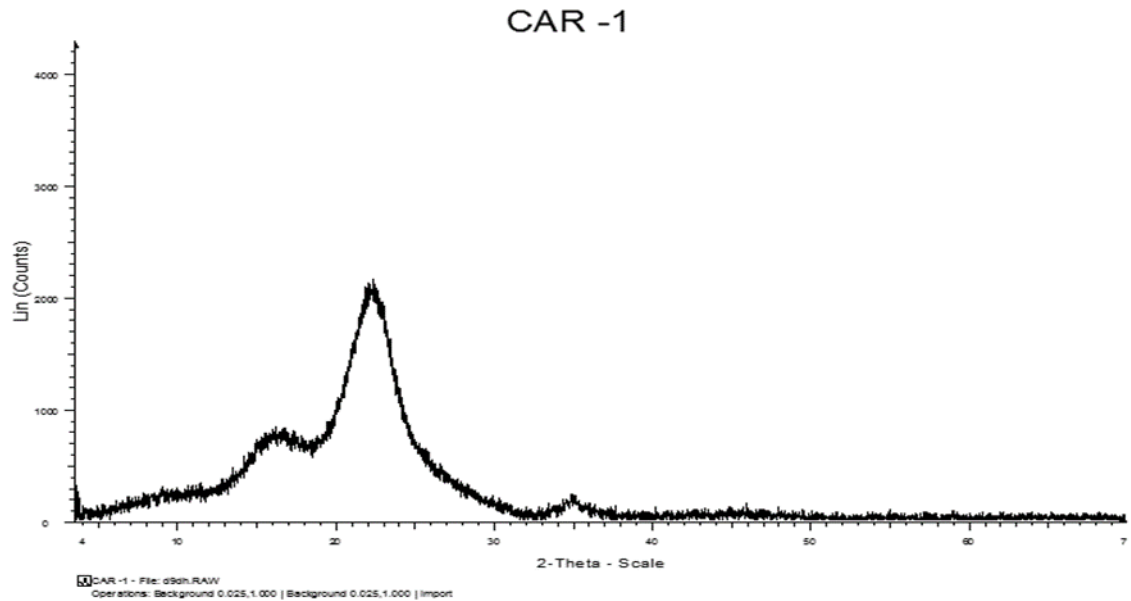


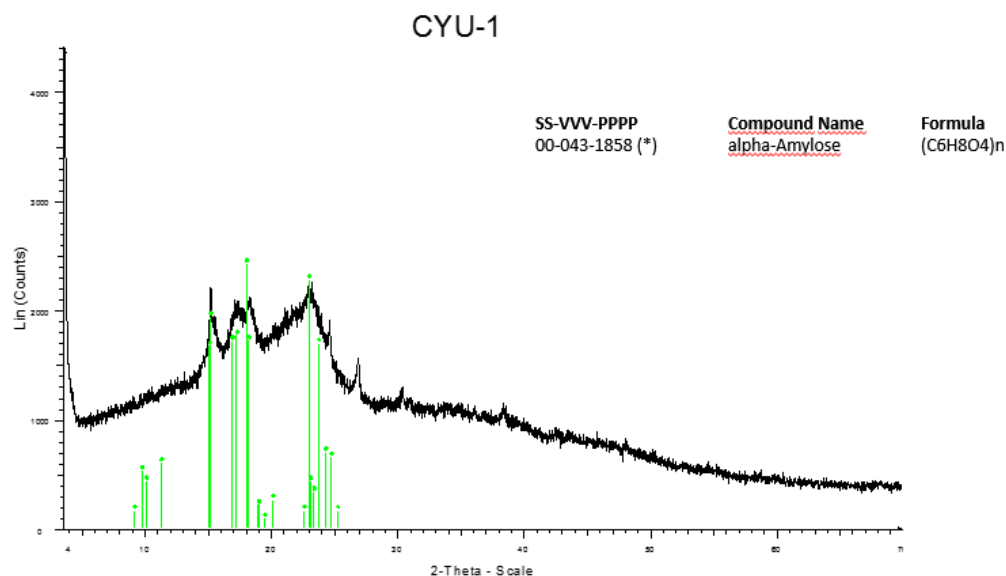
Figura 16. Difractograma cascarilla de arroz.



5.1.4 Cascara de Yuca. La principal fase que se detecta en el difractograma de la cáscara de yuca (Figura 17), corresponde a la α amilosa, la cual es una enzima que cataliza la hidrólisis en los enlaces de los polisacáridos, su presencia es típica en almidón y glucógeno, cuanto mayor es la concentración presente en el almidón mayor pegajosidad y firmeza tendrá, esto debido a que la estructura molecular de la α amilosa se dispone en una red de cadenas lineales, las cuales pueden acercarse lo suficiente entre si para formar uniones intermoleculares.

A nivel industrial sus propiedades dan lugar a varios usos tales como, producción de etanol, adhesivo, gelificante, aglutinante, estabilizante, entre otras.

Figura 17. Difractograma cascara de yuca.



5.2 ESPECTROMETRIA ELECTRONICA DE BARRIDO (SEM).

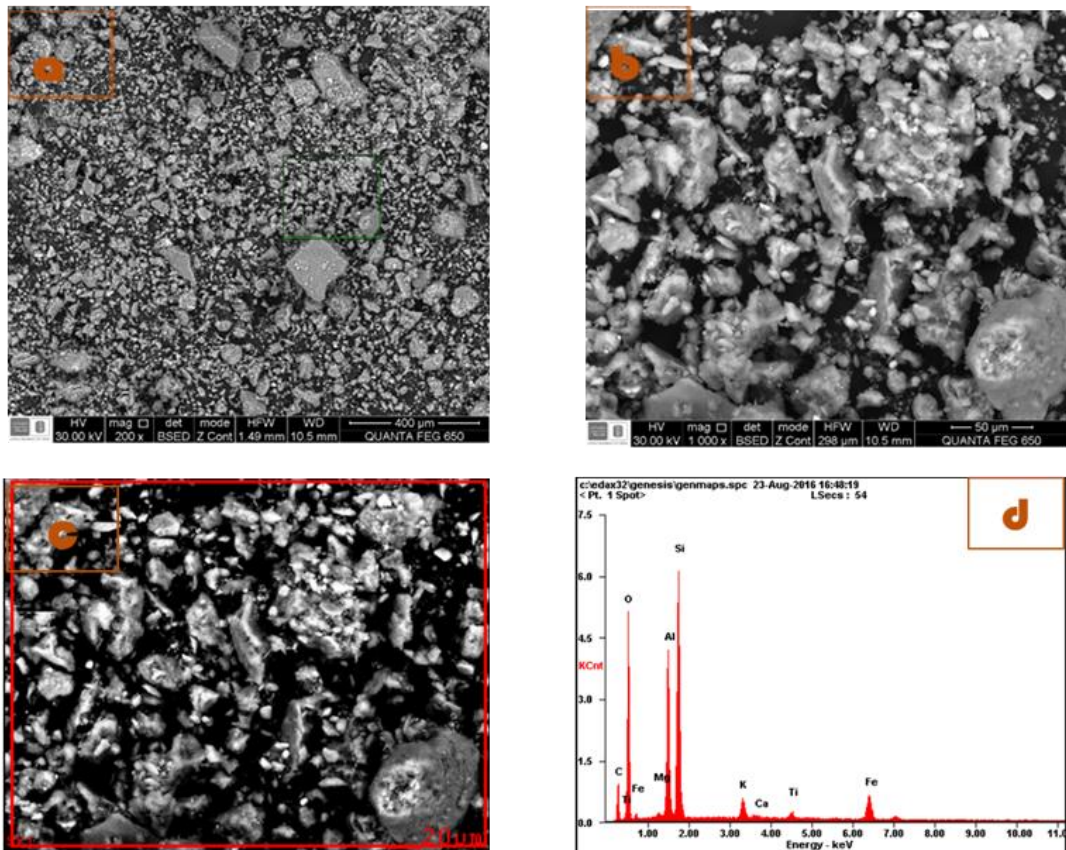
5.2.1 Arcilla. En las micrografías se pueden observar distintas partículas de diferentes tamaños, con morfologías angulares hasta redondeadas cuya composición también es diversa, (Figura 18a) la muestra pulverizada fue analizada por SEM, se demarcó una zona (Figura 18b) de la cual se hizo el EDS general y se tomaron tres puntos para tomar el EDS en cada uno de ellos, con el objetivo de conocer la composición de la arcilla.

Existe una gran cantidad de materiales arcillosos, por lo tanto es complejo clasificarlos, en términos generales una arcilla se define como un silicato de aluminio hidratado, dentro de los cuales se reconocen tres grandes grupos como lo son el del caolín, la cual algunos autores la denominan arcilla primaria porque no presenta impurezas, salvo algunas escasas provenientes de la roca madre, la montmorillonita, la cual presenta en su estructura iones de Mg, Ca o Fe; y la esmectita que puede presentar una composición más

variable, pero en la mayoría de los casos son impurezas de K como es el caso de la metabentonita.

El EDS global (Figura 18c) del cual se obtiene el espectro generalizado de la muestra, (Figura 18d), permite identificar los elementos presentes en la arcilla, donde se hace evidente que el material analizado corresponde a un silicato de aluminio hidratado, por la presencia mayoritaria de Si, Al y O asociados al caolín.

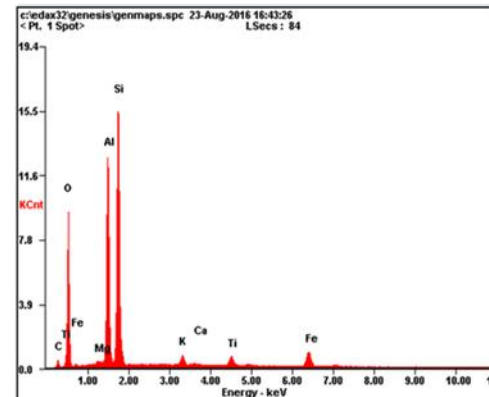
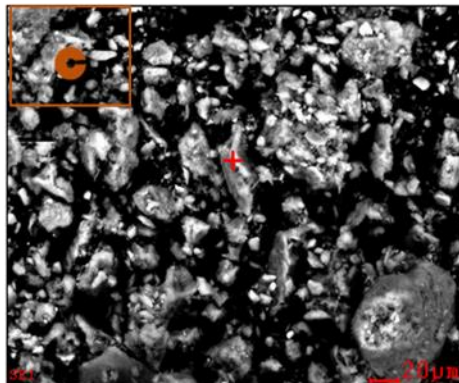
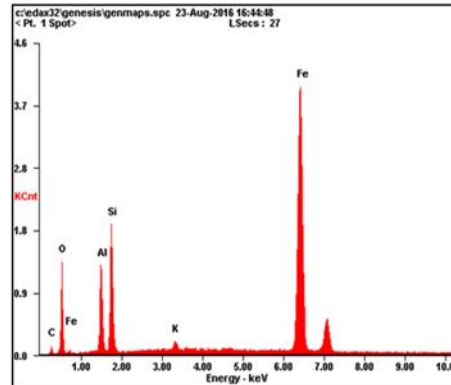
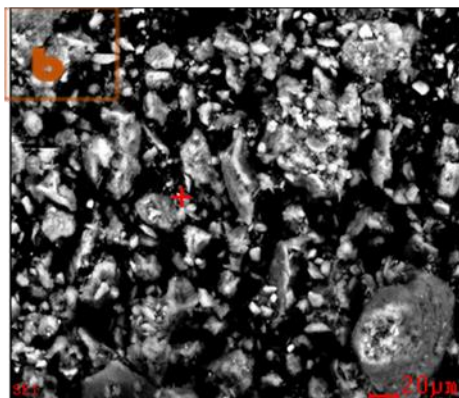
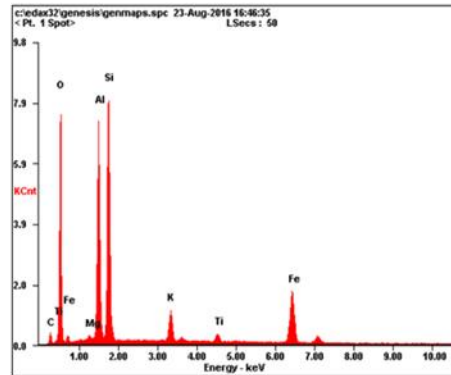
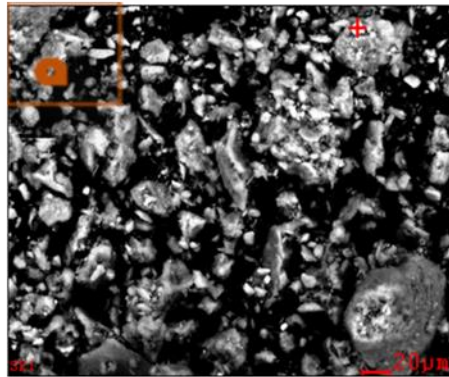
Figura 18. Micrografías arcilla (a) micrografía zona de análisis de arcilla, (b) zona de análisis aumentada, c) zona demarcada, d) espectro general de zona demarcada.



Se puede observar también la presencia de otros elementos en menor proporción, como es el caso del Fe, Mg y Ca asociados al grupo de la montmorillonita y en menor proporción aún se encuentran elementos como el K y el Ti, que están relacionados al grupo de la esmectita; la presencia de C que tiene directa relación con material de origen orgánico, se presenta en muchas ocasiones como carbonato de calcio y su aparición se da a menudo a nivel de yacimiento junto con las arcillas, la presencia de este material en grandes cantidades combinado con la arcilla genera muchas dificultades, hasta imposibilitar la utilización de la tierra para elaboración de piezas cerámicas.

Los EDS tomados en tres distintos puntos (Figura 19 a, c, e), ratifican la composición y la distribución de los distintos de los elementos presentes en las arcillas, donde el silicio el aluminio y el oxígeno aparecen como elementos principales, de igual manera la variedad de tamaño de las partículas y su morfología. El análisis elemental obtenido en los espectros (Figura 19 b, d, f), confirman que se trata de una combinación de diferentes tipos de arcilla y de los distintos grupos, presentando impurezas de Mg, Ca, Ti y principalmente Fe, las cuales son comunes y en la mayoría de los casos deseables como es el caso del Fe, que le da el color rojo o rosado característico a las piezas cerámicas, en las cuales entre más intenso sea el color rojo mayor contenido de hierro estará presente en la arcilla

Figura 19. Micrografías residuo de cascarilla de arroz a) Punto 1 zona demarcada, b) espectro obtenido en punto 1, c) Punto 2 zona demarcada, d) espectro obtenido en punto 2, e) Punto 3 zona demarcada, f) Espectro obtenido en punto 3.



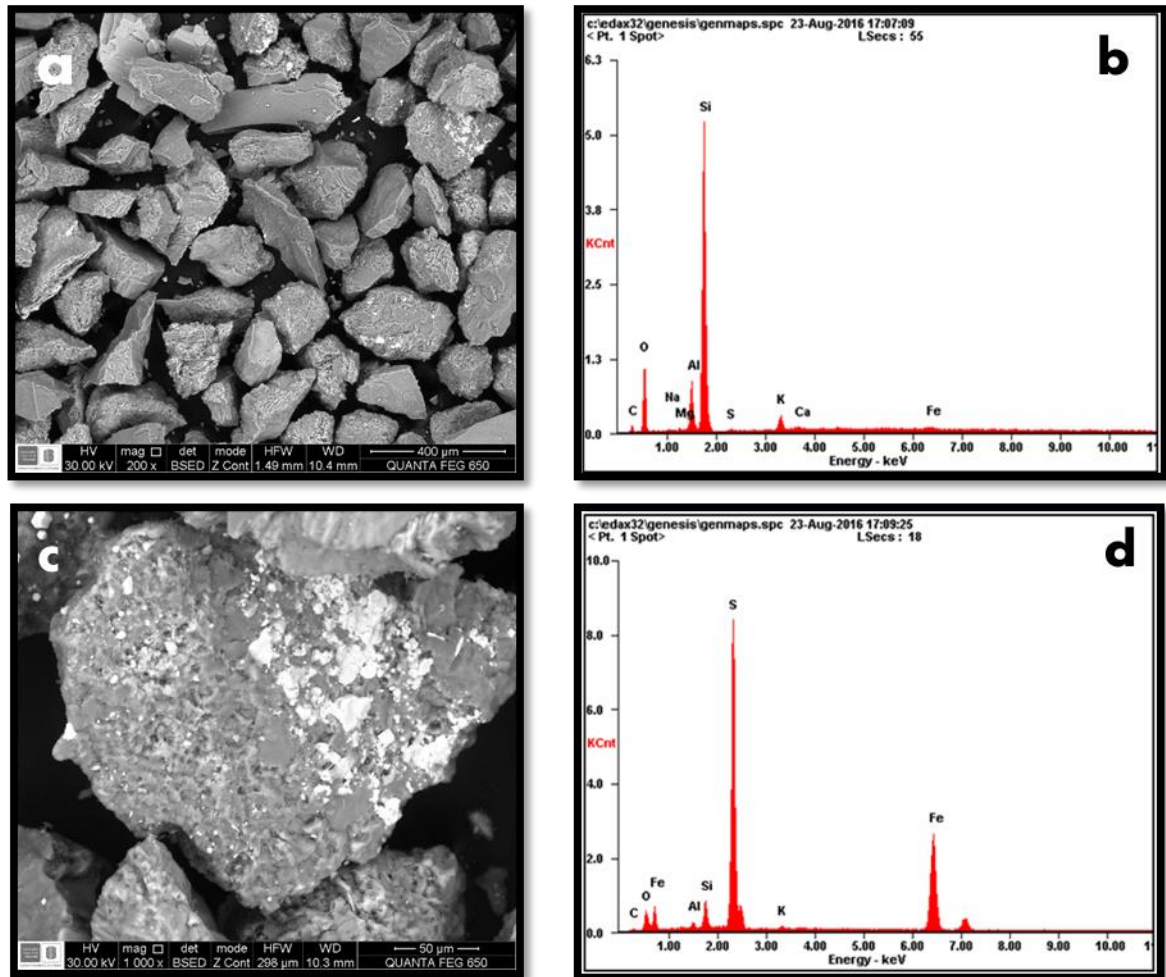
5.2.2 Residuo De Minería. Debido a todos los procesos químicos, físicos y mecánicos a los que ha sido sometido este residuo en el proceso de extracción del mineral de interés (oro), antes de ser analizada la muestra, por lo tanto, solo se realizará un análisis desde el punto de vista composicional.

En la micrografía del residuo de minería (Figura 20 a), se observan partículas de distintas morfologías, tabulares alargadas, con aristas angulares, con fractura concoide y brillo vítreo, algunas partículas subredondeadas, con diseminación de manchas de brillo metálico y estructura porosa, otras de formas muy irregulares al igual que la fractura de las mismas.

El EDS revela un espectro (Figura 20b), donde es marcado el alto contenido de cuarzo de la muestra, acompañado de feldespatos, siendo el potásico más abundante que el sódico, la presencia de sulfuros más exactamente pirita como se puede observar en la microscopia (Figura 20c), que es un mineral comúnmente asociado con el oro; principalmente en vetas por las que pueden circular fluidos hidrotermales, cuya composición es de hierro y azufre, tal como se puede evidenciar; en el espectro obtenido (Figura 20d), en el cual los picos que predominan son los correspondientes con el hierro y el azufre.

Se pudo identificar la presencia de elementos metálicos, tales como Mg, Mn, Ti formando óxidos que es común encontrarlos asociados al oro; o ligados a alguna estructura de algún silicato, al igual que los carbonatos los óxidos están presentes como materiales accesorios.

Figura 20. Micrografías residuo de minería a) Micrografía residuo de minería, b) Espectro residuo de minería, c) Partícula con presencia de pirita, d) Espectro obtenido.



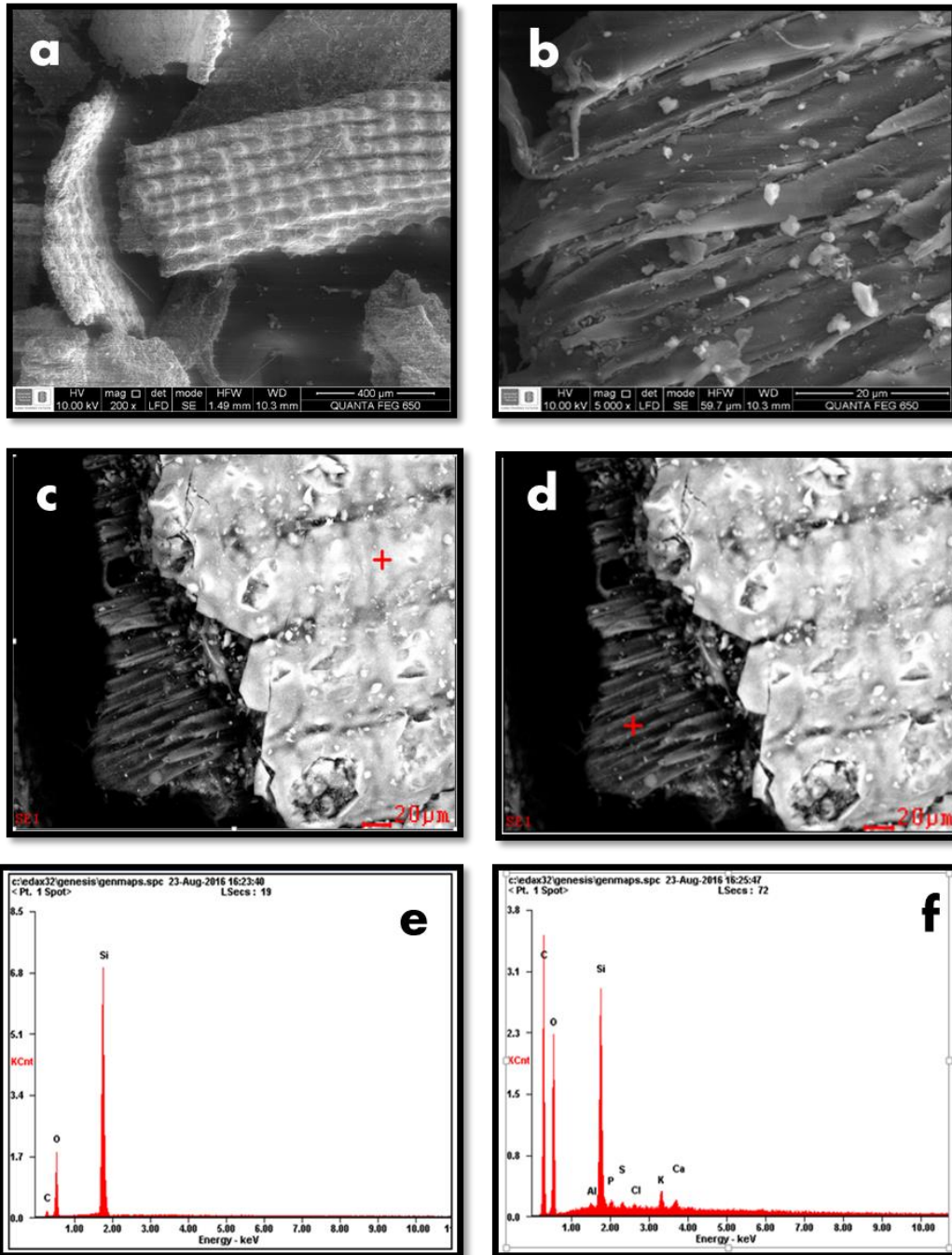
5.2.3 Cascarilla De Arroz. Por medio de microscopía electrónica de barrido se pudieron obtener micrografías de la cascarilla de arroz, en las cuales se puede observar la zona externa conocida como exocarpo (Figura 21 a), caracterizada por presentar una estructura simétrica, de protuberancias en forma de celdas convexas o burbujas, que se asemejan al caparazón de una tortuga, separada por surcos a lo ancho del grano de arroz, dichos surcos se encuentran orientados en la dirección paralela a lo largo del grano. La cara interna denominada endocarpo (Figura 21b), está constituida por una superficie cóncava, sobre la cual se van sobreponiendo capas de estructuras aciculares, las cuales cumplen la función de sustrato para el grano de arroz.

Los espectros de EDS, tomados tanto en la parte externa (Figura 21 c) como en la interna de la cascarilla de arroz (Figura 21 d), evidencian la presencia de sílice y materia orgánica, como principales constituyentes de la cascarilla en la zona interior y exterior. La Sílice se encuentran distribuida en mayor proporción en el exocarpo, (Figura 21e), zona que está constituida en mayor parte por material inorgánico, donde el Silicio se halla en un 42,92% mientras que el Carbono está en un 14,11%, dicha distribución es coherente con la función que cumple la sílice de proteger el grano de arroz.

El espectro de EDS, tomado en la parte interna (Figura 21f), evidencia el aumento de la cantidad del material orgánico con respecto al exocarpo, donde el Carbono está presente en un 52,18% mientras que el Silicio solo alcanza un 8,81%, esta distribución de la parte interna de contener mayor proporción de material orgánico que inorgánico, también es coherente con la función de esta zona de la estructura de servir como sustrato de la parte orgánica del grano de arroz.

En el endocarpo, se muestra la presencia de agregados que contienen impurezas, encontrándose de mayor a menor proporción los elementos siguientes: Potasio, Calcio, Fosforo, Azufre, Aluminio y cloro; los cuales están unidos a la estructura interna, no presentan una forma regular y se encuentran diseminados en todo el endocarpo, en porcentajes inferiores al 1%.

Figura 21. Micrografías residuo de cascarilla de arroz a) Cara externa cascarilla de arroz (exocarpo), b) Cara interna cascarilla de arroz (endocarpo), c) Punto externo de analisis de espectro, d) Punto interno de analisis de espectro, e) Espectro del exocarpo, f) Espectro del endocarpo.



5.2.4 Cascara de yuca. Las micrograffías obtenidas de este residuo, (Figura 22a) muestra que la cascara de yuca o pericarpio, presenta una estructura aparentemente conformada por hojuelas o laminas corrugadas, que se encuentran agrietadas de manera irregular; constituidas por pequeñas fibras aciculares, pero realizando un acercamiento mayor (Figura 22c), se aprecia que se trata de pequeñas escamas englobadas o vacuolas, que dan una apariencia comparable a un racimo de uvas, las cuales están unidas en contacto tangencial dando forma a toda la estructura laminar que protege la parte central del tubérculo.

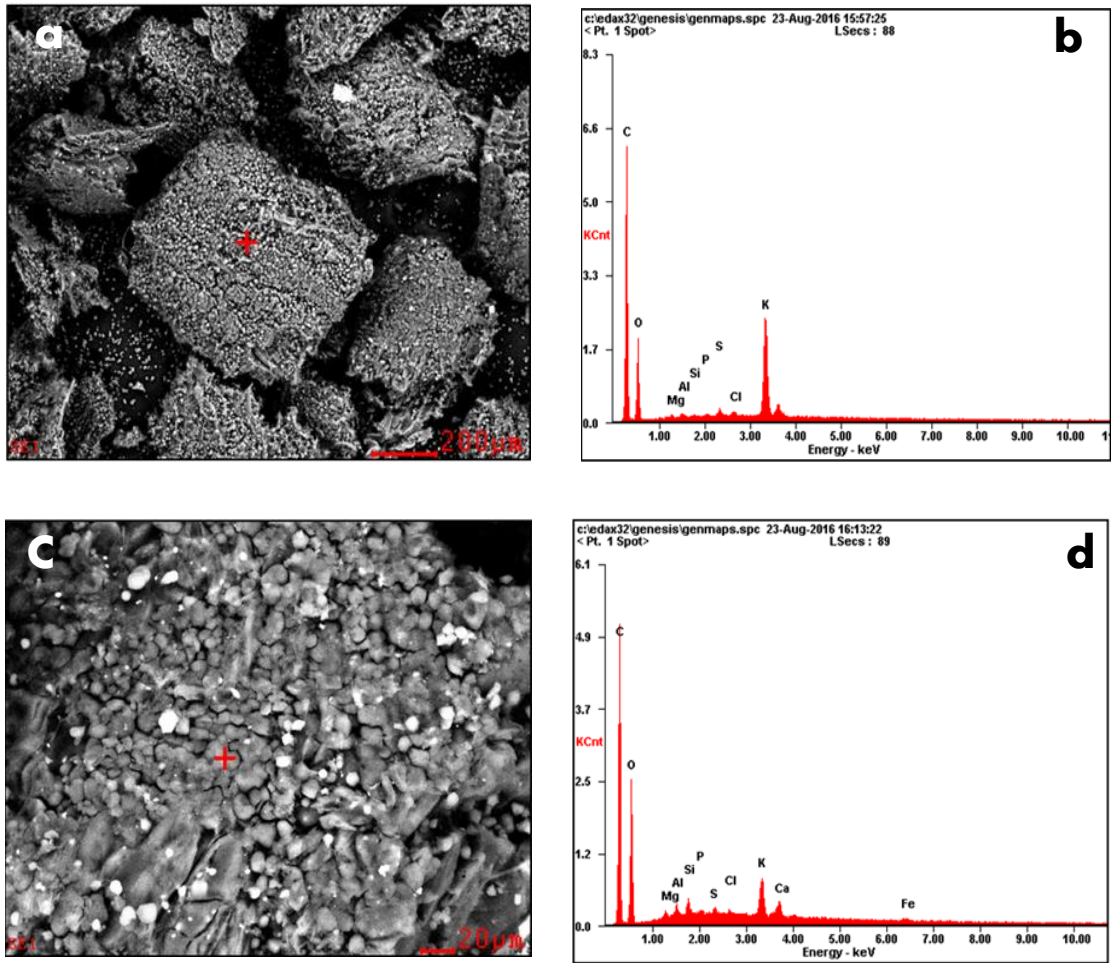
El análisis elemental obtenido por EDS, revela los espectros de la muestra analizada, (Figura 22b, d), en los cuales se observa el origen orgánico de la cascara de yuca por su alto contenido de C y O que sumados conforman cerca del 93%, los otros elementos que se muestran en el espectro se presentan en porcentajes inferiores al 1% excepto el K, que aparece con un porcentaje ligeramente superior al 2%, dichos elementos hacen parte de la tierra, ya que el tubérculo está en contacto directo con el suelo; estos elementos se adhieren a la cascara donde son absorbidos en forma de nutrientes por la planta.

“La yuca extrae grandes cantidades de nutrientes del suelo, especialmente nitrógeno (N), potasio (K) y calcio (Ca). Por cada tonelada de raíces frescas cosechadas, la planta puede llegar a demandar cantidades de nutrientes estimadas en kilogramos (kg) por hectárea (ha), hasta el final del ciclo de cultivo, así: N, 4,42; fósforo (P), 0,67; K, 3,58; Ca, 1,36; magnesio (Mg), 0,82; azufre (S), 0,42 (Cadavid, L., 1995)”. (DANE³⁸).

³⁸ DANE- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Insumos y factores asociados a la producción agropecuaria. Bboletín 46, 2016, 1-10 p.

Otros elementos que no forman parte de la planta, tampoco de los nutrientes utilizados para el desarrollo de la misma; tales como el Cl y el Al, están presentes como iones disueltos de sales, que se generan como producto de la lixiviación de aguas lluvias o de riego.

Figura 22. Micrográficas residuo de cáscara de yuca, a) Micrografía cascara de yuca, b) espectro cáscara de yuca, c) Estructura del pericarpio, d) espectro de lado externo cascara de yuca.



5.3 COCCIÓN DE LOS LADRILLOS.

Al retirar las muestras del horno, se toman los pesos y dimensiones de cada una (Anexo B), con esos datos se realizó un cálculo de la pérdida de peso en gramos y en porcentaje (Tabla 2). Las muestras sin adición de residuo alguno, presentaron una pérdida en promedio del 6.65%, las muestras con adición de residuo de cascarilla de arroz y de cascara de yuca, mostraron una pérdida de peso mayor, aumentando proporcionalmente con la cantidad de residuo añadido, mientras que las muestras con residuo de minería aurífera, presentaron pérdidas de peso muy similares entre ellas, independientemente de la cantidad de residuo agregado; sin embargo la pérdida de peso es inferior a la que presentaron las probetas sin modificaciones; en la tabla 2 aparece registrada la variación del peso de las muestras antes y después del periodo de horneado.

Tabla 2. Reducción de peso de las muestras después del proceso de horneado

TIPO	Peso previo (g)	Peso posterior (g)	Reducción (g)	Reducción (%)
O1	228,31	212,66	15,65	6,85
O2	216,5	202,08	14,42	6,66
O3	222,24	207,45	14,79	6,65
O4	212,71	198,83	13,88	6,53
O5	211,55	197,58	13,97	6,60
O6	210,11	196,28	13,83	6,58
5A1	204,32	187,72	16,6	8,12
5A2	213,81	179,28	34,53	16,15
5A3	220,19	194,61	25,58	11,62
5A4	203,78	180,19	23,59	11,58
5A5	195,88	175,18	20,7	10,57
5A6	203,9	180,32	23,58	11,56
10A1	219,22	171,41	47,81	21,81
10A2	206,84	181,41	25,43	12,29
10A3	210,21	175,16	35,05	16,67
10A4	202,63	168,96	33,67	16,62
10A5	199	165,73	33,27	16,72
10A6	201,53	168,1	33,43	16,59
15A1	169,98	125,89	44,09	25,94

15A2	172,64	127,67	44,97	26,05
15A3	191,63	150,22	41,41	21,61
15A4	182,69	143,17	39,52	21,63
15A5	181,14	143	38,14	21,06
15A6	179,56	141,05	38,51	21,45
5Y1	207,48	185,54	21,94	10,57
5Y2	217,48	193,54	23,94	11,01
5Y3	215,26	189,2	26,06	12,11
5Y4	216,82	191,07	25,75	11,88
5Y5	215,81	191,17	24,64	11,42
5Y6	205,59	181,84	23,75	11,55
10Y1	202,86	168,39	34,47	16,99
10Y2	196,76	163,28	33,48	17,02
10Y3	200,99	165,78	35,21	17,52
10Y4	205,11	169,33	35,78	17,44
10Y5	199,46	164,98	34,48	17,29
10Y6	191,74	158,22	33,52	17,48
15Y1	156,81	120,55	36,26	23,12
15Y2	154,57	121,74	32,83	21,24
15Y3	188,67	143,87	44,8	23,75
15Y4	181,85	141,44	40,41	22,22
15Y5	190,6	146,78	43,82	22,99
15Y6	175,81	137,25	38,56	21,93
5R1	230,61	215,58	15,03	6,52
5R2	220,26	206,83	13,43	6,10
5R3	225,91	213,01	12,9	5,71
5R4	215,67	203,23	12,44	5,77
5R5	213,41	201,58	11,83	5,54
5R6	209,75	197,47	12,28	5,85
10R1	215,92	203,2	12,72	5,89
10R2	220,56	208,57	11,99	5,44
10R3	227,99	218,16	9,83	4,31
10R4	218,23	207,3	10,93	5,01
10R5	212,59	201,42	11,17	5,25
10R6	215,15	203,2	11,95	5,55
15R1	217,92	204,11	13,81	6,34
15R2	240,04	224,77	15,27	6,36
15R3	229,15	223,01	6,14	2,68
15R4	232,39	204,77	27,62	11,89
15R5	224,89	205,71	19,18	8,53
15R6	224,93	195,34	29,59	13,16
5T1	214,4	178,24	36,16	16,87

5T2	209,17	188,25	20,92	10,00
5T3	225,46	204,14	21,32	9,46
5T4	210,8	191,25	19,55	9,27
5T5	204,59	184,87	19,72	9,64
5T6	203,86	184,27	19,59	9,61
10T1	177,22	152,53	24,69	13,93
10T2	180,66	156,5	24,16	13,37
10T3	221,11	192,55	28,56	12,92
10T4	209,16	182,28	26,88	12,85
10T5	204,18	177,91	26,27	12,87
10T6	207,23	181,77	25,46	12,29
15T1	189,7	157,67	32,03	16,88
15T2	193,06	160,66	32,4	16,78
15T3	191,35	159,3	32,05	16,75
15T4	184,12	153,22	30,9	16,78
15T5	183,81	155,5	28,31	15,40
15T6	186,69	158,6	28,09	15,05

Las muestras sin modificaciones perdieron peso durante el proceso de cocción, porque la alta temperatura produce la deshidratación de las unidades por evaporación del agua, mientras que las muestras con cascarilla de arroz y cáscara de yuca además del proceso de deshidratación, su contenido orgánico se volatiliza en forma de dióxido de carbono, creando porosidad y aligerando el ladrillo, las muestras modificadas con residuo de minería no presentan material orgánico y composicionalmente tienen elementos más pesados que la arcilla, por lo tanto la reducción en el peso de estas probetas está relacionada únicamente con el proceso de deshidratación, al cual fueron sometidos durante el tiempo cocción a alta temperatura. Los porcentajes de pérdida de peso para cada una de las muestras están representados en la Figura 23.

La Figura 24a, muestra los ladrillos antes y la figura 24b después del proceso de cocción, evidenciando el cambio de color de crema para los ladrillos crudos a rojizo de los cocidos debido a la presencia de hierro

Figura 23. Porcentaje de pérdida de peso después del proceso de cocción.

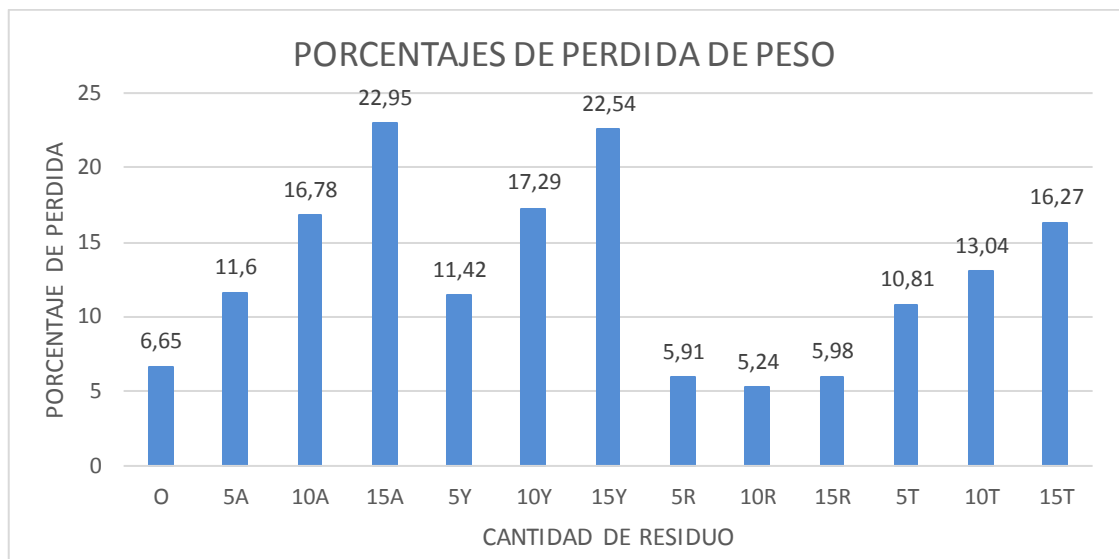


Figura 24. Muestras antes y después del proceso de cocción. (a) Muestra antes y después del proceso de cocción, (b) Muestra después de cocción.



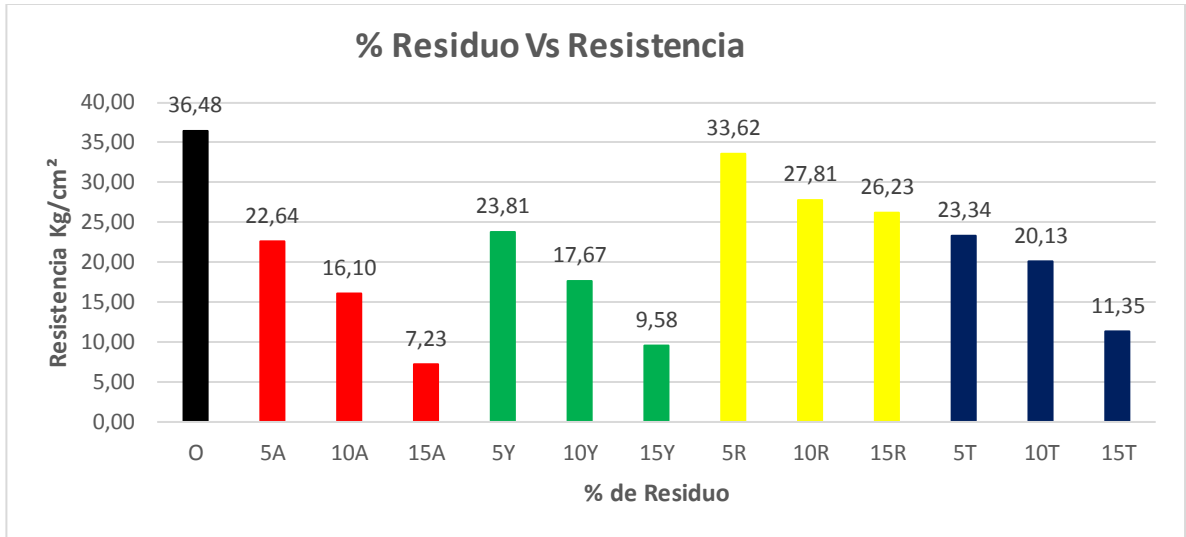
5.4 ENSAYO DE COMPRESIÓN.

Los resultados obtenidos en esta prueba quedaron registrados en el Anexo C, posteriormente se realizaron los cálculos respectivos y se tomaron los promedios de los datos tal como se encuentra registrado en la tabla 3.

Tabla 3. Promedios para cálculo de resistencia a la compresión.

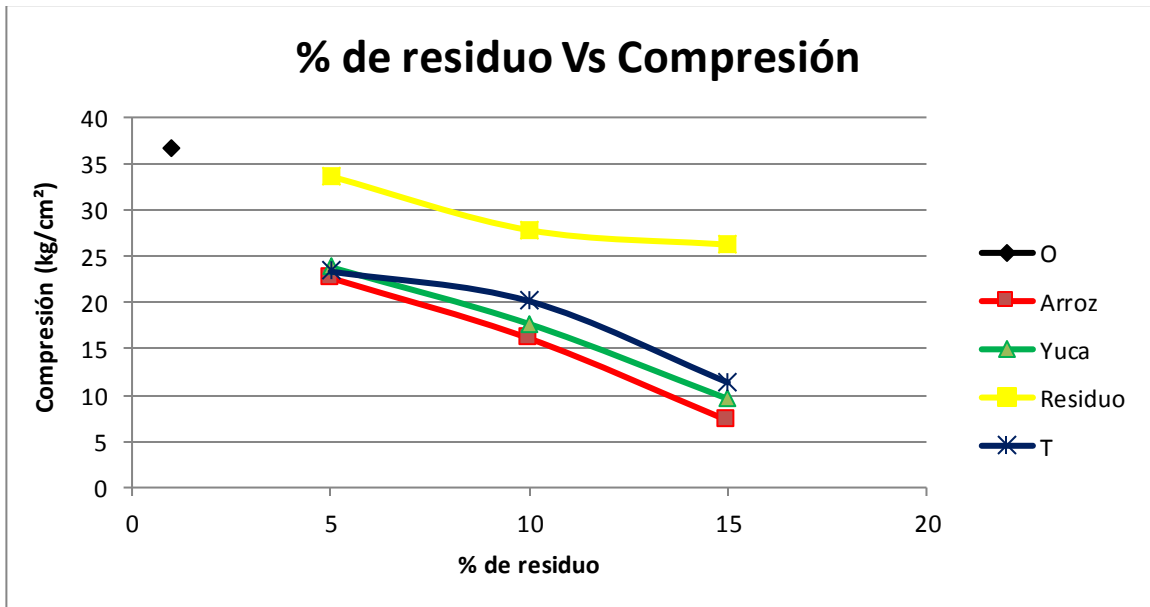
TIPO	AREA (cm²)	CARGA (KN)	RESISTENCIA (Kg/cm²)	DEFORMACIÓN (mm/mm)
O	45,8567	16,4068	36,4819	0,0202
5A	46,6033	10,3518	22,6415	0,0154
10A	47,4467	7,4954	16,1034	0,0141
15A	47,1	3,3409	7,2345	0,0182
5Y	50,3667	11,7647	23,8098	0,0236
10Y	48,90667	8,4747	17,6671	0,0168
15Y	47,75333	4,4863	9,5771	0,0197
5R	47,38	15,6213	26,2347	0,0206
10R	47,38	12,9230	27,8126	0,0187
15R	47,22333	12,1456	26,2347	0,0159
5T	47,49333	10,8650	23,3429	0,0157
10T	47,1	9,2985	20,1339	0,0114
15T	47,44667	5,5022	11,3542	0,0282

Figura 25. Valores promedio de la resistencia para cada porcentaje de residuo.



La Figura 26, muestra el comportamiento de la resistencia con respecto al porcentaje de residuo añadido a cada muestra

Figura 26. Variación de la compresión con respecto al porcentaje de residuo.



La interpretación de la Figura 26, evidencia lo siguiente:

- la resistencia a la compresión disminuyó en todas las probetas modificadas comparada con las muestras sin adición de residuos.
- Todas las muestras con adición de residuos presentaron un comportamiento lineal decreciente de la resistencia, inversamente proporcional a la cantidad de residuo agregado; es decir, a mayor porcentaje de adición, menor fue la resistencia a la compresión.
- De acuerdo con la gráfica los mejores resultados se dan para las muestras con adición de 5% de residuo de minería 33,62 Kg/cm².

La normativa para ladrillos y bloques define los valores durante el ensayo de compresión para ladrillos macizos según la norma NBE AE-88 denominada acciones en la edificación, los cuales se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Resistencia de cálculo de las fábricas de ladrillos macizos

Resistencia del ladrillo kg/cm ²	Plasticidad del mortero	Espesor de las juntas en cm	Resistencia de cálculo f_d de la fábrica, en kg/cm ² con mortero				Espesor de las juntas en cm	Plasticidad del mortero	Resistencia del ladrillo kg/cm ²
			M-20	M-40	M-80	M-160			
100	magra	> 1,5	12	14	16	•			
	magra	1,5 a 1	14	16	18	•			
	sograsa	> 1,5							
	magra	< 1	16	18	20	•			
	sograsa	1,5 a 1					> 1,5	magra	
	grasa	> 1,5							
150	sograsa	< 1	18	20	22	25	1,5 a 1	magra	
	grasa	1,5 a 1					> 1,5	sograsa	
	grasa	< 1	20	22	25	28	< 1	magra	
	magra	> 1,5					1,5 a 1	sograsa	150
	magra	1,5 a 1	22	25	28	32	> 1,5	grasa	
	sograsa	> 1,5							
200	magra	< 1	25	28	32	36	< 1	grasa	
	sograsa	1,5 a 1					> 1,5	magra	
	grasa	> 1,5							
	sograsa	< 1	28	32	36	40	1,5 a 1	magra	
	grasa	1,5 a 1					> 1,5	sograsa	
	grasa	< 1	32	36	40	45	< 1	magra	
300	sograsa	1,5 a 1					1,5 a 1	sograsa	300
	grasa	> 1,5					> 1,5	grasa	
	grasa	< 1	36	40	45	50	< 1	sograsa	
			40	45	50	56	1,5 a 1	grasa	
							< 1	grasa	

Fuente: Tomado de Luna 2012.

La normativa presentada en la tabla anterior, establece un rango de permisividad de resistencia a la compresión entre 12 y 56 Kg/cm², comparando estos valores con los obtenidos para ladrillos aligerados a partir de colas de minería y residuos agroindustriales (yuca y arroz), se deduce que las adiciones de 15% a excepción del residuo de minería, no son favorables y no se recomienda reemplazar la pasta tradicional en este porcentaje o superior; las adiciones realizadas con 5 y 10% de residuos presentaron un descenso en la resistencia a la compresión comparados con los ladrillos sin modificación, sin embargo presentaron valores dentro de los rangos admisibles.

La deformación es una medida del desplazamiento axial, la cual representa cuanto se deja comprimir el ladrillo antes de fallar.

En la Figura 28 se muestran algunas imágenes de las probetas y fragmentos de las muestras después del ensayo de compresión

Figura 27. Fragmentos de probetas después del ensayo de compresión.



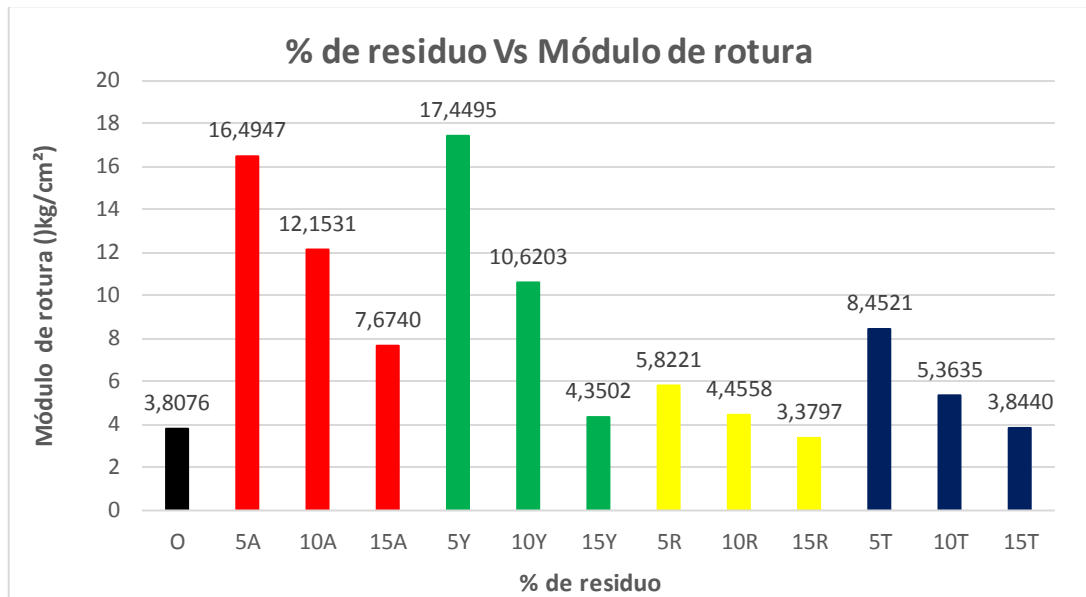
5.5 ENSAYO DE FLEXIÓN.

Los resultados obtenidos en esta prueba quedaron registrados en el Anexo D, posteriormente se realizaron los cálculos respectivos y se tomaron los promedios de los datos tal como se encuentra registrado en la tabla 5.

Tabla 5. Promedios para cálculo del módulo de rotura.

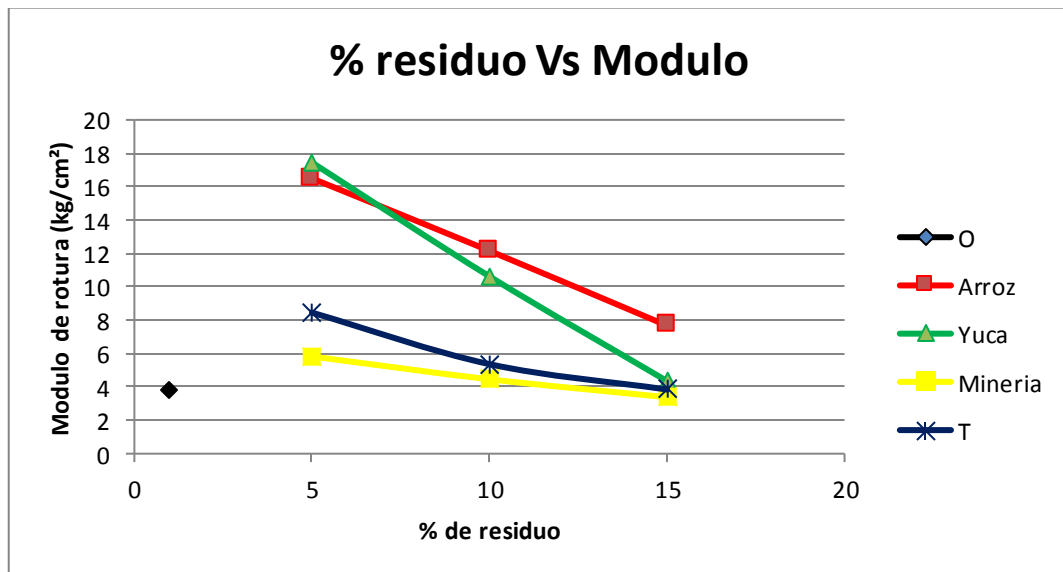
TIPO	CARGA (P) Kg	DISTANCIA (L) cm	LARGO (b) cm	ALTURA (h) cm	MÓDULO kg/cm²
O	30,5323	5,133	10,133	2,467	3,8076
5A	121,2129	5,400	10,400	2,400	16,4947
10A	93,8524	5,533	10,533	2,467	12,1531
15A	55,9597	5,500	10,500	2,400	7,6740
5Y	125,2342	5,367	10,367	2,367	17,4495
10Y	73,9382	5,433	10,433	2,333	10,6203
15Y	29,1038	5,233	10,233	2,267	4,3502
5R	46,0494	5,267	10,267	2,467	5,8221
10R	33,2234	5,267	10,267	2,400	4,4558
15R	24,8491	5,333	10,333	2,400	3,3797
5T	61,9840	5,333	10,333	2,400	8,4521
10T	38,5752	5,333	10,333	2,367	5,3635
15T	26,7614	5,133	10,133	2,300	3,8440

Figura 28. Valores promedio del módulo de rotura para cada porcentaje de residuo.



La Figura 29 muestra el comportamiento del módulo de rotura con respecto al porcentaje de residuo adicionado

Figura 29. Variación del módulo de rotura con respecto al porcentaje de residuo.



El módulo de rotura se calculó utilizando la ecuación siguiente:

$$\text{Módulo de rotura} = \frac{(3 P L)}{(2b(h)^2)}$$

La interpretación de la Figura 29, evidencia lo siguiente:

- Exceptuando las probetas con adición del 15% de residuo de minería, todas las muestras presentaron un módulo de rotura mayor que el de las muestras sin modificaciones.
- El módulo de rotura presenta un comportamiento descendente a medida que incrementa la dosis de residuo añadido.
- De acuerdo con la gráfica los mejores resultados se dan para las muestras con adición de 5% de cascara de yuca 17,4495Kg/cm²
- Las muestras con contenido orgánico presentaron mayores valores de módulo de rotura.

Los resultados mostrados en la tabla 5, vienen dados en N/mm² que es equivalente a Mega Pascales (Mpa), en este trabajo el módulo de rotura viene dado en kg/cm², por lo tanto, fue necesario dividir entre 10,2 para convertir a Mpa.

Tabla 6. Resistencia característica a la flexión de fábricas usuales.

Tipo de pieza	Morteros ordinarios				Morteros de junta delgada		Morteros ligeros	
	$f_m < 5N/mm^2$		$f_m \geq 5N/mm^2$		f_{xk1}	f_{xk2}	f_{xk1}	f_{xk2}
	f_{xk1}	f_{xk2}	f_{xk1}	f_{xk2}				
Cerámica	0.10	0.20	0.10	0.40	0.15	0.15	0.10	0.10
Sílico-calcáreos	0.05	0.20	0.10	0.40	0.20	0.30	-	-
Hormigón ordinario	0.05	0.20	0.10	0.40	0.20	0.30	-	-
Hormigón celular de autoclave	0.05	0.40	0.10	0.40	0.15	0.20	0.10	0.15
Piedra artificial	0.05	0.40	0.10	0.40	-	-	-	-
Piedra natural	0.05	0.20	0.10	0.40	0.15	0.15	-	-

Fuente: Tomado de Luna, 2012.

Los valores admisibles se encuentran entre 0,10 y 0,40 Mpa; los valores obtenidos en los ensayos de flexión, para ladrillos aligerados a partir de colas de minería aurífera y residuos agroindustriales (yuca y arroz), se encuentran entre 0,33 y 1,71 Mpa, por lo tanto, la adición de residuos mejoró significativamente el desempeño de las probetas en el ensayo de flexión. El porcentaje de residuo con mejor desempeño en el ensayo de flexión es 5% en todas las adiciones, donde 1.71 es el mayor valor de módulo de rotura presentado por la muestra con adición de 5% de cascara de yuca.

La Figura 30 muestra imágenes de las probetas después del ensayo de flexión donde se observa el plano de falla de los ladrillos.

Figura 30. muestras después de ensayo de flexión



5.6 INMERSIÓN EN SOLUCIONES.

Este ensayo se realizó con el objetivo de someter el ladrillo a condiciones extremas, para observar si presenta afectaciones al permanecer en ambientes ácidos o salinos; en el momento de introducir las muestras en las soluciones se observó la producción de burbujas, las cuales no son producto de efervescencia que se haya generado por disolución de la muestra, sino por la liberación del aire que se encontraba en los poros de la probeta.

Las muestras fueron retiradas de las soluciones y se tomaron las medidas tablas 7, 8, 9 y 10; los datos registrados evidencian un aumento de peso, pero no de las dimensiones de los ladrillos, esto significa que una cantidad de la solución penetra en la muestra y permanece en el espacio poroso.

Tabla 7. Mediciones de las muestras antes del proceso de inmersión en solución ácida

Ladrillo	5R2	5T2	10Y3	5A1
Peso (g)	206	188	166	188
Largo (cm)	10,3	10,4	0,4	10,5
Ancho (cm)	2,3	2,3	2,3	2,4
Alto (cm)	4,4	4,5	4,7	4,5
Volumen (cm³)	104,2	107,64	112,42	113,4

Tabla 8. Mediciones de las muestras después del proceso de inmersión en solución ácida.

Ladrillo	5R2	5T2	10Y3	5A1
Peso (g)	232	218	206	224
Largo (cm)	10,3	10,4	10,4	10,5
Ancho (cm)	2,3	2,3	2,3	2,4
Alto (cm)	4,4	4,5	4,7	4,5
Volumen (cm³)	101,2	107,64	112,42	113,4

Tabla 9. Mediciones de las muestras antes del proceso de inmersión en solución salina.

Ladrillo	5A3	10Y1	5R1	5T3
Peso (g)	196	168	214	204
Largo (cm)	10,4	10,6	10,3	10,5
Ancho (cm)	2,5	2,4	2,5	2,5
Alto (cm)	4,5	4,5	4,5	4,5
Volumen (cm³)	117	114,48	115,87	118,13

Tabla 10: Mediciones de las muestras después del proceso de inmersión en solución ácida.

Ladrillo	5A3	10Y1	5R1	5T3
Peso (g)	234	208	244	240
Largo (cm)	10,4	10,6	10,3	10,5
Ancho (cm)	2,5	2,4	2,5	2,5
Alto (cm)	4,5	4,5	4,5	4,5
Volumen (cm³)	117	114,48	115,87	118,13

Figura 31. imágenes de los ladrillos ser retirados de las soluciones, 5 minutos, 24 horas y 15 días después.

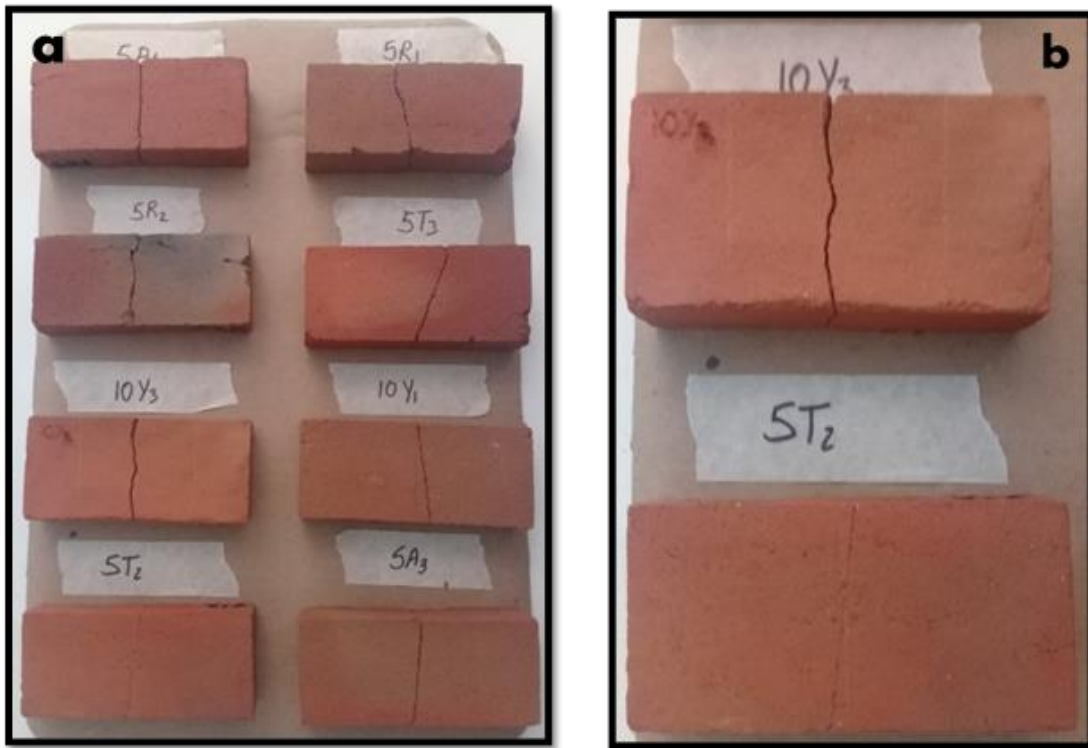
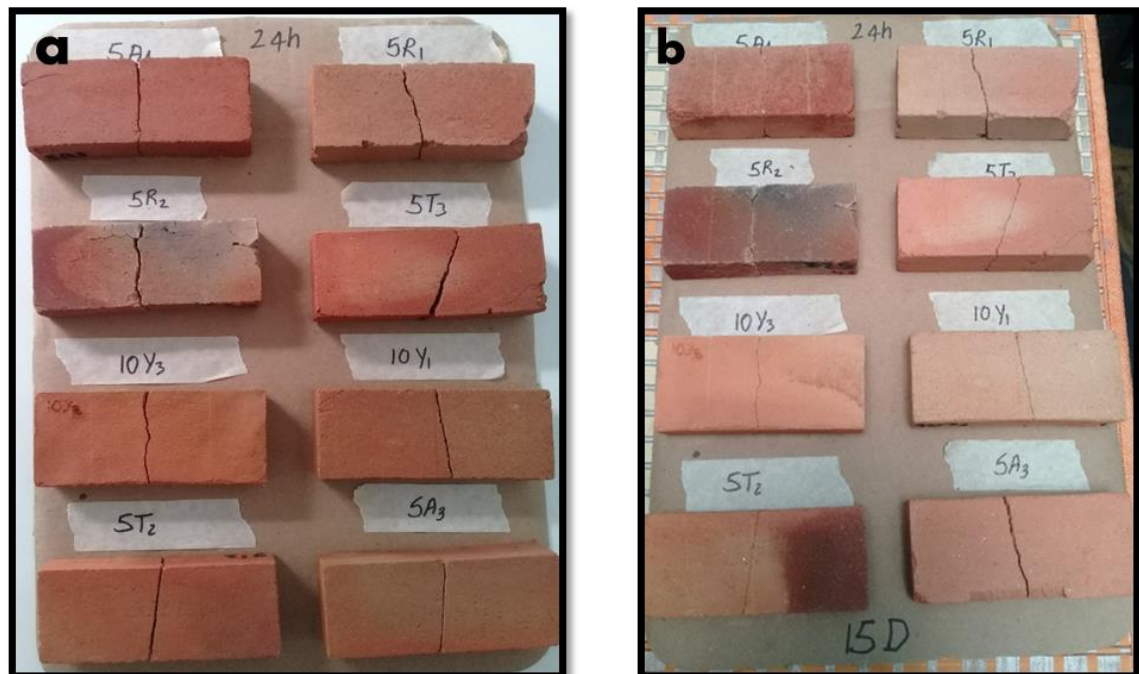


Figura 32. muestras después de ser retiradas de las soluciones.



Las muestras ubicadas en el lado izquierdo en la Figura 32 corresponden a las sumergidas en solución ácida, mientras las ubicadas a la derecha son las que estuvieron inmersas en solución salina. Después de ser retiradas de las soluciones las muestras permanecieron a temperatura ambiente en acopio.

La eflorescencia es una especie de desgaste en la superficie del ladrillo, el cual se evidencia como salpicaduras o por el desarrollo de manchas de color blanco; se clasifica en tres categorías eflorescido, ligeramente eflorescido y no eflorescido, la figura 28 representa de derecha a izquierda un ejemplo de dicha categorización.

Figura 33. Ejemplo de categorías de eflorescencia



Fuente: Tomado de Luna, 2014.

Las muestras sumergidas en soluciones no presentan desarrollo de manchas o picaduras de color blanco, por lo tanto, no presentan eflorescencia, sin embargo, después de las 24 horas de ser retirados los ladrillos que estuvieron inmersos en solución ácida, empezaron a desarrollar oscurecimiento y manchas de superficie como se evidencia en la imagen tomada transcurridos 15 días, hasta llegar a cambios de color muy notables como la muestra 5R2. Por otro lado, las muestras que fueron sumergidas en solución salina no presentan cambios, ni afectaciones que se puedan evidenciar con facilidad, o que se consideren notables.

6. CONCLUSIONES

- Es posible obtener reducciones significativas en el peso de los ladrillos adicionando residuos agroindustriales, debido a que durante el proceso de cocción induce una porosidad que permite el aligeramiento de las unidades.
- No es recomendable adicionar residuo de minería aurífera a la mezcla para elaboración de ladrillos, puesto que no se logra un aligeramiento significativo y se reduce la resistencia mecánica en las muestras con adición de este residuo; sin embargo, los resultados obtenidos se encuentran dentro de los límites admisibles.
- El porcentaje de residuos añadidos a la mezcla no debe ser superior al 10%, debido a que para valores mayores se reduce la resistencia a la compresión y a la flexión de forma sustancial.
- La adición de los residuos utilizados en este trabajo investigativo a los materiales de construcción genera una posible solución para la reutilización de desechos que están ocasionando impactos ambientales negativos.
- Los ladrillos con adición de residuos de minería aurífera y agroindustriales (cascara de yuca y arroz), son resistentes bajo las condiciones presentadas en medio ácido y salino.
- El aligeramiento de los ladrillos con adición de residuos puede implicar reducción en los costos de construcciones, debido a que se requeriría menor cantidad de ladrillos y estructuras más livianas para soportar la estructura.

- La adición de residuos de cascara de yuca y arroz es favorable desde el punto de vista energético, debido a que la combustión del contenido orgánico produce un aumento adicional de la temperatura.

7. RECOMENDACIONES

- Desarrollar convenio con empresa fabricante de ladrillos, con el fin de elaborar las muestras con las adiciones estudiadas en este proyecto con mayor grado de tecnificación y tecnología, usando maquinaria especializada como hornos, galleteras, amasadoras, cortadoras, secadoras, etc.
- Realizar estudio de viabilidad económica y determinar posibles zonas favorables, en las cuales sea factible en cuanto a la obtención de materia prima y cercanía a zonas de distribución y comercialización, de ladrillos aligerados con los aditivos utilizados en este proyecto investigativo.
- Continuar desarrollando investigaciones para la implementación de nuevos residuos como aditivos, para la pasta convencional usada en la fabricación de ladrillos u otros materiales de construcción, que contribuyan al desarrollo sostenible y puedan aportar soluciones para mitigar impactos ambientales negativos.

BIBLIOGRAFIA

ABDUL, Aeslina; MOHAJERANI, Abbas; RODDICK, Felicity, and BUCKERIDGE, John. Density, strength, thermal conductivity and leachate characteristics of light weight fired clay bricks incorporating cigarette butts. *International Journal of Environmental Science and Engineering*. 2010, 179-184 p.

ALBIS, Alberto; MARTÍNEZ, Jader; SEVERICHE, María; GARCÍA, José. Remoción de plomo de soluciones acuosas usando cáscara de yuca modificada con ácido cítrico. 2016.

BAR, Nora. Un desarrollo tecnológico del Conicet, diario La Nación. Recuperado de <http://www.lanacion.com.ar/849741-ya-se-pueden-construir-casas-con-ladrillos-de-plastico-y-cemento>.

CDMB, Documento de Diagnóstico Amenazas de Inundación y Erosión en el Río de Oro. Vol. 1, cap. 6 (2005).

CHIANG, Kung-Yuh; CHOU, Ping-Huai; HUA, Ching-Rou., CHIEN, Kuang-Li and CHESSEMAN, Chris. Lightweight-bricks manufactured from water treatment sludge and rice husks. *Journal of Hazardous Material*. 2009, 76-82 p.

CLAVIJO, Jairo; ROYERO, José María. Mapa Geológico Generalizado de Santander. Memorias Explicativas. (2001).

CULTRONE, Giuseppe; SEBASTIÁN, Eduardo. Fly ash addition in clayey materials to improve the quality of solid bricks. *Construction and Building Materials*. Vol. 23, 2009, 1178-1184 p.

DANE- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Insumos y factores asociados a la producción agropecuaria. Bboletín 46, 2016, 1-10 p.

DE PORTA, Jaime. Lexique Stratigraphique International. Centre National Recherche Scientifique. Volume V. fascicule 4b, París, 1974, 692 p.

DONDI, Micheli., GUARINI, Guia; CHIARA, Zanelli. Recycling PC and TV waste glass in clay bricks and roof tiles. Waste Management. Vol. 29, 2009, 1945-1951p.

ESCUADERO, Carlos; FIOI, Nuria; POCH, Jordi; VILLAESCUSA, Isabel. Modeling of Kinetics of Cr(VI) Sorption On to Grape Stalk Waste in a Stirred Batch Reactor. J. Hazard Mater. Vol. 170 (1), 2009, 286-291.

EL-MAHLLAWY, Medhat. Characteristics of acid resisting bricks made from quarry residues and waste steel slag. Construction and Building Materials. Vol. 22, 2008, 1887-1896 p.

GUETO, Juan. Tecnología de los materiales cerámicos. Ediciones Diaz de Santos. Comunidad de Madrid, consejería de educación. 2005, 400p.

HETTNER, Alfred. Die Kordillere von Bogotá, Gotha, Patermans Mitteil. Vol. 22, 1892, 131 p.

HUBACH, Enrique. Mina de Carbón de "Chía" en el Páramo del Almorzadero (Santander). Servicio Geológico Nacional. Informe 809, Bogotá 1951, 3p.

INGEOMINAS; zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga. Bogotá D.C. 2001.

LAGUNA, María. Ladrillo ecológico como material sostenible para la construcción. Proyecto de grado. Escuela Técnica superior de Ingenieros Agrónomos. Departamento de proyectos e ingeniería rural. 2011, 1-117 p.

LUNA, Lisset; RÍOS, Carlos; QUINTERO, Luz. Recycling of agroindustrial solid wastes as additives in brick manufacturing for development of sustainable construction materials. DYNA, Vol. 81, número 188, 2014, 34-41 p.

LUNA, Lisset., Efecto del uso de residuos agroindustriales en las propiedades tecnológicas de los ladrillos, Tesis Universidad Industrial de Santander, 2014.

MORAES; Acácio. Portal El Paralex. Noticias de Arquitectura. <http://www.elparalex.com/ladrillos-ecologicos-de-yuca/>

NORMA TECNICA COLOMBIANA NTC 4017.Método para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla.

NORMA TECNICA COLOMBIANA NTC 4205.Unidades de mampostería de arcilla cocida, ladrillos y bloques cerámicos.

PHONPHUAK, Nonthaphong. Effects of organic residues on physical and mechanical properties of fired clay brick. Science and Engineering Symposium 4th International Science, Social Science, Engineering and Energy Conference. 2012, 479-485 p.

PORTAL EL PARALEX. Noticias de Arquitectura. www.elparalex.com/ladrillos-ecologicos-de-yuca/

RAHMAN, Abdur. Properties of clay-sand-rice huskashmixedbricks. Department of Civil Engineering, University of Ife, Ile-Ife, Nigeria. Vol. 23, Number 1, 1987, 10p

REVERTÉ, Pedro. La industria ladrillera: moldeado manual y mecánico de los ladrillos, secaderos y hornos modernos. 3º edición. Buenos Aires: Gustavo Gili, 1979. 339p.

ROBUSTE, Eloy. Técnica y práctica de la industria ladrillera. [Anónimo]. 5º edición. Barcelona: Industrias Gersa, 1969. 209p.

TONNAYOPAS, Danupon; PERAPONG, Tekasakul.; SARAWUT, Jaritgnam. Effects of Rice Husk Ash on Characteristics of Lightweight Clay Brick. Technology and Innovation for Sustainable Development Conference (TISD2008). Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Thailand. 2008, 39-36p.

ROJAS, Lyda.; VIEJO, Fernando. Obtención y caracterización de materiales compactados a partir de cáscara de yuca para la fabricación de tableros de partículas. Revista Colombiana de Materiales, Vol.5, 2013,158-163p.

SARKAR, Ritwik., SINGH, Nar; KUMAR, Swapan. Effect of addition of pond ash and fly ash on properties of ash-clay burnt bricks. Waste Management Research. Vol. 25, 2007, 566-571 p.

SHIH, Pai-Haung, WU, Zong-Zheng; CHIANG, Hung-Lung. Characteristics of bricks made from waste steel slag. Waste Management. Vol.24, 2004, 1043-1047p.

TEJADA, Candelaria; MONTIEL, Zaida; ACEVEDO, Diofanor. Aprovechamiento de Cáscaras de Yuca y Ñame para el Tratamiento de Aguas Residuales Contaminadas con Pb (II), Información tecnológica, Vol. 27, 2017, 09-20p.

WARD, Dwight. Recursos minerales de parte de los departamentos de Norte de Santander. INGEOMINAS. Boletín Geológico. Volumen XVIII, No. 3, 1970, 1-140 p.

ANEXOS

Anexo A. Dimensiones y peso de las muestras antes del proceso de quema.

TIPO	Largo (cms)	Ancho (cms)	Alto (cms)	Peso (grs)	TIPO	Largo (cms)	Ancho (cms)	Alto (cms)	Peso (grs)
O1	10,5	4,5	2,5	228,31	15Y4	10,4	4,7	2,4	181,85
O2	10,5	4,6	2,4	216,50	15Y5	10,2	4,7	2,4	190,60
O3	10,2	4,5	2,4	222,24	15Y6	10,3	4,5	2,4	175,81
O4	10,2	4,5	2,4	212,71	5R1	10,7	4,7	2,5	230,61
O5	10,3	4,5	2,3	211,55	5R2	10,7	4,6	2,5	220,26
O6	10,3	4,4	2,3	210,11	5R3	10,2	4,5	2,5	225,91
5A1	10,6	4,6	2,4	204,32	5R4	10,3	4,6	2,4	215,67
5A2	10,7	4,6	2,4	213,81	5R5	10,4	4,6	2,4	213,41
5A3	10,4	4,5	2,5	220,19	5R6	10,4	4,5	2,4	209,75
5A4	10,4	4,4	2,4	203,78	10R1	10,8	4,7	2,4	215,92
5A5	10,3	4,4	2,4	195,88	10R2	10,7	4,6	2,5	220,56
5A6	10,4	4,5	2,4	203,90	10R3	10,3	4,6	2,5	227,99
10A1	10,7	4,7	2,5	219,22	10R4	10,3	4,6	2,4	218,23
10A2	10,8	4,7	2,5	206,84	10R5	10,4	4,7	2,3	212,59
10A3	10,5	4,5	2,5	210,21	10R6	10,3	4,7	2,4	215,15
10A4	10,5	4,5	2,4	202,63	15R1	10,6	4,6	2,4	217,92
10A5	10,5	4,5	2,3	199,00	15R2	10,7	4,7	2,5	240,04
10A6	10,5	4,5	2,4	201,53	15R3	10,3	4,6	2,5	229,15
15A1	10,6	4,6	2,4	169,98	15R4	10,3	4,6	2,4	232,39
15A2	10,7	4,7	2,5	172,64	15R5	10,3	4,6	2,4	224,89
15A3	10,4	4,5	2,4	191,63	15R6	10,3	4,5	2,4	224,93
15A4	10,4	4,6	2,3	182,69	5T1	10,7	4,7	2,4	214,40
15A5	10,5	4,6	2,3	181,14	5T2	10,6	4,7	2,5	209,17
15A6	10,5	4,5	2,4	179,56	5T3	10,4	4,6	2,5	225,46
5Y1	10,6	4,7	2,4	207,48	5T4	10,4	4,6	2,4	210,80
5Y2	10,6	4,6	2,5	217,48	5T5	10,4	4,5	2,3	204,59
5Y3	10,7	4,7	2,3	215,26	5T6	10,3	4,5	2,4	203,86
5Y4	10,5	4,7	2,3	216,82	10T1	10,8	4,6	2,5	177,22
5Y5	10,6	4,7	2,4	215,81	10T2	10,7	4,6	2,4	180,66
5Y6	10,5	4,7	2,3	205,59	10T3	10,4	4,6	2,5	221,11
10Y1	10,8	4,6	2,4	202,86	10T4	10,4	4,5	2,5	209,16
10Y2	10,7	4,6	2,4	196,76	10T5	10,5	4,5	2,4	204,18
10Y3	10,4	4,8	2,3	200,99	10T6	10,5	4,5	2,5	207,23
10Y4	10,3	4,7	2,3	205,11	15T1	10,1	4,7	2,3	189,70
10Y5	10,3	4,8	2,3	199,46	15T2	10,2	4,8	2,3	193,06
10Y6	10,4	4,6	2,3	191,74	15T3	10,2	4,7	2,4	191,35
15Y1	10,6	4,7	2,5	156,81	15T4	10,3	4,5	2,3	184,12
15Y2	10,6	4,6	2,4	154,57	15T5	10,3	4,8	2,3	183,81
15Y3	10,3	4,7	2,4	188,67	15T6	10,2	4,7	2,3	186,69

Anexo B. Dimensiones y peso de las muestras después del proceso de horneado.

TIPO	Largo (cms)	Ancho (cms)	Alto (cms)	Peso (grs)	TIPO	Largo (cms)	Ancho (cms)	Alto (cms)	Peso (grs)
O1	10,1	4,5	2,5	212,66	15Y4	10,2	4,7	2,3	141,44
O2	10,2	4,4	2,4	202,08	15Y5	10,2	4,7	2,4	146,78
O3	10,1	4,6	2,5	207,45	15Y6	10,3	4,6	2,4	137,25
O4	10,2	4,5	2,3	198,83	5R1	10,3	4,4	2,5	215,58
O5	10,3	4,5	2,3	197,58	5R2	10,3	4,4	2,4	206,83
O6	10,3	4,4	2,3	196,28	5R3	10,2	4,6	2,5	213,01
5A1	10,4	4,5	2,3	187,72	5R4	10,3	4,6	2,4	203,23
5A2	10,4	4,4	2,4	179,28	5R5	10,3	4,6	2,4	201,58
5A3	10,4	4,6	2,5	194,61	5R6	10,3	4,6	2,4	197,47
5A4	10,4	4,5	2,4	180,19	10R1	10,3	4,4	2,4	203,20
5A5	10,4	4,4	2,3	175,18	10R2	10,3	4,4	2,3	208,57
5A6	10,5	4,5	2,4	180,32	10R3	10,2	4,5	2,5	218,16
10A1	10,6	4,6	2,4	171,41	10R4	10,3	4,6	2,4	207,30
10A2	10,5	4,6	2,5	181,41	10R5	10,3	4,6	2,4	201,42
10A3	10,5	4,5	2,5	175,16	10R6	10,3	4,6	2,4	203,20
10A4	10,5	4,6	2,4	168,96	15R1	10,4	4,4	2,3	204,11
10A5	10,5	4,5	2,4	165,73	15R2	10,3	4,5	2,4	224,77
10A6	10,4	4,5	2,5	168,10	15R3	10,3	4,6	2,5	223,01
15A1	10,6	4,5	2,3	125,89	15R4	10,2	4,7	2,4	204,77
15A2	10,5	4,5	2,4	127,67	15R5	10,3	4,6	2,3	205,71
15A3	10,4	4,5	2,5	150,22	15R6	10,3	4,5	2,4	195,34
15A4	10,4	4,5	2,4	143,17	5T1	10,3	4,5	2,4	178,24
15A5	10,5	4,5	2,4	143,00	5T2	10,3	4,4	2,3	188,25
15A6	10,5	4,5	2,4	141,05	5T3	10,4	4,6	2,5	204,14
5Y1	10,3	4,5	2,3	185,54	5T4	10,4	4,6	2,4	191,25
5Y2	10,4	4,5	2,5	193,54	5T5	10,4	4,6	2,4	184,87
5Y3	10,4	4,7	2,3	189,20	5T6	10,4	4,5	2,5	184,27
5Y4	10,5	4,8	2,3	191,07	10T1	10,3	4,4	2,3	152,53
5Y5	10,6	4,8	2,3	191,17	10T2	10,3	4,4	2,3	156,50
5Y6	10,6	4,7	2,3	181,84	10T3	10,4	4,6	2,5	192,55
10Y1	10,4	4,5	2,4	168,39	10T4	10,4	4,5	2,4	182,28
10Y2	10,5	4,5	2,3	163,28	10T5	10,5	4,5	2,4	177,91
10Y3	10,4	4,8	2,3	165,78	10T6	10,5	4,5	2,4	181,77
10Y4	10,3	4,8	2,3	169,33	15T1	10,2	4,8	2,3	157,67
10Y5	10,3	4,8	2,4	164,98	15T2	10,1	4,7	2,3	160,66
10Y6	10,4	4,6	2,3	158,22	15T3	10,1	4,7	2,3	159,30
15Y1	10,2	4,4	2,2	120,55	15T4	10,1	4,6	2,3	153,22
15Y2	10,2	4,3	2,3	121,74	15T5	10,2	4,7	2,3	155,50
15Y3	10,3	4,8	2,3	143,87	15T6	10,2	4,7	2,3	158,60

Anexo C. Resultados y cálculos de ensayo de compresión

TIPO	AREA	CARGA	RESISTENCIA	DEFORMACIÓN
	(cm ²)	(KN)	(kg/cm ²)	(mm/mm)
O4	45,9	15,5625	34,5731	0,0195
O5	46,35	17,1604	37,7529	0,0211
O6	45,32	16,4976	37,1196	0,0201
5A4	46,8	10,3465	22,5433	0,0155
5A5	45,76	9,8105	21,8614	0,0167
5A6	47,25	10,8984	23,5197	0,0141
10A4	48,3	7,7184	16,2950	0,0104
10A5	47,24	7,7910	16,8136	0,0126
10A6	46,8	6,9769	15,2015	0,0192
15A4	46,8	3,5458	7,7258	0,0097
15A5	47,25	3,2086	6,9246	0,0134
15A6	47,25	3,2682	7,0531	0,0314
5Y4	50,4	11,8360	23,9467	0,0318
5Y5	50,88	12,4484	24,9481	0,0223
5Y6	49,82	11,0098	22,5345	0,0168
10Y4	49,44	8,4473	17,4225	0,0139
10Y5	49,44	8,7982	18,1463	0,0240
10Y6	47,84	8,1786	17,4326	0,0124
15Y4	47,94	5,2824	11,2358	0,0230
15Y5	47,94	4,0434	8,6004	0,0106
15Y6	47,38	4,1331	8,8951	0,0256
5R4	47,38	15,5549	33,4770	0,0236
5R5	47,38	16,5549	35,6291	0,0202
5R6	47,38	14,7541	31,7533	0,0179
10R4	47,38	12,6885	27,3080	0,0177
10R5	47,38	13,0945	28,1817	0,0190
10R6	47,38	12,9860	27,9481	0,0195
15R4	47,94	11,7894	25,0765	0,0142
15R5	47,38	12,4792	26,8575	0,0168
15R6	46,35	12,1682	26,7700	0,0167
5T4	47,84	9,7449	20,7710	0,0130
5T5	47,84	11,1786	23,8270	0,0164
5T6	46,8	11,6716	25,4306	0,0177
10T4	46,8	9,6559	21,0387	0,0089
10T5	47,25	9,3862	20,2563	0,0101
10T6	47,25	8,8535	19,1067	0,0151
15T4	46,46	5,5548	12,1917	0,0354
15T5	47,94	5,4495647	11,5914	0,0213
15T6	47,94	4,8327309	10,2794	0,0279

Anexo D. Resultados y cálculos ensayo de flexión

TIPO	CARGA (P) kg	DISTANCIA(L) cm	LARGO(b) cm	ALTURA(h) cm	MODULO kg/cm ²
O1	32,3178	5,1	10,1	2,5	3,916534
O2	27,8574	5,2	10,2	2,4	3,6983852
O3	31,4216	5,1	10,1	2,5	3,8079211
5A1	128,1205	5,4	10,4	2,3	18,86317
5A2	119,9626	5,4	10,4	2,4	16,220905
5A3	115,5555	5,4	10,4	2,5	14,399988
10A1	89,6385	5,6	10,6	2,4	12,332344
10A2	92,4265	5,5	10,5	2,5	11,619327
10A3	99,4923	5,5	10,5	2,5	12,507605
15A1	55,1828	5,6	10,6	2,3	8,2664993
15A2	60,3536	5,5	10,5	2,4	8,2327586
15A3	52,3426	5,4	10,4	2,5	6,5226922
5Y1	120,1481	5,3	10,3	2,3	17,530366
5Y2	124,1286	5,4	10,4	2,5	15,468329
5Y3	131,4260	5,4	10,4	2,3	19,349838
10Y1	74,0969	5,4	10,4	2,4	10,019113
10Y2	71,9116	5,5	10,5	2,3	10,680906
10Y3	75,8061	5,4	10,4	2,3	11,16093
15Y1	29,0177	5,2	10,2	2,2	4,5847102
15Y2	29,3915	5,2	10,2	2,3	4,2487373
15Y3	28,9023	5,3	10,3	2,3	4,2170227
5R1	46,6635	5,3	10,3	2,5	5,7627189
5R2	43,7906	5,3	10,3	2,4	5,8679799
5R3	47,6941	5,2	10,2	2,5	5,8355149
10R1	30,8469	5,3	10,3	2,4	4,1335078
10R2	34,5245	5,3	10,3	2,3	5,0373402
10R3	34,2989	5,2	10,2	2,5	4,196571
15R1	29,7710	5,4	10,4	2,3	4,3831741
15R2	21,5452	5,3	10,3	2,4	2,8870746
15R3	23,2312	5,3	10,3	2,5	2,8689353
5T1	54,0779	5,3	10,3	2,4	7,2464875
5T2	78,7358	5,3	10,3	2,3	11,488049
5T3	53,1383	5,4	10,4	2,5	6,6218555
10T1	39,4190	5,3	10,3	2,3	5,751478
10T2	38,9896	5,3	10,3	2,3	5,6888285
10T3	37,3170	5,4	10,4	2,5	4,6502737
15T1	26,8617	5,2	10,2	2,3	3,8830498
15T2	28,8196	5,1	10,1	2,3	4,1264115
15T3	24,6029	5,1	10,1	2,3	3,5226561