

**ELABORACIÓN DE LADRILLOS INCORPORANDO COMO MATERIA PRIMA
VIDRIO RECICLADO Y CENIZAS DE BIOSÓLIDO DE LA PTAR EL
SALITRE**

PRESENTADO POR

**ALEYRA ALEXANDRA AYALA NAVAS
ANGELA ROCIO LAGOS PIRAJAN**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**



**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE TUNJA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
TUNJA
2018**

**ELABORACIÓN DE LADRILLOS INCORPORANDO COMO MATERIA PRIMA
VIDRIO RECICLADO Y CENIZAS DE BIOSÓLIDO DE LA PTAR EL SALITRE**

PRESENTADO POR

**ALEYRA ALEXANDRA AYALA NAVAS
ANGELA ROCIO LAGOS PIRAJAN**

DIRECTOR

MSc. WILLIAM RICARDO MOZO MORENO



**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE TUNJA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
TUNJA
2018**

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Tunja, febrero de 2018

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado en primer lugar a Dios y la virgencita María porque siempre están presentes en mi vida y todo es gracias a ellos. A mi familia, quienes me han brindado apoyo en este escalón de mi vida, a pesar de los inconvenientes que ocurrieron en esta etapa me ayudaron a salir adelante, con su ejemplo, dedicación y buenos valores brindados desde mi infancia. A mí voz de aliento en estos últimos años de universidad, quien me enseñó con mucha paciencia a ver la vida de otra forma y ser mejor persona a ti mi niña gracias por creer en mí. A mi compañera de universidad y amiga de vida, gracias por estos 5 años, por hacer parte de este paso y por tus consejos.

Aleyra Alexandra Ayala Navas.

Dedico a Dios en primera instancia por permitirme cumplir este sueño tan anhelado, a la memoria de mi hermano Carlos y de mi padre Agapito, mis dos ángeles que desde el cielo me dan la fortaleza para salir adelante, a mi madre Anita, a Marlencita por ser ese apoyo incondicional durante mi proceso de formación. A mis hermanos Amanda, Elena y Andrés por estar presente en los momentos más importantes de mi vida. A mi Ñoña como le digo de cariño, gracias por ser tan linda y especial conmigo y sobre todo por ofrecerme su amistad incondicional durante estos años “Lo logramos ñoña”. Y por último dedico este logro a David quien me acompañó en todo momento, brindándome su apoyo y cariño.

Ángela Rocío Lagos Pirajan.

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo le agradecemos a Dios por darnos la oportunidad, sabiduría y entendimiento para realizar nuestro proyecto de grado.

A nuestro director de tesis, MSc. WILLIAM RICARDO MOZO MORENO por su colaboración y dedicación, quien con sus conocimientos y experiencia fue indispensable para esta investigación.

A la UNIVERSIDAD SANTO TOMAS TUNJA por darnos la oportunidad de estudiar y ampliar nuestros conocimientos para ser excelentes profesionales, apoyándonos de forma constante en la investigación.

A la ingeniera LAURA GARAVITO por su colaboración y asesoría en la investigación.

A los laboratoristas de la Facultad de Ingeniería Civil JOSE, FREDY Y FERNANDO por su colaboración durante el desarrollo de la investigación.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	17
1. ESTADO DEL ARTE.....	21
2. MARCO TEÓRICO.....	30
2.1 BIOSÓLIDO.....	30
2.1.1 Características de los biosólidos.	31
2.1.2 Clasificación de los biosólidos.	32
2.1.3 Caracterización química del Biosólido.....	33
2.2 CERÁMICA.....	34
2.2.1 Definición.....	34
2.2.2 Clasificación.	34
2.3 MATERIAS PRIMAS.....	35
2.3.1 Materias primas plásticas.....	37
2.3.2 Materias primas no plásticas	38
2.4 COMPOSICIÓN DE LA PASTA	40
2.5 SECADO	41
2.5.1 Humedad eliminada durante el secado.....	42
2.5.2 Mecanismos y cinética del secado.	43
2.5.3 La curva de Bigot.....	43
2.5.4 Cocción.....	44
2.6 UNIDADES DE MAMPOSTERÍA DE ARCILLA COCIDA	46
2.6.1 Tipos de unidades de mampostería.....	47
2.6.2 Clasificación.....	48
2.7 PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS UNIDADES DE MAMPOSTERÍA NTC 4205.....	49
2.7.1 Tasa Inicial de la absorción de agua.....	49
2.7.2 Absorción de agua.....	49
2.7.3 Resistencia mecánica a la compresión.	50
2.8 VIDRIO	51
2.8.1 GENERALIDADES.....	51

2.8.2 Clasificación y componentes.....	51
2.8.3 Fabricación.....	52
2.8.4 Propiedades.....	54
2.8.5 Usos y aplicaciones.....	54
2.8.6 Reciclaje y reutilización del vidrio.....	55
2.8.7 Reutilización del vidrio.....	55
2.8.8 Disposición final controlada.....	56
3. METODOLOGÍA.....	57
3.1 Recolección de las materias primas: Ceniza de biosólido, arcilla y vidrio.....	57
3.1.1 Suministro de materias primas.....	57
3.1.2 Recolección de la ceniza biosólido.....	57
3.1.3 Recolección de la arcilla.....	58
3.1.4 Recolección del Vidrio.....	58
3.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS.....	60
3.2.1 Granulometría.....	61
3.2.2 Caracterización de los diferentes materiales (Arcilla – ceniza de biosólido – vidrio).....	61
3.2.3 Plasticidad.....	61
3.2.4 Contracción en crudo y quema.....	63
3.3 DISEÑO EXPERIMENTAL.....	63
3.4 PREPARACIÓN DE LA PASTA.....	64
3.4.1 Molienda.....	64
3.4.2 Biosólido cenizas.....	65
3.4.3 Tamizado.....	65
3.4.4 Dosificación Arcilla – vidrio - cenizade biosólido.....	65
3.4.5 Dosificación del agua.....	65
3.4.6 Mezclado.....	66
3.4.7 Conformado.....	67
3.5 SECADO.....	68
3.5.1 Determinación de curvas de Bigot.....	68
3.6 COCCIÓN.....	69

3.6.1 Determinación de curva de cocción..	69
3.7 CALIDAD DE LOS LADRILLOS	70
3.7.1 Tasa inicial de absorción.	70
3.7.2 Absorción de agua.	70
3.7.3 Resistencia a la Compresión.....	71
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	72
4.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERÍA PRIMA.....	72
4.1.1 Caracterización del biosólido.	72
4.1.2 Caracterización física de la arcilla.....	75
4.1.3 Caracterización de los diferentes materiales (Arcilla – ceniza de biosólido – vidrio).....	77
4.2 DETERMINACIÓN HUMEDAD ÓPTIMA DE COMPACTACIÓN.....	84
4.3 SECADO	84
4.3.1 Curvas de Bigot (Contracción en el secado)..	85
4.4 COCCION	87
4.5 DENSIDAD APARENTE DE LOS LADRILLOS COCIDOS	88
4.6 PÉRDIDA DE PESO DURANTE LA COCCIÓN	91
4.6.1 Porcentaje de ceniza de biosólido 0%.	91
4.6.2 Porcentaje de vidrio 0%.	91
4.7 CONTRACCIÓN LINEAL EN LOS ELEMENTOS FABRICADOS.....	93
4.8 EVALUACIÓN TÉCNICA DE LA CALIDAD DE LOS LADRILLOS	96
4.8.1 Tasa inicial de absorción..	96
4.8.2 Resistencia a la compresión.....	98
4.8.3 Absorción de agua.....	101
4.9 Microscopía electrónica de barrido	103
4.9.1 Análisis SEM para el elemento con mejores propiedades.....	104
CONCLUSIONES	107
BIBLIOGRAFÍA.....	109

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Valores máximos permisibles, biosólida categoría A y B.	33
Tabla 2. Tasa Inicial de absorción.....	49
Tabla 3. Propiedades físicas de las unidades de mampostería estructural	50
Tabla 4. Propiedades físicas de las unidades de mampostería no estructural	50
Tabla 5. Clasificación general de vidrios según su composición.....	52
Tabla 6. Composición de los vidrios comerciales (los números indican el porcentaje)	53
Tabla 7. Intervalos de composición frecuentes en los vidrios comunes	54
Tabla 8. Diseño Experimental.....	64
Tabla 9. Comparación con la norma EPA 503.13.....	72
Tabla 10. Contenido de finos en el biosólido.....	74
Tabla 11. Resumen: Valores promedio de Sólidos totales, Sólidos Volátiles y Humedad..	75
Tabla 12. Distribución granulométrica de la arcilla.....	75
Tabla 13. Caracterización química materias primas	77
Tabla 14. Propiedades físicas de las materias primas	80
Tabla 15. Composiciones mineralógicas detectadas en las muestras de materias primas ...	80
Tabla 16. Fases Cristalinas Identificadas en la ceniza de bisolido	82
Tabla 17. Punto de humedad crítico.....	86
Tabla 18. Densidad de ladrillos cocidos	89
Tabla 19. Pérdida de peso por cocción.....	93
Tabla 20. Contracción en la cocción	94
Tabla 21. Valores de tasa inicial de absorción	96
Tabla 22. Tiempos recomendados de pre-humedecimiento NTC 4205.....	97
Tabla 23. Resistencia a la compresión	98
Tabla 24. Absorción de agua.....	101
Tabla 25. Caracterización química de la mezcla Espectro 1.....	104
Tabla 26. Caracterización química de la mezcla Espectro 2.....	104

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Concentraciones promedio de metales pesados en el biosólido.....	73
Gráfica 2. Curva granulométrica para la arcilla	76
Gráfica 3. Diagrama de Casagrande.....	78
Gráfica 4. Índice de plasticidad para 0% CB	79
Gráfica 5. Índice de plasticidad para 0% V.....	79
Gráfica 6. Curvas de Bigot.....	86
Gráfica 7. Curvas de cocción seleccionadas	88
Gráfica 8. Densidad de ladrillos cocidos para 0% CB	89
Gráfica 9. Densidad de ladrillos cocidos para 0% V	90
Gráfica 10. Pérdida de peso 0% CB.....	91
Gráfica 11. Pérdida de peso 0% V	91
Gráfica 12. Pérdida de peso 10% CB.....	92
Gráfica 13. Pérdida de peso 10% V	92
Gráfica 14. Pérdida de peso 20% CB.....	92
Gráfica 15. Pérdida de peso 20% V	92
Gráfica 16. Contracción 1050 °C.....	94
Gráfica 17. Contracción 1000 °C.....	95
Gráfica 18. Contracción 950 °C.....	95
Gráfica 19, Tasa Inicial de Absorción.....	97
Gráfica 20. Resistencia a la compresión 950 °C	99
Gráfica 21. Resistencia a la compresión 1000 °C	100
Gráfica 22. Resistencia a la compresión 1050 °C.....	100
Gráfica 23. Absorción de agua en la mezclas propuestas – mampostería no estructural...	102
Gráfica 24. Absorción de agua en la mezclas propuestas – mampostería estructural.....	103

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Rango composicional admitido para la fabricación de cerámica estructural	41
Figura 2. Curva de Bigot.....	44
Figura 3. Curva de secado Crítico.....	45
Figura 4. Unidades de mampostería de perforación vertical.....	47
Figura 5. Unidades de mampostería de perforación horizontal	47
Figura 6. Unidades de mampostería de macizas	48
Figura 7. Diagrama para la fabricación de vidrio.	53
Figura 8. Plano diseño molde.....	67
Figura 9. Figura Curva de cocción.....	69
Figura 10. Curva de cocción 2	69
Figura 11. Triangulo textural biosólido	74
Figura 12. Triangulo textural arcilla	76
Figura 13. Análisis comparativo por difracción de rayos-X de las fases identificadas en la ceniza de biosólido.....	83
Figura 14. Fisuras en elementos - secado 80 °C	85
Figura 15. Secado 60 °C	85
Figura 16. Curva de cocción 1 vs Curva de cocción 2.....	87
Figura 17. Spectro 1	105
Figura 18. Spectro 2.....	105

LISTA DE IMAGENES

	Pág.
Imagen 1. Localización Ladrillera El Oasis	57
Imagen 2. PTAR EL SALITRE	57
Imagen 3. Distribución del muestreo de Arcilla	59
Imagen 4. Trituración del vidrio.	60
Imagen 5. Tamizado del vidrio	60
Imagen 6. Ensayo de granulometría por hidrómetro.....	61
Imagen 7. Ensayo Límites.....	63
Imagen 8. Máquina de los ángeles	65
Imagen 9. Biosólido seco	65
Imagen 10. Tamiz N°20.....	66
Imagen 11. Dosificación arcilla – vidrio – ceniza de biosólido.....	66
Imagen 12. Mezclado de la pasta cerámica.....	66
Imagen 13. Prensado de la pasta cerámica.....	68
Imagen 14. Ladrillo conformado.....	68
Imagen 15. Secado en horno	68
Imagen 16. Ubicación del ladrillo.....	70
Imagen 17. Prueba de nivel.....	70
Imagen 18. Absorción de agua.....	70
Imagen 19. Elemento puesto en servicio.....	70
Imagen 20. Exudación del vidrio para 20% T 1050°C	91
Imagen 21.Exudación del vidrio para 10% T 950°C	91
Imagen 22. Microscopia electrónica, Espectro 1.	106
Imagen 23. Microscopia electrónica, Espectro 2.	106

GLOSARIO

ABSORCIÓN: El término absorción indica la acción de absorber. No obstante, se emplea principalmente para referirse a la retención de una sustancia por las moléculas que posee otra, bien sea en estado líquido o gaseoso.

AGUAS RESIDUALES: Se consideran aguas residuales a los líquidos que han sido utilizados en las actividades diarias de una ciudad (domésticas, comerciales, industriales y de servicios).

ARCILLA: Es un mineral procedente de la descomposición de rocas ígneas contiene Feldespato, como el granito, se presenta en terrenos llamados estratificados generalmente en capas muy regulares. “La arcilla es una sustancia mineral plástica compuesta principalmente de silicatos de aluminio hidratados”.

BIOSÓLIDOS: Los biosólidos son un producto originado después de un proceso de estabilización de lodos orgánicos provenientes del tratamiento de las aguas residuales. La estabilización se realiza para reducir su nivel de patogenicidad, su poder de fermentación y su capacidad de atracción de vectores.

CERÁMICA: Es un producto elaborado con arcilla, amasado con el agua, secado al aire y consolidado por el calor.

COCCIÓN: La cocción es la fase culminante del proceso cerámico y consiste en una serie de modificaciones físicas y reacciones químicas que endurecen y consolidan la pasta cerámica, aportándole propiedades nuevas.

CONFORMADO: El objetivo principal del conformado es dar forma y consistencia a la masa de polvos que dé lugar a un aumento de la densidad y, por lo tanto, a una mejora de las propiedades mecánicas.

CONTRACCIÓN: la contracción o retracción lineal se define como la disminución de longitud que experimenta la probeta después de la cocción.

DESGRASANTES: Materiales arenosos que reducen la excesiva plasticidad de algunas arcillas, ya que no retienen agua y disminuyen su adherencia al estar húmedas. La retracción es menor al secarse la pasta.

DOSIFICACIÓN: Implica establecer las proporciones apropiadas de los materiales que componen el ladrillo.

FUNDENTES: Se añaden a la pasta para reducir la temperatura de cocción ya que bajan el punto de fusión del material, abaratando costos y permitiendo la parcial vitrificación de las piezas.

LADRILLO: Es toda pieza, generalmente ortoédrica, obtenida por moldeo, secado y cocción a temperatura elevada de una pasta arcillosa, que se utiliza en construcción.

MEZCLA: Una mezcla es la combinación física de dos o más sustancias que retienen sus identidades y que se mezclan pudiendo formar según el caso aleaciones, soluciones, suspensiones y coloides.

MOLIENDA: En el proceso de molienda se realiza la trituración de la arcilla sin tratar que provenga directamente de la cantera, y se obtiene la materia prima con la granulometría y textura necesarias para su posterior conformado.

PASTA CERÁMICA: Mezcla de materias primas que dará lugar, tras ser sometida al proceso de fabricación adecuado, al cuerpo del producto cerámico.

PLASTICIDAD: es quizás la propiedad de la arcilla que más interesa en la fabricación de materiales cerámicos y se define como la propiedad del suelo al agregarle agua de formar una masa suave y manejable; una vez cocida a una determinada temperatura, pierde esta propiedad.

PTAR: Es una planta de tratamiento de aguas residuales. El tratamiento de aguas residuales (o agua residual doméstica) incorpora procesos físicos, químicos y biológicos los cuales tratan y remueven contaminantes físicos, químicos y biológicos del uso humano cotidiano del agua.

RECICLAJE: Es una práctica eco-amigable que consiste en obtener una nueva materia prima o producto, mediante un proceso fisicoquímico o mecánico, a partir de productos y materiales ya en desuso o utilizados. De esta forma, conseguimos alargar el ciclo de vida de un producto, ahorrando materiales y beneficiando al medio ambiente al generar menos residuos.

RESIDUO SOLIDO: Se define como cualquier objeto o material de desecho que se produce tras la fabricación, transformación o utilización de bienes de consumo y que se abandona después de ser utilizado. Estos residuos sólidos son susceptibles o no de aprovechamiento o transformación para darle otra utilidad o uso directo.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN: La resistencia a la compresión es el máximo esfuerzo de compresión que un material es capaz de desarrollar.

SECADO: Consiste en exponer la pieza húmeda a la acción de una corriente de aire caliente y seco, con la finalidad de eliminar por evaporación superficial el líquido que contiene.

SINTERIZACIÓN: Es el tratamiento térmico de un polvo o compactado metálico o cerámico a una temperatura inferior a la de fusión de la mezcla, para aumentar la resistencia mecánica de la pieza, ya que se ha aumentado el tamaño de grano.

TAMIZADO: Es uno de los métodos de separación de mezclas, el cual consiste que mediante un tamiz, zarandas o cernidores (redes de mallas más o menos gruesas o finas) se separan partículas sólidas según su tamaño.

TEMPERATURA: La Temperatura es una magnitud que mide el nivel térmico o el calor que un cuerpo posee. Toda sustancia en determinado estado de agregación (sólido, líquido o gas), está constituida por moléculas que se encuentran en continuo movimiento.

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES: Consiste en una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que tienen como fin eliminar los contaminantes físicos, químicos y biológicos presentes en el agua efluente del uso humano.

VIDRIO: Disolución sólida de varios silicatos de sodio, calcio, plomo, etc. obtenidos por fusión a elevada temperatura. Una vez enfriada la masa adquiere el estado amorfo, es dura, transparente o traslúcida, frágil y resistente mecánica y químicamente.

RESUMEN

La cantidad de biosólido generado por las actividades de depuración del agua residual crece día a día, debido a las políticas de manejo de aguas residuales y descontaminación de cuerpos de agua propuestas en nuestro país; las cuales fomentan la construcción de nuevas estaciones de tratamiento o la ampliación de las ya existentes.

Los subproductos (lodos, biosólidos) del tratamiento de las aguas residuales generan un problema ambiental debido a las concentraciones de metales pesados y los lixiviados que pueden generar en su disposición final. De ahí la necesidad de hacer un aprovechamiento que pueda beneficiar al medio ambiente.

El objetivo general de este proyecto fue evaluar el efecto que tiene el incorporar vidrio reciclado y ceniza de biosólido a una pasta cerámica (arcilla – agua) sobre las propiedades mecánicas para la fabricación de ladrillo macizo. Para cumplir con el objetivo, se desarrolló un plan de trabajo basado en 3 actividades: 1. Caracterización química, mineralógica y física de las materias primas para la fabricación de los ladrillos (arcilla – ceniza de biosólido - vidrio); 2. Elaboración de los elementos cerámicos teniendo en cuenta los resultados de la caracterización de las materias primas y una serie de tratamientos experimentales propuestos con base en factores como en los porcentajes de incorporación de la ceniza de biosólido y el vidrio, y la temperatura de cocción. 3. Evaluación de la calidad de los elementos obtenidos teniendo en cuenta lo establecido en la Norma Técnica Colombiana NTC 4205 (unidades de mampostería de arcilla cocida, ladrillos y bloques cerámicos), a través de ensayos de resistencia a la compresión, absorción de agua y tasa inicial de absorción.

De los resultados obtenidos en la investigación se lograron establecer valores adecuados para variables críticas dentro del proceso de fabricación de los ladrillos, tales como: el porcentaje de inclusión de la ceniza de biosólido, el porcentaje de inclusión de vidrio y la temperatura de secado y cocción.

Palabras claves: biosólido, vidrio, resistencia a la compresión, ladrillo, mampostería.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día la protección del medioambiente lleva implícita las palabras "recuperación" y/o "reciclado". Los países industrializados son grandes productores de desechos que no se pueden destruir de una manera sencilla y rápida. Los altos costos de eliminación de residuos obligan a los gobiernos a tomar medidas encaminadas a minimizar esos residuos y reducir su dependencia de las materias primas¹.

En esta investigación se evaluó la alternativa de incluir residuos sólidos como materia prima para la fabricación de materiales de construcción comunes y muy utilizados como son los ladrillos macizos. Los residuos a utilizar dentro de la pasta cerámica para fabricar el ladrillo son: vidrio reciclado y ceniza de biosólido (La ceniza de biosólido incluida dentro de la pasta cerámica, es un material producto de la quema de biosólido procedente de la PTAR EL SALITRE de la ciudad de Bogotá). Estos materiales fueron seleccionados con base en resultados obtenidos de investigaciones anteriores²³; respecto a la ceniza se pudo comprobar que se obtienen elementos que cumplen con los requisitos de resistencia a la compresión exigidos en la NTC 4205, pero se deben mejorar propiedades como la tasa inicial de absorción y la absorción de agua. Por esto, se propuso incluir el vidrio reciclado como una posible solución al exceso de porosidad que se presentó en las investigaciones ya referenciadas.

Las industrias y las ciudades están en la obligación de tratar sus residuos líquidos y esto ha incrementado la cantidad de subproductos generados en estos procesos. La selección de la PTAR tiene su fundamento en: la cantidad de biosólido que actualmente está generando (4500 TON de biosólido al mes⁴), la ampliación del caudal de tratamiento de 4 a 8 m³/s, la implementación de la segunda fase con tratamiento secundario, la disminución en la oferta de los lugares de disposición normal, temporal o de emergencia y las acciones futuras planeadas para el saneamiento del río Bogotá como la puesta en marcha de la PTAR CANOAS para el tratamiento de las aguas provenientes de las cuencas Fucha y Tunjuelo con una capacidad de 18 m³/s son algunas de las razones que hacen necesaria la investigación y propuesta de alternativas para la valorización y adecuada disposición de este tipo de residuos⁵.

¹ Gonzalez, M., Ponce, P. (2012). Use of waste glass in the manufacture of clay bricks. *Iberoamericana de las ciencias biológicas y agropecuarias*, 1(2), 14-4.

² Mozo, W. (2014). *Valorización de biosólido de ptar en la fabricación de ladrillos*. (Tesis de Maestría). Universidad Pedagógica y tecnológica de Colombia, Tunja.

³ Guzman, L. Rubio, L. (2015). *Elaboración de ladrillos ecológicos incorporando como materia prima biosólido de ptar*. (Tesis de Pregrado). Universidad Santo Tomas, Tunja.

⁴ Gestión de subproductos [online]. Bogotá Colombia. PTAR El Salitre. [citado 20 octubre 2017].]. Disponible en: <<http://www.acueducto.com.co>>

⁵ PTAR SALITRE FASE I. Planta de tratamiento de aguas residuales [online]. [citado 20 octubre 2017]. Disponible en: <http://www.acueducto.com.co/wpsv61/wps/html/resources/PTAR/plegable_general.pdf>

La disposición del biosólido en rellenos sanitarios es una práctica común que podría generar un problema serio, que tiene su explicación en el alto contenido de nitrógeno presente en el biosólido; que al no ser absorbido por las plantas puede ser fácilmente lixiviado y movilizado pudiendo generar eutroficación y contaminación por nitratos en mantos acuíferos⁶. La presencia de nitratos en el agua para uso humano implica un riesgo en la salud, sobre todo para los infantes⁷.

Algunos ejemplos de problemas ambientales que se podrían generar por una inadecuada gestión de los subproductos del tratamiento a las aguas residuales: contaminación de las aguas superficiales por escorrentía, contaminación de las aguas subterráneas (acuíferos) por lixiviación, la contaminación de los suelos por un elevado contenido de metales pesados, la presencia de olores desagradables y problemas de salud pública.

El vidrio es un producto inorgánico que nace de la mezcla y fusión a altas temperaturas de arena, soda, dolomita, feldespato, agregados menores y casco (vidrio reciclado), que al solidificarse se vuelve rígido, pero sin que se produzca cristalización. Además, es una sustancia amorfa y se halla en un estado vítreo en el que las unidades moleculares, aunque están dispuestas de forma desordenada, tienen suficiente cohesión para presentar rigidez mecánica⁸.

El vidrio usado en la investigación proviene de botellas de vidrio industriales recicladas, este es un tipo de vidrio (sódico – cálcico) que está formado por sílice, sodio y calcio principalmente. La sílice es parte de la materia prima básica, el sodio le da cierta facilidad de fusión y el calcio la provee de estabilidad química.⁹ La recolección del material proviene de la generación de residuos de la cafetería de la universidad Santo Tomás seccional Tunja, para su utilización se realizó una limpieza y molienda con el fin de homogenizar tamaños respecto a las otras dos materias primas arcilla y cenizas de biosólido.

Aunque el reciclado y uso de vidrio de desecho reviste gran importancia en aspectos tales como el ambiental y el económico, la revisión bibliográfica llevada a cabo permitió establecer que es un campo poco explorado y los trabajos enfocados al desarrollo de elementos cerámicos como los ladrillos, basados en la mezcla de arcillas y vidrio son muy pocos. Por lo tanto, esta es un área de oportunidad para la generación de nuevo conocimiento científico y tecnológico para la producción de elementos de construcción a partir de desechos.

Esta investigación está encaminada a evaluar el efecto que tiene el incorporar vidrio

⁶ Facultad de ciencias químicas. Universidad Autónoma de Chihuahua. Manejo de sólidos residuales o biosólidos. [Online]. [Citado 12 Diciembre 2017]. En internet: < <http://www.oocities.org/edrochac/residuales/biosolidos9.pdf>>

⁷ Facultad de ciencias químicas. Universidad Autónoma de Chihuahua. Manejo de sólidos residuales o biosólidos. [Online]. [Citado 12 Diciembre 2017]. En internet: <<http://www.oocities.org/edrochac/residuales/biosolidos9.pdf>>

⁸ Fernandez, J.M, (2003), *El vidrio*. Madrid, España: Consejo Superior de Investigaciones Científicas Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. Tercera edición.

⁹ Ibid, p., 12.

reciclado y ceniza de biosólido a una pasta cerámica (arcilla – agua) sobre las propiedades mecánicas para la fabricación de ladrillos macizos, con base en indicadores establecidos en las normas técnicas colombianas para este tipo de elementos (NTC 4205: Ingeniería Civil y Arquitectura. Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos).

Para cumplir con el objetivo de la investigación se plantearon y desarrollaron los siguientes objetivos específicos:

- Establecer las propiedades físicas, químicas y mineralógicas de las materias primas usadas para la fabricación de los ladrillos: ceniza de biosólido, vidrio reciclado, arcilla.
- Establecer los parámetros para el proceso de fabricación de los ladrillos en sus tres etapas: preparación de la pasta, conformado y tratamiento térmico (secado y cocción).
- Determinar las propiedades de resistencia a la compresión, absorción de agua y tasa inicial de absorción de los ladrillos, teniendo en cuenta los lineamientos establecidos en las normas técnicas: NTC 4205 (Ingeniería Civil y Arquitectura. Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos) y NTC 4017 (Ingeniería Civil y Arquitectura. Métodos de muestreo y ensayos de unidades de mampostería de arcilla).
- Determinar las condiciones adecuadas de fabricación de los ladrillos relacionadas con las variables: temperatura de cocción, (%) de adición de ceniza de biosólido, % de adición de vidrio reciclado. Condiciones que serán establecidas en función de los resultados obtenidos en las pruebas de: resistencia a la compresión, absorción de agua y tasa inicial de absorción.

La metodología empleada en la investigación consistió en una recolección de información relacionada con: los métodos de caracterización de materias primas (Normas, ensayos), métodos o procesos para la elaboración de ladrillos; características que deben cumplir los elementos cerámicos (Normas técnicas) y antecedentes relacionados con la aplicación de este tipo de material o de materiales con características similares, en la fabricación de ladrillos.

Posterior a la labor de recolección de la información secundaria se realizó el muestreo de las materias primas para la fabricación de los ladrillos; la arcilla fue recolectada en la fábrica de ladrillos EL OASIS localizada en cercanías al municipio de Oicatá en el departamento de Boyacá. Las muestras de biosólido fueron obtenidas de la PTAR EL SALITRE localizada en Bogotá y recolectadas usando la técnica de muestreo desde bandas transportadoras; el tratamiento para obtener las cenizas del biosólido se llevó a cabo en un horno colmena para la elaboración de elementos cerámicos en el municipio de Ráquira – Boyacá. La recolección del vidrio se realizó en las instalaciones de la universidad Santo Tomás Seccional Tunja Sede Campus; se seleccionaron los envases transparentes de jugos o sustancias líquidas consumidas por los estudiantes de la institución mencionada.

Seguido del muestreo se llevó a cabo la caracterización de las materias primas, para lo cual se realizó un análisis químico por medio de la técnica de fluorescencia de rayos X; un análisis mineralógico usando la difracción de rayos X y como complemento a esta caracterización se realizó un análisis físico, el cual comprendió el análisis granulométrico o de tamaño de partículas, análisis de plasticidad.

Se realizó un análisis de microscopia electrónica de barrido (SEM) donde se escoge la mezcla con los mejores resultados de la evaluación técnica (70% Arcilla – 10% Ceniza de biosólido y 20% Vidrio), para obtener información morfológica del elemento cerámico produciendo imágenes de alta resolución.

Con base en los resultados obtenidos de la etapa de caracterización de las materias primas, se procedió a la elaboración de los elementos cerámicos. En esta fase se aplicó un diseño experimental que contemplaba dos variables críticas en el proceso de fabricación de los ladrillos; la primera de ellas es el porcentaje de inclusión de las materias primas ceniza de biosólido y vidrio reciclado y la segunda la temperatura de cocción.

Para el porcentaje de inclusión de la ceniza de biosólido (CB) y el vidrio (V) reciclado se propusieron combinaciones de (0-10-20) % de cada material en remplazo de la arcilla y para la temperatura de cocción se establecieron valores de (950-1000-1050) °C. En total se elaboraron 270 especímenes cerámicos.

Dentro de los propósitos que tiene la investigación se encuentran: el aprovechamiento de los residuos (biosólido, vidrio), la prevención de una contaminación futura, la disminución de la cantidad del residuo destinada a los vertederos, la disminución en la demanda de áreas para la disposición y la generación de una alternativa más de aprovechamiento en el programa de gestión de la PTAR; alternativa que le permitiría a la planta prevenir un posible almacenamiento del biosólido.

1. ESTADO DEL ARTE

La incorporación de los subproductos del tratamiento a las aguas residuales (Biosólido) y elementos reciclables (Vidrio), como materiales agregados para la fabricación de elementos cerámicos tradicionales como los ladrillos, han demostrado ser una alternativa viable desde los puntos de vista técnico y ambiental; diferentes investigaciones han venido ratificando esta idea y la postulan como una alternativa viable para dar solución a una problemática ambiental.

La inclusión de residuos de diferentes tipos como materia prima para la fabricación de ladrillos es algo que se ha venido investigando y se ha llevado a cabo en diferentes lugares del planeta. Residuos como la cascarilla de arroz, las cenizas de la cascarilla de arroz, el bagazo, vidrio, lodos provenientes del tratamiento de las aguas residuales, cenizas de diferentes tipos y composiciones, aserrín, tabaco y pasto [(Weng & Lin, 2003)¹⁰, (Lin & Weng, 2001)¹¹, (Maciulaitis et al., 2008)¹², (Cultrone et al., 2004)¹³, (Demir, 2007)¹⁴, (UMAÑA & ROMERO R. 2001)¹⁵]; son algunos de los residuos a los cuales se les pretende dar un valor agregado incorporándolos como materia prima en elementos de construcción.

(Vorrada et al., 2009)¹⁶ Investigan la inclusión de residuos de como materia prima para la fabricación de ladrillos y contemplan dos variables dentro del proceso: la temperatura de cocción y el porcentaje de vidrio dentro de la mezcla. Dentro de los resultados obtenidos se puede destacar: que el vidrio genera un aumento en la porosidad de los ladrillos por ende un incremento en la absorción inicial de agua, cuya explicación es la exudación del vidrio hacia la superficie y la consecuente generación de poros abiertos; que la temperatura óptima para la cocción de los ladrillos es de 1100 °C, y que es posible elaborar elementos

¹⁰ WENG Chih –Huang, Lin Deng-Fong, CHIANG pen-chi. Utilization of sludge as brick materials. *Advances in Environmental Research* 7 (2003). p 679-685. Disponible en: www.elsevier.com/locate/aer

¹¹ LIN, Deng-Fong y WENG, Chih-Huang. Use of sewage ash as brick material. *En: Journal of Environmental Engineering*. Octubre, 2001, Vol. 127, no 10.

¹² MACIULAITIS Romualdas, MALAIŠKIEN Jurgita, KICAIT Asta. The regulation of physical and mechanical parameters of ceramic bricks depending on the drying regime. *Journal of civil engineering and management*. 2008. p 263-268.

¹³CARDENAS. Carolina, SEBASTIAN. Eduardo, ELERT. Kerstin, DE LA TORRE. María José, CAZALA. Olga, RODRIGUEZ N. Carlos. Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks. *Journal of the European Ceramic Society*. 2004. p 547-564.

¹⁴ DEMIR, Ismail. Effect of organic residues addition on the technological properties of clays bricks. *En: Waste Management*. Mayo, 2007, no 28, p. 622-627.

¹⁵ UMAÑA P., Francy Yolima y ROMERO R., Jairo A. Fabricación de ladrillos a partir de lodos secos. *En: revista colombiana de ingeniería*. Julio – Septiembre, 2001, no. 43. p 26-30.

¹⁶ Loryuenyong, V., Panyachai, T., Kaewsimork, K., y Siritai, C. (2009). Effects of recycled glass substitution on the physical and mechanical properties of clay bricks. *In Waste Management*, 29(10), 2717-2721. Disponible en: (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X09002062>)

de calidad con inclusiones hasta de un 30% del residuo. Sin embargo, a medida que el residuo incrementa su porcentaje en la mezcla se disminuye la resistencia a la compresión de los ladrillos¹⁷.

(Liane, Wilfrid & Samuel, 2015)¹⁸, llevaron a cabo una investigación sobre la fabricación de ladrillos con la inclusión de residuos sólidos industriales generados por una planta de tratamiento de aguas, provenientes de una fabrica de pulpa. En la investigación se realiza una evaluación con tres diferentes tipos de residuos sólidos (heces, sémola y lodo de cal), evaluando la distribución de tamaño de grano de los residuos y las proporciones de calcio, sodio, y óxidos de potasio en las mezclas, esta evaluación se hizo con una temperatura de cocción de 850, 950 y 1050°C a fin de obtener fases cristalinas y mejorar las propiedades mecánicas de los ladrillos.

Dentro de los resultados obtenidos se puede concluir que la porosidad generada en los ladrillos esta en función de la temperatura de cocción, a mayor temperatura se presentaba un tamaño de poro mas grande. La temperatura óptima de cocción es de 1000°C con un porcentaje de inclusión hasta 30% en su peso, obteniendo resistencias mayores a la del ladrillo común, un incremento de temperatura disminuye la capacidad de absorción de agua, por lo tanto aumentando la resistencia a la interperie.

(Cheeseman, Sollars, &, McEntee 2011)¹⁹, el objetivo principal de la investigación fue implementar el uso de ceniza de lodos, de una planta de aguas residuales en Reino Unido como materia prima en nuevos productos cerámicos, evaluando el efecto de sinterización en la composición química de los elementos finales.

Como resultados se obtuvo que los elementos de menor densidad eran producidos por una cocción mayor a 1040°C con una apariencia vidriosa en la superficie. Por otro lado se observa claramente que las muestras presentaban un volumen significativo de poros, por lo general entre 20 a 30 μm de diámetro. Esta porosidad se cree que se forma por la descomposición de residuos inorgánicos presentes en el biosólido. En los resultados de TCLP (Toxicity characteristic leaching procedure) se evidencia para todos los metales que el proceso de sinterización reduce la lixiviación en la ceniza de biosólido, esto se refleja en los datos de absorción de agua; durante la sinterización hay una contracción asociada a las

¹⁷ Loryuenyong, V., Panyachai, T., Kaewsimork, K., y Siritai, C. (2009). Effects of recycled glass substitution on the physical and mechanical properties of clay bricks. *In Waste Management*, 29(10), 2717-2721. Disponible en: (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X09002062>)

¹⁸ A. Benlalla, M. Elmoussaouiti, M. Dahhou, M. Assafi. (2015). Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics bricks. *In Applied Clay Science*, 118, 171-177. Disponible en: (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169131715301204>)

¹⁹ Cheeseman, C., Sollars, C., y McEntee, S. (2011). Properties microstructure and leaching of sintered sewage sludge ash. *In Resources, Conservation and Recycling*, 40(1), 13-25. Disponible en: (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344903000223>).

variables de temperatura y presión de prensado, donde confirma que los valores más bajos se producen a temperaturas más altas y mayores presiones de prensado.

La pérdida por ignición en la ceniza de biosólido dio consistentemente pérdidas de peso de alrededor de 1,3% donde se cree que es debido a la oxidación y volatilización de residuos de carbono orgánico presente en la ceniza²⁰.

(Cristian et al., 2008)²¹, su investigación consistió en la evaluación de la potencialidad del uso de biosólidos originado en las plantas de tratamiento de aguas servidas en la fabricación de ladrillos. La etapa central de esta investigación consistió en elaborar pruebas de laboratorio, donde se aplicaron determinadas mezclas entre los biosólidos y arcillas para la fabricación de probetas rectangulares. Estas mezclas consistieron en adiciones de (7%,11%,15%) de biosólido sobre el peso de una probeta.

Cabe resaltar que estos ladrillos fueron sometidos a pruebas de caracterización de toxicidad por lixiviación (TCLP); las cuales mostraron que el nivel de lixiviación de metales es bajo en estos elementos cerámicos. Como conclusión se obtuvo que la utilización de biosólidos en la fabricación de ladrillos es técnicamente factible.

(Nonthaphong, Siwadol & Prinya, 2016)²², evalúan la viabilidad de la inclusión de residuos de vidrio con el fin de mejorar las propiedades mecánicas de ladrillos de arcilla roja, reduciendo la temperatura de cocción. Para lo cual proponen fabricar elementos con concentraciones de (0,5 y 10) % en peso, utilizando temperaturas de cocción de 900, 950 y 1000°C. Los investigadores evaluaron los ladrillos respecto a la resistencia a la compresión, absorción de agua, densidad y porosidad de los elementos y análisis de la microestructura.

Relacionado con la calidad de los elementos obtenidos; en las pruebas de resistencia a la compresión mostraron que esta aumenta a medida que la temperatura de cocción sube, debido a una disminución de la porosidad y aumento de la densidad. El estudio demostró que la porosidad más baja se produjo cuando se añadió el porcentaje más alto de residuos de vidrio. La mejora de la resistencia a la compresión se debe a que la adición de vidrio contribuye a la vitrificación de los ladrillos, al cerrar los poros internos con la fase vítrea, especialmente a altas temperaturas de cocción, donde el vidrio se funde y se fusiona con los cuerpos de arcilla, dando una mayor densidad.

²⁰ Cheeseman, C., Sollars, C., y McEntee, S. (2011). Properties microstructure and leaching of sintered sewage sludge ash. In *Resources, Conservation and Recycling*, 40(1), 13-25. Disponible en: (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344903000223>).

²¹ Navarro C; Corvalán D; Quiroz E; Contreras S. (2008). Evaluación de la potencialidad del uso de biosólidos originados en las plantas de tratamiento de aguas servidas en la fabricación de ladrillos. *Revista residuos*, 108. 46-53.

²² O. Phonphuak, S. Kanyakam, P. Chindapasirt. (2016). Utilization of waste glass to enhance physical mechanical properties of fired clay brick. In *Journal of Cleaner Production*, 112 (4), 3057-3062. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615015553>

Según la difracción de rayos x se mostró que a medida que el contenido de vidrio aumentaba, la adición de residuos de vidrio facilitó la transformación de fase vítrea en los cuerpos de arcilla, la incorporación de vidrio reduce aproximadamente en un 10% el cuarzo cristalino, permitiendo una mayor densidad del ladrillo (Nonthaphong, Siwadol & Prinya, 2016).

Según la investigación la adición de vidrio como materia prima para la elaboración de ladrillos, es factible manejando el porcentaje de inclusión y la temperatura de cocción²³.

(Teixeira et al., 2011)²⁴, en esta investigación se evaluó la viabilidad de la incorporación de los lodos (L) de los estanques de decantación de una PTAR en la fabricación de ladrillos. Se estudiaron los porcentajes de inclusión de lodos según el tamaño del grano y los efectos de su incorporación. Teniendo en cuenta las normas técnicas brasileñas se pudo concluir que la adición de 10%(L) permite la fabricación de ladrillos sólidos para temperaturas de cocción inferiores a 1000°C; por encima de esta temperatura, llegando máximo hasta un 20%(L) se puede incorporar en la materia prima para la producción de ladrillos y además para la fabricación de tejas.

Se evidencio que la incorporación de lodos aumenta la absorción de agua y disminuye la densidad aparente y resistencia a la flexión. Estos efectos son principalmente debido a la alta concentración (29%) de la materia orgánica en el lodo, lo que aumenta la porosidad de la muestra durante la cocción.

(Chiang et al., 2009)²⁵, desarrollaron su investigación en la utilización de cáscara de arroz y lodo proveniente de plantas de tratamientos de agua residual, para la fabricación de ladrillos ligeros. Para la caracterización de los materiales, evaluaron parámetros tales como, contenido de humedad, composición química (refracción de rayos x), composición mineralógica (difracción de rayos x) y evaluación ambiental a través de (TLCP). Los materiales fueron mezclados con adiciones de cascarilla de arroz de (0, 5, 10, 20, y 25%) en peso.

Como resultados de la investigación se pudo concluir que, la absorción de agua aumentó con el aumento de la relación de la adición de cáscara de arroz. En lo referente a la resistencia a la compresión se demostró que crece con la aumento de la temperatura de cocción y disminuye con el aumento de cascarilla de arroz añadida.

²³ O. Phonphuak, S. Kanyakam, P. Chindaprasirt. (2016). Utilization of waste glass to enhance physical mechanical properties of fired clay brick. *In Journal of Cleaner Production*, 112 (4), 3057-3062. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615015553>

²⁴ Teixeira, S., Santos, G., Souza, A., Alessio, P., S.A, S., & Souza, N. (2011). The effect of incorporation of a Brazilian water treatment plant sludge on the properties of ceramic materials. *Applied Clay Science*, 53(4), 561-565. Disponible en: (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169131711001724>)

²⁵ Chiang K; Chou P; Hua C; Chien K; Cheeseman C. (2009). Lightweight bricks manufactured from water treatment sludge and rice husks. *Journal of Hazardous Materials*, 171. 76–82.

(Vsévolod et al., 2015)²⁶, evaluaron la inclusión de biosólido proveniente del tratamiento de aguas residuales, como componente principal, para la producción de papel, lodos y desechos de vidrio para fabricar cerámicas a temperaturas de sinterización de 700 °, 800 °, 850 °, 900 °, 1000 °, 1050 ° y 1100 ° C.

Las pruebas de resistencia a la flexión de la cerámica obtenidos alcanzados hasta 11,7 MPa, la absorción de agua hasta el 12,6%, densidades aparentes varió de 1.79 a la 1,86 g / cm³, Y la contracción hasta 1,4%. Estas propiedades se pueden atribuir a la sinterización a 700 ° y 1100 ° C de la cerámica con estructuras vítreas y pequeñas inclusiones de nuevos minerales cristalinos, tales como mullita, albita, ortoclasa y nefelina²⁷.

(Maciulaitis et al., 2008)²⁸, en su investigación estudiaron la influencia de diferentes regímenes de secado sobre las propiedades finales de elementos cerámicos (densidad, contracción general, resistencia a la compresión y velocidad de propagación de ultrasonido); para los diferentes regímenes de secado existieron dos fases: secado en laboratorio (al aire libre) y secado en estufa eléctrica a la máxima temperatura.

Del análisis estadístico realizado para la variable densidad del cuerpo cerámico, se pudo establecer que depende del régimen de secado establecido; para lo cual se logran mejores resultados si la etapa de secado se hace en la estufa de forma gradual hasta la máxima temperatura. Esto se debe a que el material es secado mejor y de forma más gradual, el tamaño de poros disminuye y la densidad aumenta.

Las pruebas de resistencia a la compresión demuestran que existe una influencia significativa del tipo de régimen de secado establecido. Para obtener mejores resultados se debe realizar un incremento en la proporción de secado en la estufa y una disminución del secado en laboratorio. Lo anterior con base en que la evaporación más intensiva de la humedad libre y absorbente se da en la fase de secado en la estufa.

La conclusión más significativa del estudio establece que la selección de un régimen adecuado de secado permitirá mejorar las propiedades de los productos cerámicos finales; evidenciándose esto en un aumento de la resistencia a la compresión de hasta un 88,3 % en los especímenes evaluados.

²⁶ Vsévolod, M., Walderson, K., Kirill, A., Rodrigo, E., André, N., Ronaldo, L., y Cezar, A. (2015). Red clay application in the utilization of paper production sludge and scrap glass to fabricate ceramic materials. *In Applied Clay Science*, 107, 28 5. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169131715000484>.

²⁷ Vsévolod, M., Walderson, K., Kirill, A., Rodrigo, E., André, N., Ronaldo, L., y Cezar, A. (2015). Red clay application in the utilization of paper production sludge and scrap glass to fabricate ceramic materials. *In Applied Clay Science*, 107, 28 5. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169131715000484>.

²⁸ Maciulaitis R; Malaiškien J; Kicait A. (2008). The regulation of physical and mechanical parameters of ceramic bricks depending on the drying regime. *Journal of civil engineering and management*. 263-268.

(Deng & Chih, 2005)²⁹. Realizan una investigación sobre la viabilidad de fabricar ladrillos incorporando cenizas de depuradora.

A los lodos se les realizaron ensayos de caracterización físico-químicas básicas, incluyendo el tamaño de las partículas, pH, elementos químicos básicos, densidad y contenido de materia orgánica, donde mediante esto se evaluó la posibilidad de utilizar la ceniza de lodo como material de ladrillo. El lodo fue incinerado en una cámara de combustión a 800°C para eliminar la sustancia orgánica.

Dentro de los resultados obtenidos se encontró que el aumento de la temperatura de cocción y la disminución de la cantidad de cenizas en el ladrillo resultaba en una disminución de la absorción de agua; el porcentaje adecuado de contenido de cenizas para la producción de ladrillos de calidad estuvo en el rango de 20% a 40% en peso con un 13% a 15% de contenido de humedad optima, dichos ladrillos fueron cocidos a temperaturas de 1,000°C durante 6 h, los cuales presentaron una mayor resistencia a la compresión que los ladrillos de arcilla normales. Estos resultados obtenidos de los ensayos indican que la proporción de cenizas y la cocción (temperatura) son dos factores claves que determinan la calidad de los ladrillos³⁰.

(Fernanda et al., 2016)³¹, en esta investigación se hace una revisión del estado del arte acerca del reciclaje de residuos industriales en la fabricación de elementos cerámicos y a su vez se reporta un estudio a nivel de laboratorio con el objetivo de formular cuerpos cerámicos utilizando materias primas alternativas.

De los estudios realizados a nivel de laboratorio se fabricaron ladrillos incluyendo como materia prima vidrio reciclado donde los resultados muestran que la porosidad disminuye con la adición de vidrio generando una mayor compactación del material; a su vez la resistencia a la compresión aumenta obteniendo valores más altos que los valores estándar (12 Mpa) y más alto que el mínimo recomendado para ladrillos de arcilla roja (10 Mpa), los ladrillos que obtuvieron mejores propiedades mecánicas fueron los que tenían 10 y 15% en peso de vidrio.

De los resultados obtenidos en los ensayos de DRX se puede observar que los granos de cristal permanecen incrustados en el centro del elemento cerámico después de la cocción, de lo cual se concluye que el vidrio cumple el papel de relleno en los poros del ladrillo, obteniendo un elemento de mayor densidad.

Está claro cómo el vidrio, que actúa como un inerte en la etapa de secado, permite reducir el encogimiento de la muestra (hasta un 1% menor que la normal de la muestra) dando

²⁹ Deng, F. L., & Chih, H. W. (2005). Use of sewage sludge ash as brick material. *Applied Clay Science*, p 6.

³⁰ Deng, F. L., & Chih, H. W. (2005). Use of sewage sludge ash as brick material. *Applied Clay Science*, p 6.

³¹ Andreola F; Barbieri L; Lancellotti I; Leonelli C; Manfredini T. (2016). Recycling of industrial wastes in ceramic manufacturing: State of art and glass case studies. *In Ceramics International*, 42. 13333-13338.

Disponible en: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.unal.edu.co/science/article/pii/S0272884216308240>

como resultado cambios dimensionales menores del material. A diferencia de arcillas, que tienden a tener un comportamiento plástico y para reducir el tamaño después de la evaporación del agua, el polvo de vidrio en la mezcla de cerámica reduce el encogimiento en la etapa de secado de este modo evita posibles casos de agrietamiento. Este es un resultado importante, ya que una alta reducción de las dimensiones del ladrillo se traduciría en la necesidad de utilizar una mayor cantidad de material con un aumento económico en la fabricación del ladrillo.

(William et al., 2015)³² En la investigación desarrollada se caracterizaron las materias primas (arcilla y biosólido) en cuanto a composición química, fases mineralógicas, comportamiento térmico y características físicas. Se fabricaron ladrillos con hasta un 15 % de inclusión de biosólido en estado seco, de dimensiones estándar según Norma Técnica Colombiana (NTC) 296 y cocidos a temperaturas de 950 °C, 1000 °C y 1050 °C.

En esta investigación se realizaron pruebas de resistencia a la compresión bajo los lineamientos de la NTC 4017, con el fin de evaluar el efecto que sobre esta propiedad tiene la cantidad porcentual de adición del biosólido. Desde el punto de vista ambiental se evaluó la inocuidad de los metales presentes en el biosólido, desarrollando la prueba Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) en ladrillos fabricados con adición del residuo.

Los resultados muestran que la absorción de agua aumenta con el incremento en la adición del biosólido a la pasta cerámica, y disminuye con el aumento en la temperatura, comportamiento directamente ligado a la finalización del proceso de vitrificación y el sellado de los poros abiertos debido a la cocción. La incorporación de biosólido en la pasta cerámica tiene efectos como aumento de la resistencia a la compresión, disminución de la plasticidad, reducción de la contracción en el secado y aumento de la porosidad de los elementos cerámicos.

Los elementos cerámicos elaborados con incorporación de biosólido hasta un 10 %, pueden ser utilizados según la norma NTC 4205, como mampostería no estructural de uso interior para muros de cierre o divisorios que únicamente atiendan a la carga de su propio peso³³.

(Cultrone & Sebastian, 2008)³⁴. Esta investigación evalúa la calidad técnica de un ladrillo macizo incorporando un 5% en peso de cenizas volantes para uso en la restauración de edificios. Los ladrillos se prepararon utilizando dos tipos de materias primas arcillosas y luego fueron cocidos a temperaturas entre 800°C y 1000°C. Las propiedades físicas y mecánicas y la durabilidad de los ladrillos se compararon con las de ladrillos similares sin

³² Mozo, R., Gómez, A., y Camargo, G. (2015). Efecto de la adición de biosólido (seco) a una pasta cerámica sobre la resistencia mecánica de ladrillos. *Ingenierías Universidad de Medellín*, 14(27), 61-68.

³³ Mozo, R., Gómez, A., y Camargo, G. (2015). Efecto de la adición de biosólido (seco) a una pasta cerámica sobre la resistencia mecánica de ladrillos. *Ingenierías Universidad de Medellín*, 14(27), 61-68.

³⁴ Cultrone, G., & Sebastian, E. (2008). Fly ash addition in clayey materials to improve the quality of solid bricks. *Construction and Building Materials*, p 7.

cenizas volantes, a fin de evaluar si la calidad de los ladrillos había sido mejorada o al menos se había mantenido.

Los resultados muestran que la adición de cenizas volantes puede mejorar la calidad del ladrillo, aunque para fines de restauración en la construcción si se añaden demasiadas cenizas volantes mayores a 10% en peso, esto puede estropear la apariencia estética de los edificios al ser restaurada, debido a diferentes colores excesivos, el uso de este aditivo en los ladrillos podría producir un ahorro de costos en materias primas para los fabricantes de ladrillos y servir como un medio eficaz para el reciclaje de un producto de desecho.

(Quesada et al., 2011)³⁵, su investigación de baso en estudiar diversos residuos industriales, tales como lodos de aguas residuales urbanas, bagazo, lodos de la industria cervecera, alpechín, y el residuo de café molido como materias prima en la elaboración de ladrillos. Para la realización de este trabajo se hicieron ensayos tanto a la arcilla como a los residuos los cuales fueron caracterizados por difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X, y análisis termo-gravimétrico.

Los ladrillos se fabricaron a partir de arcilla con dosificaciones de 15% y 5% de lodos. Se hicieron las respectivas mezclas y se prensaron a 54,5 MPa. Después de obtener los ladrillos se realizaron los diferentes ensayos de caracterización como la pérdida de masa en la ignición, contracción lineal, densidad aparente, absorción de agua, resistencia a la compresión, y la conductividad térmica de los ladrillos. Dentro de los resultados se encontró que la absorción de agua aumentó por encima de 35% cuando los lodos de aguas residuales urbanas, lodos industria cervecera y el bagazo se incorporaron en los ladrillos, pero la resistencia a la compresión se redujo en un máximo de 19% y el aislamiento térmico aumento hasta un 8%.³⁶

(Cultrone et al., 2004)³⁷, desarrollaron una investigación sobre la influencia de la mineralogía y la temperatura de cocción sobre la porosidad de los ladrillos. En el estudio se usaron dos tipos de materias primas, una de ellas contenía cantidades notables de carbonatos, con un tamaño de grano por debajo de 1 mm, y la otra era predominantemente cuarzítica y pobre en carbonatos.

Con la investigación se demostró que la presencia o ausencia de carbonatos tenía gran influencia sobre la porosidad de los elementos, textura y propiedades físico mecánicas. Los resultados obtenidos para esta investigación permiten establecer que los carbonatos

³⁵ Quesada, D. E., Martínez, G., ML Martínez, C., Cotes, P., L. Pérez, V., N. Cruz, P., & Corpas, I. (2011). The use of different forms of waste in the manufacture of ceramic bricks. *Applied Clay Science*, p 6.

³⁶ Quesada, D. E., Martínez, G., ML Martínez, C., Cotes, P., L. Pérez, V., N. Cruz, P., & Corpas, I. (2011). The use of different forms of waste in the manufacture of ceramic bricks. *Applied Clay Science*, p 6.

³⁷ Cardenas. C, Sebastian. E, Elert. K, De la torre. María José, C. O, Rodriguez n. C.(2004). Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks. *Journal of the European Ceramic Society*. . p 547-564.

promueven la formación de fisuras y poros de menos de $1\mu\text{m}$ en tamaño cuando los ladrillos son cocidos entre 800°C y 1000°C . Por el contrario la ausencia de carbonatos resulta en una continua reducción en la porosidad. Con esto se puede decir que la porosidad de los ladrillos y su evolución con la temperatura de cocción es un parámetro directamente asociado a la composición mineralógica inicial del material.

Los investigadores establecen que existe una relación proporcional entre la pérdida de peso por ignición y la proporción de lodos en la mezcla. Lo anterior debido a la cantidad de materia orgánica presente en el lodo; material que es eliminado a temperaturas cercanas a los 550°C .

Además de lo anterior, la inclusión de estos lodos como materia prima en la fabricación de ladrillos trae consigo un aumento en el porcentaje de absorción de agua de los elementos; el cual es proporcional a la cantidad de arcilla remplazada por lodo. Este fenómeno tiene sus bases en los constituyentes orgánicos eliminados durante la cocción, generando un mayor porcentaje de poros en los elementos y por ende un incremento en la absorción de agua.

Una de los criterios más importantes para establecer la calidad de los ladrillos y que limita su uso es la resistencia a la compresión; respecto a este criterio en la investigación se encontró que el incluir más del 15% en peso de lodos generaba una reducción drástica en la propiedad y convertía a los ladrillos en un material no apto para el uso estructural. Como valores óptimos se sugieren en esta investigación: sustitución de arcilla por lodo hasta en un 20% y una temperatura de sinterización de 850°C ³⁸.

³⁸ Cardenas. C, Sebastian. E, Elert. K, De la torre. María José, C. O, Rodriguez n. C.(2004). Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks. *Journal of the European Ceramic Society*. . p 547-564.

2. MARCO TEÓRICO

Se realizó una revisión estructurada en tres aspectos relevantes del estudio: la ceniza de biosólido como producto del tratamiento de las aguas residuales, la fabricación del ladrillo (materias primas, composición de la pasta y el proceso de fabricación de los materiales cerámicos) y la incorporación de vidrio reciclado.

2.1 BIOSÓLIDO

Sólido proveniente del tratamiento de aguas residuales municipales, estabilizado biológicamente, con suficiente concentración de nutrientes (mayores y menores), bajo contenido de microorganismos patógenos y presencia permisible de metales pesados, que puede ser usado como fertilizante, acondicionador o mejorador de suelos; usos que dependen de su composición físico-química y la vocación de uso del suelo.

Para realizar una adecuada gestión de estos residuos se deben conocer aspectos tan relevantes como la procedencia, cantidad y características. Aspectos que están relacionados con la calidad y la tasa de flujo de aguas residuales a ser tratadas, la época del año, las características de los sistemas de tratamiento de aguas y los métodos de procesamiento de los lodos (Mahamud & Gutiérrez, 1998).

En el programa de gestión del biosólido implementado en la PTAR el Salitre se contempla el monitoreo periódico de ciertos parámetros que permiten conocer su comportamiento y características físicas, químicas y microbiológicas. Mensualmente se analizan metales pesados en una muestra compuesta de biosólido. Además de lo anterior se realizan muestreos puntuales para el análisis de características físicas, químicas y microbiológicas y se monitorea diariamente el proceso de tratamiento de los lodos³⁹.

Los biosólidos se obtienen por separación de la fase líquida en dos etapas del proceso de depuración convencional⁴⁰:

- En la cadena de decantación primaria, por gravedad se separan parte de las partículas que lleva en suspensión el agua residual a la entrada de la planta.
- En la decantación secundaria se separan del efluente los flóculos de microorganismos formados a partir del licor de mezcla existente en el reactor

³⁹ Biosólido. Acueducto agua y alcantarillado de Bogotá. [online]. [citado 13/12/2017]. Disponible de internet: <<http://www.acueducto.com.co>>

⁴⁰ Mahamud, M., Gutiérrez, A., y Sastre, H. (1996). Biosólidos generados en la depuración del agua. *Ingeniería del agua*, 3(2), 16.

biológico. Una parte se recircula al citado reactor para mantener la biomasa necesaria y el resto se extrae, constituyendo los lodos secundarios.

Existen una serie de investigaciones en torno a la utilización directa de los lodos en la manufactura de materiales de construcción produciendo cementos a partir de mezclas de lodos digeridos con caliza (Tay, 1992), ladrillos a partir de mezclas de arcilla y lodos urbanos estándar (Alleman, 1990), mostrando incluso la posibilidad de utilizar lodos con una notable carga en metales pesados si los estudios de lixiviación que se realicen sobre el producto acabado son satisfactorios.

2.1.1 Características de los biosólidos⁴¹. Dentro de las características más importantes de los biosólidos se encuentran:

- **Nutrientes:** la concentración de los nutrientes en los biosólidos es muy variable dependiendo del tipo de efluente y tratamiento a los cuales sean sometidos.
- **Nitrógeno:** en el biosólido este nutriente se encuentra en forma nítrica (NNO₃), amoniacal (N-NH₄) y orgánica siendo ésta última la más abundante.
- **Fósforo:** Las formas en que se halla el fósforo (P) en el biosólido, dependen de la composición de éste antes de ser tratado y de los procesos a que se halla sometido durante su estabilización, de esta forma se pueden encontrar compuestos orgánicos e inorgánicos, solubles e insolubles.
- **Potasio:** El contenido de potasio (K) en los biosólidos es bajo comparado con el resto de nutrientes.
- **Microorganismos.** Los biosólidos son principalmente biomasa residual, la cual está constituida por una heterogénea y significativa población de microorganismos como bacterias, virus, protozoos y huevos de helmintos, los que se concentran durante el proceso de depuración de las aguas servidas. Sin embargo, el número y tipos de estos organismos varían dependiendo de factores como densidad de población, condiciones sanitarias y tratamientos a los que son sometidos. Algunos de estos tratamientos como digestión aerobia, digestión anaerobia y aireación, reducen significativamente más no eliminan completamente los patógenos.

Entre las bacterias patógenas que pueden estar presentes en los biosólidos se encuentran, por ejemplo, las Salmonellas Typhi (que produce fiebre tifoidea), Escherichia coli (que produce gastroenteritis), Shigellas (que produce disenteria), las Vibrio Cholerae (que producen diarreas extremadamente fuertes o cólera), etc. Entre los protozoos se encuentran la Crytosporidium y la Balantidium Coli (que producen diarrea) y también se pueden encontrar tenías y lombrices intestinales. Entre los virus encontrados en los biosólidos frescos están además, el de la hepatitis A y el de

⁴¹ Mozo, William R. Fabricación de materiales de construcción a partir de biosólido procedente del tratamiento a las aguas residuales. *Universidad Santo Tomas*. Proyecto de Investigación. 2014.

la poliomielitis. Los rotavirus y adenovirus pueden causar infecciones respiratorias y gastrointestinales.

- **Metales pesados.** Están presentes en los biosólidos en cantidades importantes, su procedencia es diversa: doméstica, industrial y comercial.

Es posible encontrar metales como boro, cadmio, cromo, plomo, níquel, mercurio, plata y zinc. Algunos de estos elementos son micronutrientes esenciales requeridos por plantas y animales lo cuales a bajas concentraciones constituyen un aporte nutritivo al suelo, sin embargo, a altas concentraciones pueden ser tóxicos.

La mayoría de los metales se acumulan en la tierra (pudiendo permanecer allí por cientos de años) y las plantas los toman de ella a través de sus raíces. El uso de ciertos productos puede terminar en el aumento de pH de los lodos lo que es deseable muchas veces ya que esta característica se asocia con la disminución de fitodisponibilidad de metales pesados. Existe la posibilidad de que los niveles acumulados sean tan altos que constituyan un peligro para la salud de los animales y personas lo cual puede generar problemas en la cadena trófica, enfermedades y probablemente la muerte de seres vivos.

- **Contaminantes orgánicos.** Los biosólidos pueden contener compuestos orgánicos volátiles (VOC's) como ciclohexano, octano, cloroformo, tetracloroetileno, benceno, xilenos y toluenos. También se encuentran compuestos como hidrocarburos aromáticos (PAH's) y fenoles, además muy altas concentraciones de surfactantes debidos a los detergentes.

2.1.2 Clasificación de los biosólidos.

Según el decreto 1287 de 2014, los biosólidos se clasifican en categoría A y categoría B.

- **Biosólido Clase A:** es aquel sometido a diferentes procesos, con el objetivo de reducir la carga de patógenos por debajo de los límites que signifiquen riesgo para la salud de las personas que tienen contacto con ellos. Este suele llamarse de “calidad excepcional”, donde la densidad presentada en los coliformes fecales debe ser menor a 1000 NMP (número más probable) g de solido total o también la densidad de Salmonella sp. Es menor a 3 NMP /4g de solido total; los virus entéricos deben tener una densidad de menor o igual a 1UFC (Unidad formadora de colonia) /4g de solido total y los huevos viables de helmintos deben ser menor a 1/ 4g de solido total. Estos biosólidos no tienen ninguna restricción para su aplicación en cultivos agrícola y solo es necesario solicitar permiso para avalar la norma.
- **Biosólido Clase B:** es aquel que a pesar de tener una reducción significativa de microorganismos patógenos, no los elimina completamente. Este debe tener una densidad de coliformes fecales inferiores a 2 x NMP/ gramo de solido total. Esta clase

de biosólido debe tener un tratamiento posterior para su estabilización; y son los de mayor restricción para uso en suelos.

2.1.3 Caracterización química del Biosólido. El Decreto 1287 de 2014 establece los criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales⁴². Según la normatividad colombiana, los valores máximos permisibles por categoría, en los parámetros de metales pesados y microbiológicos de los biosólidos generados, y su frecuencia de análisis según la producción se pueden observar en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores máximos permisibles, biosólida categoría A y B.

Parámetro	Variable	Unidad de medida	Valores máximos permisibles	
			Cat. A	Cat. B
Metales pesados	Arsénico (As)	mg / Kg de biosólido (Base seca)	20	40
	Cadmio (Cd)		8	40
	Cobre (Cu)		1000	1750
	Cromo (Cr)		1000	1500
	Mercurio (Hg)		10	20
	Molibdeno (Mb)		18	75
	Niquel (Ni)		80	420
	Plomo (Pb)		300	400
	Selenio (Se)		36	100
	Zinc (Zn)		2000	2800
Microbiológicos	Coliformes Fecales.	Unidades Formadoras de Colonias – UFC / g de biosólido (base seca)	< 1 x 10 ³	< 2 x 10 ³
	Huevos de helmintos viables.	Huevos de helmintos viables / 4g de biosólido (base seca)	< 1	< 10
	Salmonella sp.	Unidades formadoras de Colonias - UFC / en 25 g de biosólido (base seca)	Ausencia	< 1 x 10 ³
	Virus Entéricos.	Unidades Formadoras de Placas -UFP / 4 g de biosólido (base seca)	< 1	-
	Fagos Somáticos.	Unidades formadoras de Colonias – UFC / g de biosólido (base seca)	< 5 x 10 ⁴	-

Fuente: Decreto 1287 de 2014

⁴² Decreto 1287 de 2014, Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.

2.2 CERÁMICA

2.2.1 Definición. El término “cerámica” proviene de la palabra griega “Keramikos”, que significa cosa quemada, indicando de esta manera que las propiedades deseables de estos materiales generalmente se alcanzan después de un tratamiento térmico a altas temperaturas que se denomina cocción⁴³.

Material cerámico “Cualquier producto, que posee una forma, compuesto por materias primas inorgánicas no metálicas (tanto minerales como sintéticas), que a partir de un estado incoherente de polvo se transforma por medio de varias operaciones en un producto semielaborado, el cual, por cocción, se convierte en un objeto sólido, que posee una estructura parcialmente cristalina y parcialmente vítrea”⁴⁴.

En general los materiales cerámicos son materiales inorgánicos formados por elementos metálicos y no metálicos unidos químicamente por fuertes enlaces iónicos y covalentes entre átomos⁴⁵, pueden ser cristalinos, amorfos o mezcla de ellos.

2.2.2 Clasificación. Los materiales cerámicos usados para aplicaciones en ingeniería pueden clasificarse en dos grupos: materiales cerámicos tradicionales y materiales cerámicos de uso específico en ingeniería. El objeto de la investigación encamina la construcción de las referencias teóricas a los materiales cerámicos tradicionales, por lo que a continuación se realiza una descripción de los mismos.

2.2.2.1 Cerámicos tradicionales. Los cerámicos tradicionales están constituidos por tres materias primas básicas: arcilla, sílice (silex) y feldespato. La arcilla está compuesta principalmente por silicatos de aluminio hidratados ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) con pequeñas cantidades de otros óxidos como TiO_2 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O y K_2O .

La arcilla debido a propiedades particulares como la plasticidad puede ser trabajada o formada antes de que el material se endurezca por el fuego y constituya el cuerpo principal del material. La sílice (SiO_2), también llamada sílex o cuarzo, funde a altas temperaturas y es el material refractario de los cerámicos tradicionales. El feldespato potásico, el cual presenta la composición básica $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$, funde a bajas temperaturas y tiene como función unir los componentes refractarios.

⁴³ CALLISTER junior, William D. Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. Traducido por Dr. Pere Molera Solá. 3 ed. Barcelona (España): Editorial Reverté. 2002. p 387.

⁴⁴ Tecnología cerámica aplicada / SACMI; Asociación Española de Técnicos Cerámicos; traducción del italiano por Arnold van Gelder. – Castellón de la Plana: Faenza Editrice Ibérica, 2004.

⁴⁵ SCHAFFER, James P, *et al.* Ciencia y diseño de ingeniería de los materiales. Traducido por: Ing. Virgilio González Pozo. 2 ed. México: Continental, 2000. p 6.

Productos estructurales tales como ladrillos para la construcción, tuberías de desagüe, tejas de cubiertas y losetas para pisos están hechos de arcilla natural compuesta por los tres componentes básicos (arcilla, sílice y feldespato).

2.2.2.2 Clasificación de los productos cerámicos tradicionales. Dos criterios para realizar una clasificación de los materiales cerámicos tradicionales son la temperatura de cocción y/o la coloración final. Según el color de cocción los productos pueden ser coloreados o blancos, y se pueden clasificar según el rango de temperatura de cocción de la siguiente forma⁴⁶:

- 1) Productos de color: cerámica estructural
Temperatura: 850 °C – 1100°C
- 2) Productos de cocción blanca
Temperatura: 1100°C – 1250 °C
- 3) Productos refractarios
Temperatura > 1450 °C

En la investigación se elaborarán productos de color (cerámica estructural) con la descripción anteriormente realizada. Las materias primas usadas para los productos de color son arcillas comunes, margas y pizarras (normalmente arcillas rojas). El tipo de pasta o combinación de materias primas usado en la elaboración de estos productos de cerámica estructural es denominado sencillo; constituido por una o varias arcillas calcáreo-ferruginosas. Los elementos cerámicos tradicionales se caracterizan por ser más o menos porosos con colores variables que pueden ir desde el amarillo hasta el rojo intenso⁴⁷.

2.3 MATERIAS PRIMAS

En este apartado se presentan algunos aspectos relacionados con las materias primas disponibles para la elaboración de los elementos cerámicos tradicionales. Para la elaboración de las pastas cerámicas tres elementos son básicos: los minerales de arcilla, que en presencia de agua desarrollan la plasticidad; los feldespatos, que cumplen la función de

⁴⁶ Galán, Emilio y Aparicio, Patricia. Materias primas para la industria cerámica. Universidad de Sevilla. [online]. [citado 13/12/2017]. Disponible de internet: <http://www.ehu.es/sem/seminario_pdf/SEMINARIO_SEM_2_031.pdf>

⁴⁷ Escuela técnica superior de ingenieros de minas. Francisco blanco Álvarez. Cerámicos. Generalidades. [online]. [citado 13/12/2017]. Disponible en internet: <<http://www.etsimo.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion1.Ceramicos.Generalidades.pdf>>

relleno no plástico en el conformado y elemento fundente en el proceso de cocción; y la sílice, relleno que mejora la refractariedad⁴⁸.

De una manera general la composición de una pasta cerámica puede ser representada como sigue⁴⁹:

- Materiales arcillosos: con esta materia se proporciona suficiente plasticidad para poder obtener una forma definida de los elementos a elaborar. Estos materiales aportan Al, Si y parte del Ca, Fe, Ti.
- Materiales fundentes: en la cocción generan fases vítreas que actúan como ligantes entre las partículas y promueven las reacciones sólido-sólido; aportan Na, K, Al, Si. Son los ingredientes de menor punto de fusión y a la máxima temperatura se ablandan y en estado viscoso son absorbidos por la porosidad, permitiendo aproximarse a las demás partículas que han de soportar el calentamiento y aguantar la forma. La porción fundida, al enfriar formará una matriz vítrea, que soldará los restantes granos y sellará la porosidad, de forma más o menos extensa, según el tipo de pasta; al proceso generado por estos materiales se le denomina gresificación⁵⁰.
- Áridos o desgrasantes: en crudo compensan el exceso de plasticidad y en cocción actúan como esqueleto o armazón de la forma, por ejemplo, el cuarzo o la chamota (arcilla cocida triturada)⁵¹.
- Otros materiales: son materiales como el talco, sílice, pirofilita, CaCO₃, etc. (llamados “inertes”), que permiten obtener prestaciones concretas; aportan mayoritariamente Ca, Mg, Si.
- Aditivos: son materiales adicionados principalmente para mejorar la reología de las suspensiones acuosas; pueden ser inorgánicos u orgánicos, y se introducen en la pasta en cantidades muy pequeñas.

Las materias primas para la elaboración de materiales cerámicos pueden ser clasificadas según su función en: plásticas o no plásticas. Dentro de las materias primas plásticas se encuentran esencialmente las arcillas. Como materias primas no plásticas se pueden nombrar los desgrasantes (disminuyen la plasticidad y afectan positivamente los procesos de moldeado y secado) y fundentes (facilitan una cocción a menor temperatura)⁵².

⁴⁸ Escuela técnica superior de ingenieros de minas. Francisco blanco Álvarez. Materias primas. Cerámicas. [online]. [citado 13/12/2017]. En internet: <<http://www.etsimo.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion2.MateriasPrimas.Ceramicas.2007.pdf>>

⁴⁹ Tecnología cerámica aplicada / SACMI. Op. cit., p, 13.

⁵⁰ GÜETO MORALES, Juan. Tecnología de los materiales cerámicos. Consejería de educación. Comunidad de Madrid. Díaz de Santos.2005. p 70.

⁵¹ Ibid., p 28.

⁵² Galán, Emilio y Aparicio, Patricia. Materias primas para la industria cerámica. Universidad de Sevilla. [online]. [citado 16/09/2017]. Disponible de internet:< http://www.ehu.es/sem/seminario_pdf/SEMINARIO_SEM_2_031.pdf >

2.3.1 Materias primas plásticas.

2.3.1.1 Las arcillas. Las arcillas son principalmente partículas submicroscópicas en forma de escamas de mica, minerales arcillosos y otros minerales; de tamaños menores de 0,002 mm, en su mayoría de tamaño coloidal ($<1\mu$) con 2μ de límite superior. En algunos casos, partículas entre 0,002 y 0,005 mm también se clasifican como arcillas. Dentro de las características más importantes de este material se encuentra la plasticidad que desarrolla en presencia de una cantidad limitada de agua⁵³.

La arcilla está compuesta básicamente de aluminosilicatos hidratados (Al_2O_3 compuestos), óxidos alcalinos (Ba, Ca) o compuestos, compuestos álcali – metal (Na, K), y a menudo algunos óxidos de hierro⁵⁴. Estos materiales presentan una amplia gama de características físicas, composiciones químicas y estructuras; las impurezas más comunes dentro de la composición de las arcillas incluyen compuestos (normalmente óxidos) de bario, calcio, sodio, potasio y hierro junto con algo de materia orgánica⁵⁵.

El papel de las arcillas en la preparación del cuerpo cerámico se puede resumir de la siguiente manera: a) genera la plasticidad necesaria para el moldeo, b) mejora las propiedades mecánicas, c) mejora las propiedades de la suspensión, d) aporta los componentes para la formación de fases líquidas y cristalinas durante la cocción⁵⁶.

Dentro de las propiedades más importantes de la arcilla se encuentra la plasticidad; definida como la capacidad de un material para deformarse ante un esfuerzo mecánico conservando la deformación al retirarse la carga. Es función del contenido de agua, del tamaño de las partículas y de la estructura laminar. Si la arcilla esta seca no es plástica, se disgrega, y con exceso de agua se separan las láminas⁵⁷. Dependiendo del contenido de humedad en las arcillas se pueden distinguir tres fases:

- 1) *Pequeño incremento en la consistencia con el aumento en el contenido de humedad.* En esta fase se genera una película de agua alrededor de las partículas de arcilla (efecto de granulación).

⁵³ DAS, Braja. Fundamentos de ingeniería geotécnica. México. 1999. Editorial THOMSON. p 1. ISBN 970-686-061- 4.

⁵⁴ ASHBY, Michael F y JONES, David. Engineering Materials 2: An introduction to microstructures processing and design.3 ed. Editorial BH Elsevier.p 173.

⁵⁵ CALLISTER junior, Op cit., p 388

⁵⁶ Galán, Emilio y Aparicio, Patricia. Materias primas para la industria cerámica. Universidad de Sevilla. [online]. [citado 16/09/2017]. Disponible en internet:< http://www.ehu.es/sem/seminario_pdf/SEMINARIO_SEM_2_031.pdf >

⁵⁷ Escuela técnica superior de ingenieros de minas. Francisco blanco Álvarez. Propiedades de las arcillas. [online]. [citado 16/09/2017]. Disponible en internet:<<http://www.etsimo.uniovi.es/usr/fblanco/lección3.PropieadesArcillas.pdf>>

- 2) *Incremento intermedio de la consistencia.* En esta etapa el agua ocupa los intersticios existentes entre las partículas de arcilla, generando fuerzas de atracción capilares debidas a la tensión superficial del agua, que generan un incremento en la consistencia que rápidamente alcanza un máximo.
- 3) *Disminución brusca de la consistencia.* Aumento en el espesor de la película que cubre las partículas de arcilla y debilitamiento de las fuerzas de atracción capilares, bajo estas condiciones la consistencia tiende a cero y el sistema agua – arcilla se comporta como líquido.

Compuestos como el hidróxido, carbonato o silicato sódico, cal, oxalato y humus pueden ser usados para aumentar la plasticidad; en caso de requerir un efecto contrario se usan los desgrasantes.

En principio, el aumento de plasticidad en la pasta produce:⁵⁸

- Mayor ductilidad de los productos moldeados
- Mayor retención de agua, mayor contracción por secado y un aumento en la posibilidad de la formación de grietas.

2.3.2 Materias primas no plásticas. Las materias primas no plásticas tienen como función reducir la plasticidad y facilitar la defloculación; además mejoran la permeabilidad y empaquetamiento de la pasta y aportan óxidos para la formación de fases líquidas y cristalinas, algunos son inertes.

Los principales minerales no plásticos son: cuarzo y arenas silíceas (materiales fundentes) que actúan como inertes; calcita y dolomita, que pueden ser reactivos y también fundentes; y los óxidos de hierro y otros elementos (Cu, Co, Mn, Ti) que suelen actuar como pigmentos, y en ciertos casos como fundentes⁵⁹.

2.3.2.1 Desgrasantes o áridos. Este grupo de materias primas está constituido por los materiales más refractarios, carentes de plasticidad, siendo su papel principal actuar como esqueleto, armazón o soporte de la forma cerámica, pues, aunque algunos materiales se ablandan para obtener un determinado grado de vitrificación, la forma que se imprime a los materiales cerámicos en crudo, ha de sostenerse hasta el final del proceso, aunque con cierta variación de la escala de tamaño⁶⁰.

⁵⁸ Escuela técnica superior de ingenieros de minas. Francisco blanco Álvarez. Propiedades de las arcillas. [online]. [citado 16/09/2017]. Disponible en internet: <<http://www.etsimo.uniovi.es/usr/fblanco/lección3.PropiedadesArcillas.pdf>>. p 5.

⁵⁹ Galán, Emilio y Aparicio, Patricia. Materias primas para la industria cerámica. Universidad de Sevilla. [online]. [citado 16/09/2017]. Disponible de internet: <http://www.ehu.es/sem/seminario_pdf/SEMINARIO_SEM_2_031.pdf> p, 3.

⁶⁰ GÜETO MORALES, Op cit., p 74-75.

Este tipo de materia prima no plástica, es un material arenoso que tiene como función la reducción de la excesiva plasticidad de algunas arcillas, ya que no retienen agua y disminuyen su adherencia al estar húmedas, propiedades que dificultan su manejo y moldeo. Estos materiales deben ser añadidos finamente molidos para garantizar la homogeneidad de la pasta. La reducción de la plasticidad en la pasta permitirá una mejor trabajabilidad y facilitará el secado⁶¹. Los más utilizados son⁶²:

- La arena de cuarzo (SiO₂) o anhídrido silícico, que puede encontrarse en la propia arcilla o ser añadido. Dentro de las propiedades características de esta materia prima se encuentra su aumento de volumen con el incremento de la temperatura, fenómeno que se traduce en una reducción de la contracción de la pasta; es de anotar que se debe tener cuidado con esta característica pues un calentamiento brusco generaría una expansión violenta que podría romper la pieza.
- El feldespató potásico, da transparencia a las porcelanas y lozas y es también usado en la fabricación de esmaltes.
- La chamota o barro cocido material pulverizado procedente de las piezas rotas o defectuosas; se añade a las arcillas y no se contrae al volverse a cocer. Este material es el ideal pues aporta las siguientes ventajas:
 - Reduce las contracciones por secado y por cocción, disminuyendo las tensiones internas y el riesgo de grietas y fisuras.
 - Mejora la resistencia mecánica del cuerpo cerámico crudo.
 - Mejora la facilidad de drenaje de las moléculas de agua en el proceso de secado previniendo las fracturas.
 - Mejora la resistencia al choque térmico.

Con el propósito de atenuar un posible exceso de plasticidad, se podrían utilizar ciertos granulados orgánicos, subproductos agrícolas o forestales, tales como: serrín de madera, cascarillas de cereales (las de arroz son además ricas en sílice), huesos de aceituna, cáscara de nuez o de almendra, triturados, etc⁶³.

Tales granulados aminoran la plasticidad convenientemente, dosificando un cierto porcentaje a la composición cerámica. Más tarde se quemarán en el horno, para lo que

⁶¹ Galán, Emilio y Aparicio, Patricia. Materias primas para la industria cerámica. Universidad de Sevilla. [online]. [citado 16/09/2017]. Disponible de internet:<
http://www.ehu.es/sem/seminario_pdf/SEMINARIO_SEM_2_031.pdf> p, 2.

⁶² Escuela técnica superior de ingenieros de minas. Francisco blanco Álvarez Materias Primas. Cerámicas. [online].

[citado 16/09/2017]. En internet:<<http://www.etsimo.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion2.MateriasPrimas.Ceramicas.2007.pdf>

⁶³ GÜETO MORALES, Op cit., p 75.

conviene un ambiente oxidante y una meseta térmica en el entorno de los 500 – 600 °C, dejando su lugar vacío, es decir, aumentando la porosidad, que si la pasta gresifica a mayor temperatura puede reabsorberse en todo o en parte, y en caso contrario, proporciona productos más porosos, lo que se aprovecha, por ejemplo, en la elaboración de productos aislantes. Si el efecto que se busca es aumentar la refractariedad, el prototipo de los desgrasantes minerales es la sílice o anhídrido silícico.

2.3.2.2 *Fundentes*. Reducen la temperatura de cocción bajando el punto de fusión de la pasta (cocción a menor temperatura), lo que se traduce en menores costos de fabricación y permite la parcial vitrificación de las piezas. Los más usados son:

- *Carbonato cálcico*. Frecuentemente vienen incorporados en la arcilla como impurezas; el aporte calizo es perjudicial para la pieza y conviene reducirlo o molerlo finamente.
- *Feldespatos potásico*. Da transparencia a las porcelanas y lozas y sirve también para fabricar esmaltes cerámicos.
- *Feldespatos*⁶⁴. Los feldespatos son silicoaluminatos de potasio, sodio, calcio o bario. El objetivo fundamental de los feldespatos en las pastas cerámicas es el de rebajar el punto de fusión, lo que es de máxima importancia, tanto desde el punto de vista técnico como económico, produciendo las reacciones fundamentales para la constitución del producto cerámico a una temperatura más baja.

En un producto poroso, se puede decir que la parte feldespática forma una masa fundida que cementa las partículas de los otros componentes. La acción de las sustancias fundentes es en parte de naturaleza química, en cuanto que la porción fundida de la masa engloba a la que permanece sin fundir a la temperatura de cocción, también en parte, de naturaleza física. El feldespato disminuye en los productos porosos el coeficiente de dilatación.

2.4 COMPOSICIÓN DE LA PASTA

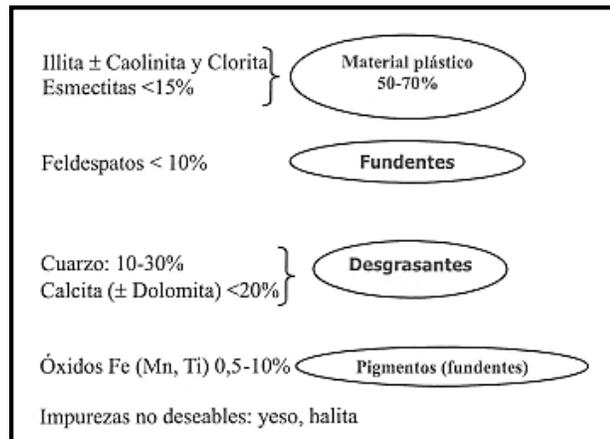
En la extensa gama de productos cerámicos no pueden existir composiciones definidas, dependiendo estas estrechamente de las propiedades del producto final (poroso o vitrificado) y sus características de empleo, de las materias primas disponibles y de los medios de cocción. Hablar de cálculo de pastas cerámicas es tal vez superfluo, puesto que en amplias zonas de la producción cerámica rige una determinada y particular norma empírica fundada en la experiencia sobre la naturaleza de las materias prima y los productos obtenidos, así como en el sistema de trabajo.

En función del sector en donde se lleve a cabo la producción se pueden demandar preferentemente ciertas composiciones de pasta. Para materiales estructurales como son los

⁶⁴ Ibid., p.84.

ladrillos, la composición química es variada, con altos contenidos de sílice y hierro total. En la Figura 1, se presenta una configuración aproximada de la composición de la pasta.

Figura 1. Rango composicional admitido para la fabricación de cerámica estructural



Fuente: Galán, Emilio y Aparicio, Patricia. Materias primas para la industria cerámica. Universidad de Sevilla. [Online]. [Citado 16/09/2017]. En internet: http://www.ehu.es/sem/seminario_pdf/SEMINARIO_SEM_2_031.pdf >

2.5 SECADO

El secado de un cuerpo arcilloso crudo es el mecanismo por el cual se elimina el agua que lo humedece. Este proceso es muy similar para los distintos cuerpos arcillosos. Sin embargo, a una determinada velocidad de secado, los efectos que se generan sobre cada cuerpo, pueden ser muy diferentes entre cada uno de ellos, dependiendo de su naturaleza química y cristalográfica, de su granulometría y de su historia previa antes de llegar a la etapa de secado.

El secado tendrá influencia sobre los siguientes parámetros⁶⁵:

- Cantidad de agua residual
- Dimensiones longitudinales, superficiales y de volumen
- La resistencia a la flexión
- La plasticidad

⁶⁵ Escuela técnica superior de ingenieros de minas. Francisco blanco Álvarez. Secado. [online]. [citado 16/09/2017]. Disponible en internet: <http://www.etsimo.uniovi.es/usi/fblanco/Leccion6.SECADO.pdf>

2.5.1 Humedad eliminada durante el secado.

2.5.1.1 Enlaces humedad – material sólido⁶⁶. Tres son las formas de enlace de la humedad con el material sólido; el enlace químico, físico – químico y físico – mecánico. Durante el proceso de secado se elimina la humedad enlazada en forma físico química y mecánica. Dependiendo de la energía de unión existente entre las moléculas de agua y las partículas sólidas, existirá un mayor grado de dificultad al momento de llevar a cabo la eliminación de la humedad. A continuación se presentan las posibles maneras en que se puede encontrar el agua en el cuerpo cerámico crudo:

- Agua intersticial: El agua que se encuentra entre partículas minerales en los capilares y que puede moverse más o menos libremente entre ellos, es el agua libre o intersticial; su eliminación puede causar una pérdida de volumen considerable, ya que su participación en el cuerpo cerámico puede ser importante. La cantidad presente en el elemento depende de la proporción de adición durante el amasado y extruido (desarrollo de plasticidad). Los rangos de variación dependen de la naturaleza de la mezcla arcillosa.

La velocidad de eliminación del agua intersticial o también conocida como agua de plasticidad (debido al carácter plástico que induce a la pasta cerámica), depende principalmente de la capacidad de secado del medio (aire) que rodea al cuerpo arcilloso.

- Agua higroscópica: Es el agua que se encuentra ligada a las partículas minerales por fuerzas eléctricas, propias del dipolo del agua así como de las cargas naturales de los cristales que forman las arcillas. La cantidad de agua higroscópica que tiene un cuerpo arcilloso depende de la naturaleza química, física y mineralógica de las materias primas, de su granulometría, de la presencia de sales, etc. La pérdida de esta agua no genera variaciones apreciables del volumen del cuerpo arcilloso durante el secado.

La velocidad de eliminación del agua higroscópica depende principalmente de la temperatura que adquiere el cuerpo arcilloso pero puede y debe eliminarse en la mayor cantidad posible en la etapa de secado.

- Agua cristalográfica: es el agua que se encuentra unida químicamente a los cristales de los minerales que forman el cuerpo arcilloso. La cantidad de agua cristalográfica que posee el cuerpo arcilloso depende de la naturaleza química y mineralógica de las materias primas. Esta agua se elimina durante la primera fase de la cocción y los efectos que produce al eliminarse, deben tenerse en cuenta en ciertas arcillas.

⁶⁶ Escuela técnica superior de ingenieros de minas. Francisco blanco Álvarez Secado. [online]. [citado 16/09/2017]. Disponible en internet: <http://www.etsimo.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion6.SECADO.pdf>

2.5.2 Mecanismos y cinética del secado⁶⁷. Para la eliminación de la humedad en los materiales podrían ser usados métodos mecánicos como son: la sedimentación, filtración, centrifugación. Resultarían más económicos que los métodos por medios térmicos, pero son de menor eficacia; la eliminación más completa de la humedad se obtiene por evaporación y eliminación de los vapores formados (secado térmico), ya sea empleando una corriente gaseosa o sin la ayuda del gas para extraer el vapor. En el secado, el agua casi siempre se elimina en forma de vapor con aire.

La operación de secado es una operación de transferencia de masa de contacto gas – sólido, donde la humedad contenida en el sólido se transfiere por evaporación hacia la fase gaseosa, en base a la diferencia entre la presión de vapor ejercida por el sólido húmedo y la presión parcial de vapor de la corriente gaseosa. Cuando estas dos presiones se igualan, se dice que el sólido y el gas están en equilibrio y el proceso de secado cesa.

Uno de los métodos más comunes para el secado de las piezas cerámicas es el de convección, en el que circula aire caliente alrededor de la cerámica⁶⁸. Dentro de este método de secado se desarrollan las siguientes etapas⁶⁹:

- Transferencia de calor del aire a la pieza
- Transformación del agua de líquido a vapor
- Separación del vapor de la superficie de la pieza
- Transporte de agua en el estado líquido desde el interior de la pieza a la superficie

2.5.3 La curva de Bigot⁷⁰. La curva de Bigot representa la evolución de la contracción de secado en función de la pérdida de humedad, por ende al presentarse este fenómeno el peso del elemento cerámico disminuye. En algunos casos se registra el peso de los elementos a la salida del proceso de producción, y luego de someterlo al secado este peso ha disminuido considerablemente, incluso a menos de la mitad del peso inicial, esto depende del tipo y del volumen del elemento cerámico (Figura 2).

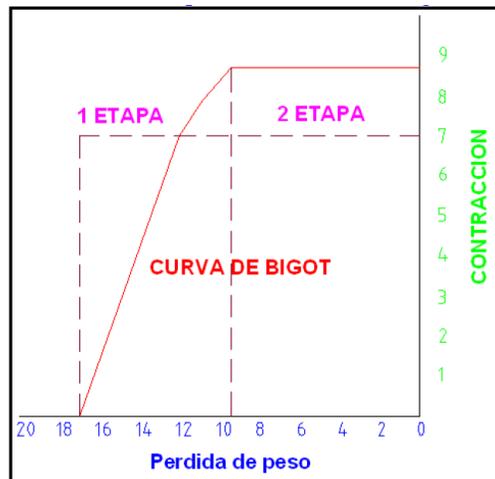
⁶⁷ Escuela técnica superior de ingenieros de minas. Francisco blanco Álvarez. Secado. [online]. [citado 16/09/2017]. Disponible en internet: <http://www.etsimo.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion6.SECADO.pdf>

⁶⁸ ANGÜISACA SARMIENTO, Ronald Vladimir. Proyecto de diseño de un túnel para planta procesadora de arcilla “Bella Azhuquita”. Carrera de ingeniería mecánica. Cuenca. Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca. 2009. p.

⁶⁹ Tecnología cerámica aplicada / SACMI; Asociación Española de Técnicos Cerámicos; traducción del italiano por Arnold van Gelder. – Castellón de la Plana: Faenza Editrice Ibérica, 2004.

⁷⁰ ANGÜISACA SARMIENTO. Op.Cit.

Figura 2. Curva de Bigot



Fuente: ANGÜISACA SARMIENTO, Ronald Vladimir. Proyecto de diseño de un túnel para planta procesadora de arcilla “Bella Azhuquita”. Trabajo de grado ingeniero mecánico. Cuenca. Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca. 2009. [en línea]. [Citado 16/09/2017]. En: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/823/3/CAPITULO%20II.pdf>

2.5.3.1 Secado crítico⁷¹. Una vez determinada la curva de Bigot, el cruce entre las prolongaciones de los tramos correspondientes a la primera y segunda etapa de secado corresponde a la llamada humedad crítica F_k . Este punto depende únicamente de la pasta y debe determinarse en cada caso.

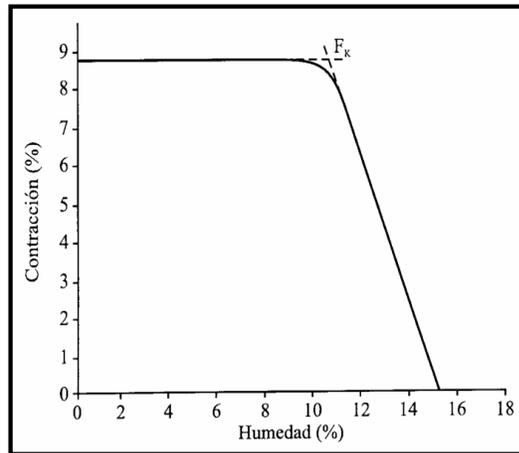
Si se tiene la posibilidad de ajustar, en el curso de la primera etapa de secado, la humedad del producto de manera tal que el punto de inflexión se sitúe en las proximidades de la humedad crítica, se reducirán considerablemente los riesgos de grietas.

2.5.4 Cocción. La cocción de los productos cerámicos constituye, en consecuencia, la etapa más importante del proceso de fabricación. En esta fase se pone de manifiesto si las operaciones o etapas de fabricación anteriores se han desarrollado convenientemente y si el producto cocido ha adquirido las propiedades y características deseadas fijadas por las normas⁷².

⁷¹ ELÍAS, Xavier. 3ª Parte la fabricación de los materiales cerámicos. Curso optimización de procesos cerámicos industriales. Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, 2001.

⁷² Universidad de Oviedo, España. Francisco Blanco Álvarez [en línea]. [citado 18-10-2017]. <<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion7.COCCION.pdf>>

Figura 3. Curva de secado Crítico



Fuente: www.ieselcaminas.org/apuntes/ceramica/composiciones/Pastas%20Ceramicas.pdf

2.5.4.1 *Transformaciones durante la cocción*⁷³. La cocción es la fase culminante del proceso cerámico y consiste en una serie de modificaciones físicas y reacciones químicas que endurecen y consolidan la pasta cerámica, aportándole propiedades nuevas.

Variaciones químicas y estructurales

- Se elimina la humedad residual.
- La sustancia orgánica se quema y se volatiliza
- La parte arcillosa elimina el agua de combinación, descomponiéndose en SiO_2 y Al_2O_3 , que más tarde se recombinarán.
- Los distintos carbonatos pierden el CO_2 desde 550°C hasta 950°C .
- Los sulfatos también se disocian en el calentamiento, eliminando SO_3 .
- Por encima de 1000°C hay tendencia a la recombinación de los distintos elementos hasta la fusión, formándose silicatos, aluminatos y silicio-aluminatos complejos, entre los que predominan la mullita y la sillimanita.

La presencia de la mullita en los productos cerámicos es apreciada por su gran dureza y su pequeño coeficiente de dilatación.

⁷³ MORALES GÜETO, Juan. Tecnología de los materiales cerámicos. Consejería de educación. Comunidad de Madrid. Díaz de Santos.2005. p 278.

2.5.4.2 *Curva de cocción*⁷⁴. Es la curva que se obtiene llevando a abscisas el tiempo en horas, y a ordenadas la temperatura en grados centígrados. Representa el gradiente térmico y está condicionada por los análisis térmicos del material a cocer: expansión térmica, análisis térmico gravimétrico y análisis térmico diferencial.

El ciclo térmico de cocción de los productos cerámicos se divide en cuatro periodos:

- **Pre calentamiento.** Hasta los 100°C se tiene la evaporación de la humedad residual o apurado del secado. La duración está en relación directa con la cantidad de agua a eliminar. No debe ser demasiado rápido ni demasiado lento, porque en el primer caso se tendría una formación de vapor demasiado violenta que provocaría roturas, mientras en el segundo habría condensaciones de agua en las zonas más frías del horno, con los consiguientes inconvenientes.
- **Pequeño fuego.** Desde 100°C hasta unos 800°C, o sea, hasta la eliminación del agua de combinación. Dado que en este periodo se tiene una primera contracción importante conviene que la duración sea larga, para dar ocasión al agua a trasladarse a la superficie desde el interior de las piezas.
- **Gran fuego.** Desde los 800°C hasta la temperatura de cocción: durante este periodo se inician y desarrollan en parte las distintas reacciones entre los silicatos; puede ser de duración más breve pero que sea suficiente para un desarrollo regular de la contracción.
- **Cocción.** Representa el sostenimiento de la temperatura máxima para las reacciones de sinterización cuya duración depende del volumen del horno y del volumen de las piezas individualmente. Se debe dar ocasión a que la temperatura se iguale en el interior de las piezas, a fin de que las transformaciones químicas y físicas, tengan lugar homogéneamente en toda la masa del producto.

2.6 UNIDADES DE MAMPOSTERÍA DE ARCILLA COCIDA

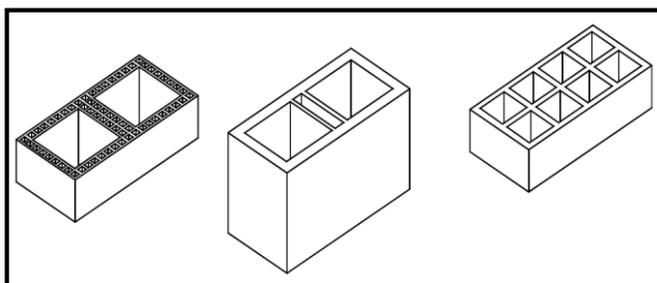
La NTC 4205 distingue tres tipos de unidades de mampostería de arcilla cocida, según la disposición de sus perforaciones y del volumen que éstas ocupen.

⁷⁴ Ibid., p. 42.

2.6.1 Tipos de unidades de mampostería⁷⁵.

2.6.1.1 *Unidad de mampostería de perforación vertical (ladrillos y bloques) (PV)*. Unidad cuyas celdas o perforaciones son perpendiculares a la cara o superficie en que se asientan en el muro. El área neta de las celdas o perforaciones, medida en cualquier sección perpendicular a sus ejes, no puede ser superior al 65 % del área bruta en esa misma sección.

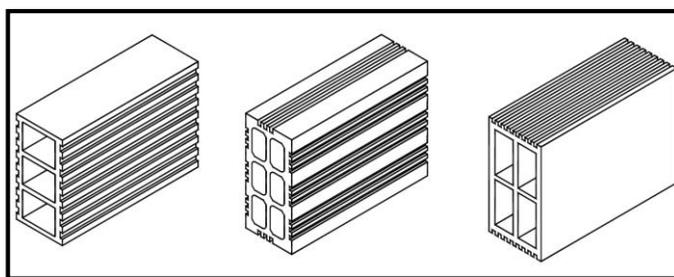
Figura 4. Unidades de mampostería de perforación vertical



Fuente: INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Ingeniería civil y arquitectura. Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos. NTC 4205.

2.6.1.2 *Unidad de mampostería de perforación horizontal (ladrillos y bloques) (PH)*. Unidad cuyas celdas o perforaciones son paralelas a la cara o superficie en que se asientan en el muro.

Figura 5. Unidades de mampostería de perforación horizontal

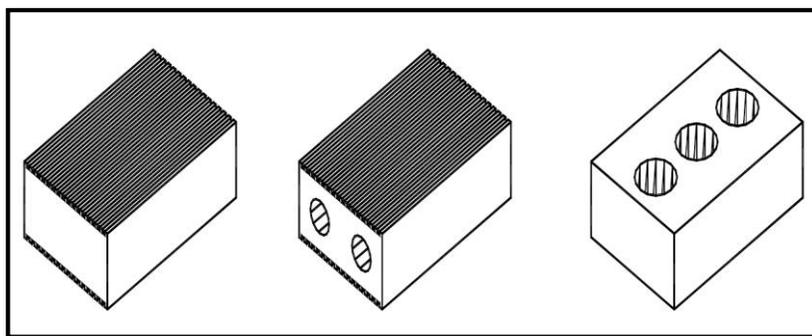


Fuente: INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Ingeniería civil y arquitectura. Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos. NTC 4205.

⁷⁵INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. ingeniería civil y arquitectura. unidades de mampostería de arcilla cocida. ladrillos y bloques cerámicos. NTC 4205. Bogota,D.C.:ICONTEC,2000. 1 p.

2.6.1.3 Unidades macizas (ladrillos) (M). Mampuestos aligerados con pequeñas perforaciones que ocupan menos del 25 % de su volumen o, también, que no contienen ninguna perforación.

Figura 6. Unidades de mampostería de macizas



Fuente: INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Ingeniería civil y arquitectura. Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos. NTC 4205.

2.6.2 Clasificación⁷⁶. El uso o función principal de cualquier tipo de unidad de mampostería determina la clase a que corresponde y los requisitos físicos que debe cumplir. Para efectos de la NTC 4205, se consideran las unidades estructurales (portantes) y las unidades no estructurales (divisorios o de cierre); y las unidades de mampostería de uso exterior, o de fachada, y las unidades de uso interior.

2.6.2.1 Unidades de mampostería de uso interior y de uso exterior (o de fachada):

- **Unidades de mampostería de uso interior:** son aquellas que sólo son aptas para usarse en muros que no estén expuestos a la intemperie, como muros divisorios interiores que puedan estar o no a la vista, o en muros exteriores que tengan un acabado de protección de revoque o pañete, enchape u otra mampostería que impida la exposición a la intemperie.
- **Unidades de mampostería de uso exterior o para fachada:** son aptos para construir muros a la vista que estén expuestos a la intemperie.

2.6.2.2 Unidades de mampostería estructural (portantes) y no estructural (divisorios o de cierre)

- **Unidades para mampostería estructural:** son aquellas que se diseñan y fabrican para ser utilizadas en construcciones de tipo estructural, además de su propio peso, dichas unidades pueden soportar otras cargas verticales y horizontales.

⁷⁶ Ibid., p.38.

- **Unidades para mampostería no estructural:** son aquellas que se utilizan para muros divisorios o de cierre que únicamente atienden las cargas debidas a su propio peso.

2.7 PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS UNIDADES DE MAMPOSTERÍA NTC 4205⁷⁷

2.7.1 Tasa inicial de la absorción de agua. Es la capacidad de absorción capilar que tienen las unidades secas, medida durante 1 min; se expresa en g/cm²/min (el ensayo para su obtención está especificado en la NTC 4017. Esta norma recomienda los requisitos mínimos de pre humedecimiento de las unidades, para su colocación con la tasa inicial de absorción, a menos que el fabricante o constructor se incline por otra recomendación, con base en su experiencia o en el conocimiento de su producto.

Cuando se tengan valores de absorción mayores que los anotados en la Tabla 2, se debe vigilar el cumplimiento de los requisitos de absorción y resistencia, y diseñar los morteros de pega y tiempos de pre humedecimiento apropiados.

Tabla 2. Tasa Inicial de absorción

Tasa inicial de absorción g/cm ² /min	Tiempo recomendado de prehumedecimiento
< 0,10	5 min
< 0,15	1 h
< 0,25	24 h

Fuente: INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Ingeniería civil y arquitectura. Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos. NTC 4205.

2.7.2 Absorción de agua. Las unidades de mampostería de arcilla cocida, ensayadas según el procedimiento descrito en la NTC 4017 (ASTM C67), deben cumplir con los requisitos de absorción de agua en 24 h de inmersión (promedio y máximo individual) que se dan en la Tabla 3 y Tabla 4.

En general, no se pueden tener absorciones inferiores al 5 % en promedio, ni superficies vidriadas o esmaltadas en las caras en que se asientan o en las que se vayan a pañetar.

Si en razón de la materia prima utilizada, las unidades de mampostería de uso exterior (fachada) resultan con absorción mayor a la especificada, se puede acudir al análisis termodiferencial conjunto de la arcilla y el producto cocido, para demostrar si la temperatura de cocción es suficiente o no, y para evitar la rehidratación de la arcilla cuando las piezas estén expuestas a la intemperie. También se puede tomar como criterio de

⁷⁷ Ibid., p.40.

estabilidad a la intemperie, la relación de módulos de rotura, establecida entre una pieza saturada de agua durante 24 h a temperatura ambiente y el de una pieza seca. Dicha relación no puede ser inferior a 0,8. Este ensayo se efectúa sobre cinco muestras para cada estado, según el método descrito en la NTC 4017.

2.7.3 Resistencia mecánica a la compresión. Las unidades de mampostería de arcilla cocida deben cumplir con la resistencia mínima a la compresión que se especifica en la Tabla 3 y Tabla 4, cuando se ensayan según el procedimiento descrito en la NTC 4017.

En los ladrillos de perforación vertical, la resistencia neta a la compresión se calcula dividiendo la carga de rotura o de falla por el área neta de la sección perpendicular a la carga (se descuentan las áreas de celdas y perforaciones). En los ladrillos macizos, la resistencia neta y la resistencia bruta son iguales porque se calculan dividiendo por el área de apoyo de los ladrillos.

Tabla 3. Propiedades físicas de las unidades de mampostería estructural

Tipo	Resistencia mínima ¹⁾ a la compresión MPa (kgf/cm ²)		Absorción de agua máxima en %			
			Interior *		Exterior	
	Prom 5 U	Unidad	Prom 5 U	Unidad	Prom 5 U	Unidad
PH	5,0 (50)	3,5 (35)	13	16	13,5	14
PV	18,0 (180)	15,0 (150)	13	16	13,5	14
M	20,0 (200)	15,0 (150)	13	16	13,5	14

Fuente: INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Ingeniería civil y arquitectura. Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos. NTC 4205.

Tabla 4. Propiedades físicas de las unidades de mampostería no estructural

Tipo	Resistencia mínima ¹⁾ a la compresión MPa (kgf/cm ²)		Absorción de agua máxima en %			
			Interior		Exterior	
	Prom 5 U	Unidad	Prom 5 U	Unidad	Prom 5 U	Unidad
PH	3,0 (30)	2,0 (20)	17	20	13,5	14
PV	14,0 (140)	10,0 (100)	17	20	13,5	14
M	14,0 (140)	10,0 (100)	17	20	13,5	14

Fuente: INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Ingeniería civil y arquitectura. Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos. NTC 4205.

2.8 VIDRIO

2.8.1 GENERALIDADES

2.8.1.1 Definición. Según la comisión de terminología de Academia Rusa de Ciencias (1310) no establece ninguna exclusión basada en la constitución química y enuncia que bajo la denominación de vidrio se designan todos los sólidos amorfos obtenidos por enfriamiento de una masa fundida, cualquiera que sea su composición química y la zona de temperatura en que tenga lugar su solidificación. La definición adoptada por A.S.T.M (1426) considera que un vidrio es un material inorgánico fundido que se ha enfriado hasta un estado rígido sin experimentar cristalización⁷⁸.

El vidrio suele ser considerado como un líquido sub-enfriado, pues carece de una estructura cristalina, la cual define al estado sólido (cristal), teniendo a su vez una estructura vítrea que lo asemeja a los líquidos. Su estructura amorfa es generada a partir de una fusión que produce una estructura reticular no cristalina, pero sólida.

2.8.2 Clasificación y componentes.⁷⁹ El vidrio, como se mencionó, es un compuesto inorgánico, formado principalmente por una mezcla de sales y óxidos inorgánicos, entre los cuales la sílice constituye el principal componente. La sílice al igual que el anhídrido bórico y el anhídrido fosfórico son elementos vitrificantes. A fin de facilitar la fabricación del vidrio se añaden óxidos y algunas sales a manera de fundentes. Se suelen agregar también estabilizadores para impedir la solubilidad de los vidrios a base de sílice y álcalis. Finalmente, se añaden otras sustancias complementarias según sea requerido para modificar sus propiedades mecánicas, ópticas, color, entre otras.

Por mucho tiempo, la elaboración de vidrio se había limitado a la formulación tradicional sílico-sódico-cálcica sin variantes importantes a más de la de los vidrios potásico-cálcicos y los vidrios con óxido de plomo.

En la Tabla 5, se observa una gran diversidad de vidrios. La composición química no está claramente definida, pues emerge de los procesos de fabricación adoptados por el productor y de la aplicación para la cual se produce el vidrio. Sin embargo, en la mayoría de las aplicaciones cotidianas se emplea vidrio inorgánico fabricado a base de sílice.

⁷⁸ Fernández, J. M. (2003). *El vidrio*. Madrid: CSIC Press.

⁷⁹ Hidalgo, D. & Poveda, R. (2013). Obtención de adoquines fabricados con vidrio reciclado como agregado. Escuela Politécnica nacional, Quito.

Tabla 5. Clasificación general de vidrios según su composición

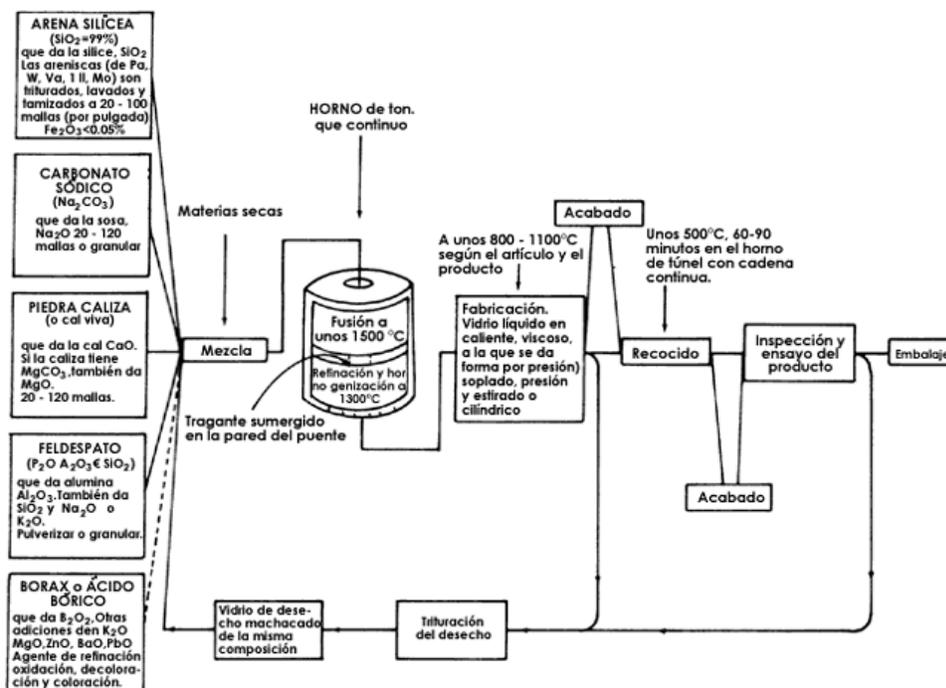
CLASIFICACIÓN		EJEMPLO DE SISTEMAS
INORGÁNICOS	Elementos	No metálicos S, Se, Te
		Metálicos Au-Si, Pt-Pd, Cu-Au
	Óxidos	SiO ₂ , B ₂ O ₃ , P ₂ O ₅ , GeO ₂
		SiO ₂ -Na ₂ O, B ₂ O ₃ -Al ₂ O ₃ -CaO, TeO ₂ -PbO
	Calcogenuros	As ₂ S ₃ , GeSe ₂ , P ₂ S ₃
	Halogenuros	BeF ₂ , PbCl ₂ , AgI
		ZrF ₄ -BaF ₂
	Oxihalogenuros	NaF-BeF ₂ -Pb(PO ₃) ₂
		Al ₂ O ₃ -P ₂ O ₅ -BaF ₂
	Oxinitruros	Si ₃ N ₄ -Al ₂ O ₃ -SiO ₂ , AlN-Y ₂ O ₃ -SiO ₂
Oxicarburos	MgO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ -SiC	
Oxisales	HKSO ₄ , Na ₂ S ₂ O ₃ ·5H ₂ O, Ca(NO ₃) ₂	
ORGÁNICOS MIXTOS		Algunas siliconas, ormosiles híbridos
ORGÁNICOS		Glicoles, azúcares, polímeros (polietileno, polimetacrilatos, poliamidas, etc.)

Fuente: Fernández, J.M. (2003). *El vidrio*. Consejo superior de Investigaciones científicas, Sociedad Española de cerámica y vidrio. Madrid.

2.8.3 Fabricación⁸⁰ Con las arcillas se hacen los vidrios, y como existe una gran variedad, el vidrio que obtengamos dependerá de la arcilla que escojamos, razón por la cual se necesita conocer muy bien las materias primas. La caolinita es el grupo de minerales de arcilla más sencillo, su estructura básica se compone de átomos de oxígeno ordenados de tal manera que dan lugar a capas alternadas de huecos tetraédricos, que se ocupan por átomos de silicio y aluminio, y huecos octaédricos, ocupados por átomos de aluminio, magnesio, hierro y cinc.

⁸⁰ Martínez. A; Lopez. T. (1995). *El mundo mágico del vidrio*. México. D. R. ©

Figura 7. Diagrama para la fabricación de vidrio.



Fuente: Martínez. A; Lopez. T. (1995). El mundo mágico del vidrio [Online]. [Citado 4/Dic/2017]. Disponible en internet: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/137/html/sec_4.html

La materia prima básica para hacer un vidrio son las arcillas. Cuando a esta materia se le agregan distintos compuestos químicos se obtienen diferentes tipos de vidrio. Con base en su composición química se puede hacer una clasificación como la que aparece en la Tabla 6, donde se resumen los compuestos y elementos que poseen los vidrios comerciales más comunes.

Tabla 6. Composición de los vidrios comerciales (los números indican el porcentaje)

Elementos	Sódico-cálcico	Plomo	Borosilicato	Sílice
Sílice	70-75	53-68	73-82	96
Sodio	12-18	5-10	3-10	
Potasio	0-1	1-10	0.4-1	
Calcio	5-14	0-6	0-1	
Plomo		15-40	0-10	
Boro			5-20	3-4
Aluminio	0.5-3	0-2	2-3	
Magnesio	0-4			

Fuente: Martínez. A; Lopez. T. (1995). El mundo mágico del vidrio [Online]. [Citado 4/Dic/2017]. Disponible en internet: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/137/html/sec_5.html

2.8.4 Propiedades. Las propiedades de los vidrios, lo mismo que las de cualquier otro material, depende de sus características estructurales. Y la estructura, a su vez, se halla condicionada principalmente por la composición química y, en menor escala, también por la historia térmica⁸¹. En realidad, es un material duro pero frágil al mismo tiempo, y algo que refuerza esa debilidad es la presencia de imperfecciones superficiales, como astilladuras o ranuras.

Tabla 7. Intervalos de composición frecuentes en los vidrios comunes

Componente	Desde ... %	... hasta %
SiO ₂	68,0	74,0
Al ₂ O ₃	0,0	4,0
Fe ₂ O ₃	0,0	0,45
CaO	9,0	14,0
MgO	0,0	4,0
Na ₂ O	10,0	16,0
K ₂ O	0,0	4,0
SO ₃	0,0	0,3

Fuente: <http://elvidrio10-02.blogspot.com.co>

2.8.5 Usos y aplicaciones. El vidrio es uno de los materiales más nobles con los que puede trabajar el ser humano. Sus características permiten utilizarlo en un sin fin de industrias, como son, la automotriz, farmacéutica, decoración, construcción, electrónica, etc. El vidrio está presente, prácticamente, en todos los ámbitos del ser humano. Por sus características, es un material que permite una transparencia total, combinando resistencia, dureza y pureza (sin imperfecciones). En el ramo de la construcción se han logrado adaptar ciertos procesos y avances tecnológicos, que brindan una enorme gama de posibilidades para su aplicación⁸².

El tipo de vidrio que representa el mayor porcentaje de la producción mundial es el sílico-sódico-cálcico. Dentro de sus aplicaciones más comunes se tiene su uso como elemento constructivo en ventanas, puertas, vitrinas, espejos, etc.; en recipientes, y en elementos decorativos tales como botellas, vasos, jarros, etc.

Se destacan también los vidrios silícicos con cierto porcentaje de óxidos metálicos, empleados para la fabricación de botellas. Adicionalmente se destacan los vidrios de plomo usados en lámparas fluorescentes, ventanas de radiación y vidrios de cristal.

⁸¹ Fernández, J.M. (2003). *El vidrio*. Consejo superior de Investigaciones científicas, Sociedad Española de cerámica y vidrio. Madrid.

⁸² Creación integral en vidrio y aluminio.(2016). Crival. México. [en línea]. [Citado 22/11/2017]. En: <http://www.crival.com.mx/index.php/ usos-del-vidrio>.

Existen varias aplicaciones adicionales para el vidrio, resaltando sus usos como: aislante en forma de lana de vidrio; materiales dieléctricos y no conductores en forma de vitrocerámica; fibra de vidrio en la elaboración de cortinas y tapicería, para la transmisión de señales ópticas; lentes de anteojos, microscopios, y telescopios; equipo de laboratorio; focos y reflectores; elementos decorativos y ornamentales; componente de productos tales como esmaltes, baldosas, entre otros⁸³.

2.8.6 Reciclaje y reutilización del vidrio.⁸⁴ El vidrio reciclado es uno de los productos más ecológicos y confiables que existen. En la actualidad, la demanda de desperdicios de vidrio es mayor que la oferta. Los envases representan la mayor fuente de vidrio generado y reciclado. Cada kilogramo de vidrio reciclado esconde un sinnúmero de beneficios y virtudes para el medio ambiente:

1. El vidrio reciclado exige una menor temperatura de fusión que las materias primas originales; es por esto que requiere 26% menos de energía para su fabricación.
2. La cadena de reciclaje contamina 40% menos de agua y reduce las emisiones de gases tóxicos a la atmósfera en un 20%.
3. Cada tonelada de vidrio reciclado evita la emisión de 315 kilogramos de dióxido de carbono.

2.8.7 Reutilización del vidrio. El vidrio es un material que por sus características es fácilmente recuperable. Concretamente el envase de vidrio es 100 % reciclable, es decir, que a partir de un envase utilizado, puede fabricarse uno nuevo que puede tener las mismas características del primero. Esta facilidad de reutilización del vidrio abre un amplio abanico de posibilidades para que la sociedad y las administraciones afectadas puedan auto gestionarse de una manera fácil su medioambiente.⁸⁵

Es muy importante tener en cuenta para la gestión de vidrio, la reutilización. Esto nos permite volver a utilizar las cosas, dándole una vida útil a materiales que se usan día a día para poder darles un uso prolongado antes de que llegue la hora de deshacerlo definitivamente, disminuyendo así el volumen de las basuras y reduciendo el impacto en el medio ambiente.

Los materiales de vidrios que cumplen con su vida útil, pueden ser reciclados y utilizados como materia prima para elaborar vidrio nuevamente. Esto se puede lograr si las grandes

⁸³ Ibid.,p 43.

⁸⁴ SEGTEC. Vidrio. Seguridad e inteligencia con tecnología de vanguardia. México. [en línea]. [Citado 18/12/2017]. <http://www.segtecvidrio.com/vidrio-reciclado-proceso-usos/>.

⁸⁵ Ramírez, L. Reciclaje del vidrio. Grupo de ingeniería medio ambiental. Internatura, España. [en línea]. [Citado 18/12/2017]. En: http://www.internatura.org/estudios/reciclar/r_vidrio.html.

industrias y principales consumidores le dan uso adecuado a este material ya sea por medio del reciclaje o la reutilización.

2.8.8 Disposición final controlada.⁸⁶ La disposición final consiste en los procesos u operaciones que se realizan para tratar o disponer en un determinado lugar los residuos sólidos, como última etapa de su manejo, en forma permanente, sanitaria y ambientalmente segura. La disposición final se debe realizar en infraestructuras habilitadas, es decir en instalaciones debidamente equipadas y operadas. Nunca en botaderos clandestinos a cielo abierto.

Cuando el vidrio no es susceptible de aprovechar para su reutilización o reciclaje, se procede a su disposición final controlada, es decir destinarlo a un relleno sanitario operado técnicamente y que cumpla con la normativa ambiental vigente del país. Esta actividad debe ser supervisada por las entidades prestadoras de aseo y de los operadores de los rellenos sanitarios.

La vida útil del vidrio, así como un cuidado responsable de los recursos naturales, depende fundamentalmente de una correcta gestión del vidrio en sus diferentes etapas de su ciclo de vida.

⁸⁶ SINIA. Servicio del manejo y gestión de residuos sólidos. Reciclaje y disposición segura de los residuos, Ministerio de ambiente. Perú.

3. METODOLOGÍA

3.1 Recolección de las materias primas: Ceniza de biosólido, arcilla y vidrio.

3.1.1 Suministro de materias primas. La muestra de arcilla se tomó de uno de los frentes de explotación de la empresa de fabricación de ladrillos “EL OASIS”, la cual se localiza en cercanías de la ciudad de Tunja - departamento Boyacá. Se seleccionó esta empresa por la facilidad de consecución del material. (Ver Imagen 1).

La muestra de biosólido se tomó de la PTAR EL SALITRE; planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Bogotá, en donde se generan aproximadamente 4000 ton al mes de este residuo. (Ver Imagen 2)

Imagen 1. Localización Ladrillera El Oasis



Fuente: Google Earth

Imagen 2. PTAR EL SALITRE



Fuente: Google Earth

3.1.2 Recolección de la ceniza biosólido. Siguiendo los lineamientos establecidos por la NTC – ISO 5667-13 (Gestión ambiental. Calidad de agua. Parte 13. Guía para el muestreo de lodos de aguas residuales y plantas de tratamiento de aguas)⁸⁷; el muestreo se realizó de la siguiente manera:

Revisión del lugar para muestreo

Como primera medida, se realizó una visita a las instalaciones de la PTAR para conocer el proceso de tratamiento a las aguas residuales y determinar cuál sería el lugar más adecuado para la realización de un muestreo manual.

De la visita se estableció como lugar de muestreo las bandas transportadoras, ubicadas al final del proceso de tratamiento al que son sometidos los lodos producto de la depuración de las aguas residuales.

⁸⁷ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Gestión ambiental. Calidad de agua. Parte 13: Guía para el muestreo de lodos de aguas residuales y plantas de tratamiento de aguas. NTC - ISO 5667-13. Bogotá D.C.: El instituto, 1998. 21 p.

Muestreo desde bandas transportadoras

El proceso de recolección de la muestra fue manual y se llevó a cabo en una sección de las bandas transportadoras; para evitar el sesgo en la muestra, la pala o elemento recolector se insertó de manera alterna al paso del biosólido y se aseguró que la muestra incluyera todo el ancho de la banda transportadora.

Equipos de muestreo utilizados

Para evitar la contaminación de la muestra por el material de los equipos de muestreo se usaron bolsas de polietileno.

Tipo de muestreo

Para la recolección del material se hizo un muestreo aleatorio (puntual) de la banda transportadora.

Almacenamiento, preservación y manipulación

Las muestras para determinación de la humedad total se recogieron y almacenaron en bolsas plásticas con sello hermético (para evitar escapes o ingresos de humedad). Fueron protegidas en todo momento de cualquier fuente directa de calor.

3.1.3 Recolección de la arcilla. El procedimiento de muestreo utilizado para la recolección de la arcilla se denomina muestreo en tajos a cielo abierto; el cual se usa cuando el yacimiento tiene un frente de ataque o explotación ya establecido. (Ver **Imagen 3**).

La fábrica de elementos cerámicos el OASIS, tiene su zona de explotación en las siguientes coordenadas: latitud 5° 38' 16.27" (N) – Longitud 73° 16' 26.25" (O), en límites del municipio de Oicatá en el departamento de Boyacá.

La muestra necesaria para la caracterización y elaboración de los ladrillos fue recolectada haciendo canales verticales (calicatas de dimensiones 0.5 m x 1 m) en el espesor útil del frente evitando siempre la contaminación del material. Los canales fueron ubicados procurando que fuesen equidistantes y que abarcarán la totalidad de la zona de explotación actual. (Ver **Imagen 3**).

De cada canal se extrajo una muestra simple de aproximadamente 30 kg cada una y posteriormente se mezclaron para formar una muestra compuesta representativa del frente de explotación (Ver **Imagen 3**).

3.1.4 Recolección del Vidrio. Este material se obtuvo recolectando botellas de vidrio en la ciudad de Tunja Boyacá en las instalaciones de la universidad santo Tomas sede Campus, con la ayuda de la comunidad tomasina se recolectó en un mes alrededor de 150 botellas, aproximadamente 8 botellas diarias.

Se optó por realizar la recolección de estas botellas debido al gran consumo de estas bebidas que se generan en la universidad.

Imagen 3. Distribución del muestreo de Arcilla



Fuente: Mozo, William R.⁸⁸,

El Procedimiento para la utilización del vidrio fue el siguiente:

- **Recolección:** Para el proceso de recolección se implementó dentro del campus de la Universidad Santo Tomás puntos de reciclaje de botellas de vidrio utilizadas por la misma comunidad.
- **Lavado:** al material recolectado se le hizo un lavado con agua, para eliminar los residuos que quedaban depositados en las botellas.
- **Secado:** las botellas se secaron con papel absorbente y posteriormente se colocaron a secar al ambiente.
- **Trituración.** El proceso de trituración se realizó mediante una barra de acero y una caneca de plástico, donde se colocaban 3 botellas en cada proceso para obtener piezas de vidrio más pequeñas.
- **Molienda:** Al obtener las piezas de vidrio más pequeñas, se utilizó la máquina de los ángeles teniendo como resultado un tamaño de partícula que pasara por el tamiz N°20, en la maquina se agregó 2.5 kg de vidrio por cada 5 vueltas (Ver Imagen 4).
- **Tamizado:** Todo el material que paso por la máquina de los ángeles se pasó por el tamiz N° 20 para posteriormente ser utilizado en la preparación de la mezcla (Ver Imagen 5).

⁸⁸ Mozo, William R. Valorización de biosolido de ptar en la fabricación de ladrillos. Universidad Pedagogía y Tecnológica de Colombia.. *Proyecto de Investigación*. 2014.

3.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS

La caracterización de las materias primas para la fabricación de los elementos cerámicos, consistió en 4 fases. La clasificación de la ceniza biosólido, la caracterización de la arcilla como componente principal de la pasta cerámica, caracterización del vidrio y la caracterización de las diferentes mezclas (Arcilla – ceniza de biosólido y Vidrio).

- 1) La clasificación de la ceniza de biosólido a través de series históricas de datos del monitoreo periódico que se realiza en la PTAR El Salitre, de la composición química y física de los biosólidos.
- 2) Caracterización de la arcilla: se determinaron las siguientes propiedades. (plasticidad, granulometría, gravedad específica, contenido de materia orgánica).
- 3) Características del Vidrio: se determinar propiedades tanto físicas como químicas del material y la estructura detallada del vidrio, conociendo así la posición que ocupan los átomos, iones o moléculas que lo forman.
- 4) Caracterización de las diferentes dosificaciones de mezclas (Arcilla – Ceniza de biosólido): la cuales se les determinó propiedades tales como: (plasticidad, gravedad específica, densidad y humedad óptima de compactación).

Imagen 4. Trituración del vidrio.



Fuente: Autores

Imagen 5. Tamizado del vidrio



Fuente: Autores

3.2.1 Granulometría. Teniendo en cuenta que “en las materias primas cerámicas es necesario garantizar la existencia de dos diferentes distribuciones granulométricas, una fina (refiriéndose a la fracción arcillosa), y una gruesa (fracción correspondiente a los materiales desengrasantes), las cuales aseguran un mejor empaquetamiento, lo que se traduce en mayores resistencias mecánicas, menores contracciones de secado y de cocción y menor capacidad de absorción”⁸⁹. Se buscó determinar la distribución de las partículas de las fracciones finas de la arcilla mediante el método de granulometría por hidrómetro según la norma I.N.V. E – 124 – 07⁹⁰.

Imagen 6. Ensayo de granulometría por hidrómetro



Fuente: Autores



Fuente: Autores

3.2.2 Caracterización de los diferentes materiales (Arcilla – Ceniza de biosólido – vidrio)

3.2.2.1 Caracterización química. Para la determinación de la composición química de la arcilla, se usó un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) marca JEOL referencia JSM 5910 LV, al cual se le acoplo una sonda detectora de Espectroscopia de Energía Dispersiva (EDS) marca Oxford.

El análisis para la ceniza de biosólido se realizó mediante el método QUANT-EXPRESS (Parámetros Fundamentales) en el rango de sodio (Na) a Uranio (U), en un espectro secuencial de Florescencia de rayos-X de longitud de onda dispersiva de 4KW marca BRUKER modelo S8 TIGER. Tipo de detector: Centello (elementos pesados) y flujo (elementos livianos). Fuente de rayos-X: Tubo de radio (Rh). Goniómetro: De alta precisión para ángulos theta y 2 theta.

⁸⁹ MORALES PÉREZ; NIÑO CACERES Op. cit., p. 13.

⁹⁰ Norma, I.N.V. E – 124 – 07, Análisis granulométrico por hidrómetro.

El análisis de las características químicas del vidrio se realizó mediante revisión bibliográfica, donde se determina el tipo de vidrio utilizado para la mezcla, que corresponde vidrio industrial sódico cálcico.

3.2.2.2 Caracterización mineralógica. La caracterización mineralógica de la ceniza de biosólido se llevó a cabo en un difractor de rayos X de polvo marca BRUKER modelo D8 ADVANCE con geometría DaVinci haciendo un barrido a pasos entre 3.5 y 70 grados en el eje 2Theta. Se utilizó un tiempo de muestreo de 0.4 s por paso y un tubo de Cu con radiación característica $K\alpha_1 = 1,5406 \text{ \AA}$. Los análisis cualitativos de las fases se realizaron mediante la comparación del perfil observado con los perfiles de difracción reportados en la base de datos del International Centre for Diffraction (ICDD). Los análisis cuantitativos de las fases se realizaron mediante el refinamiento del Método de Rietveld.

El análisis para el vidrio se realizó en el laboratorio INCITEMA de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, mediante el DIFRACTÓMETRO PHILLIPS X'PERT PRO PANALYTICAL, Generador de RX con tubo empíreo de cobalto para la detección de ángulos, Detector pix-cel d1 de gran capacidad con rejilla variable. Goniómetro con geometría (configuración geométrica (Bragg-Brentano θ - θ)). Muestra en polvo 2θ : $10^\circ - 80^\circ$, Velocidad de barrido: 0.5 segundos por paso, Análisis por medio del programa X'pert High Score plus, tomando como referente los patrones de difracción del Inorganic Crystal Structure Database (ICSD). Se realizó el ensayo de difracción de rayos X a una (1) muestra de vidrio, con un peso aproximado de veintiséis gramos (4 g), muestra suficiente para realizar el ensayo.

3.2.3 Plasticidad. La determinación de las propiedades plásticas de la arcilla y las diferentes mezclas, se realizó mediante el método indirecto o método de Atterberg. (Ver Imagen 7). Siguiendo lo establecido en las normas I.N.V.E – 125 – 07⁹¹ e I.N.V.E – 126 – 07⁹² las cuales comprenden:

- **Límite líquido (Ll).** Es el contenido de humedad expresado en porcentaje del suelo, “cuando este se encuentra entre el estado líquido y el estado plástico mide la cantidad de agua que contiene el material en el momento en que el líquido denso pierde fluidez”⁹³.
- **El Límite plástico (Lp).** Contenido de agua, en el cual el suelo permanece en estado plástico. Se interpreta este límite como el contenido mínimo de agua para que la

⁹¹ Norma, I.N.V. E – 125 – 07. Determinación del límite líquido de los suelos.

⁹² Norma, I.N.V. E – 126 – 07 Límite plástico e índice de plasticidad de suelos.

⁹³ GIPPINI, E, Pastas cerámicas. Instituto Eduardo Torrojo de la Construcción y el Cemento. Madrid, España, 1979.

pasta sea moldeable. “El límite plástico es el punto en el que se pasa del estado plástico al estado semisólido”⁹⁴.

- **Índice de plasticidad (IP).** Corresponde al intervalo de agua expresado en porcentaje dentro del cual el suelo presenta plasticidad. Este corresponde numéricamente es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico.

Imagen 7. Ensayo Límites



Fuente: Autores



Fuente: Autores

3.2.4 Contracción en crudo y quema. Para determinar la contracción en crudo y en quema se determinó la variación de las dimensiones de los elementos elaborados durante las dos fases del proceso de fabricación del ladrillo.

3.3 DISEÑO EXPERIMENTAL

Para el desarrollo de la investigación se propuso el siguiente diseño de experimentos. Se definió como unidad experimental: Ladrillo.

Se usará un arreglo factorial con los factores:

- % de incorporación de lodo en la mezcla para la fabricación del ladrillo.
- Temperatura de cocción.

⁹⁴ Duitama. Op. Cit., p. 41.

Tabla 8. Diseño Experimental

DISEÑO EXPERIMENTAL								
TEMPERATURAS 950, 1000 Y 1050 °C								
10% Ceniza de Biosólido			20 % Ceniza de Biosólido			0 % Ceniza de Biosólido		
% V	% Ar	Unid	% V	% Ar	Unid	% V	% Ar	Unid
0	90	10	0	80	10	0	100	10
10	80	10	10	70	10	10	90	10
20	70	10	20	60	10	20	80	10
Total Und		30	Total Und		30	Total Und		30
BC: Ceniza de Biosólido, V: Vidrio, Ar: Arcilla								
90 por cada tratamiento de temperatura, para un total de unidades 270.								

Fuente: Autores

3.4 PREPARACIÓN DE LA PASTA

3.4.1 Molienda. Proceso para la disminución del tamaño de las partículas (arcilla, ceniza de biosólido y vidrio) componentes de la pasta cerámica. El tamaño buscado fue entre 70 μm – 1 mm (material que pasa tamices N° 200 - N°18). El tamaño de las partículas se propuso con base en la revisión bibliográfica; sabiendo que no existen normas establecidas que determinen cual debe ser el tamaño necesario para asegurar un adecuado comportamiento de la pasta cerámica en los procesos posteriores.

Las réplicas en la investigación son determinadas por las normas técnicas a seguir; en este caso la NTC 4017, en donde se establece el uso de 10 unidades divididas en dos grupos de cinco unidades para los ensayos de absorción y resistencia a la compresión. Se probaron las combinaciones posibles de los factores para un total de 270 especímenes.

3.4.1.1 Molienda de la arcilla. La molienda de la arcilla fue realizada mecánicamente, utilizando la máquina de desgaste o de los ángeles como molino. Esta máquina consiste en un cilindro de acero, que gira en su propio eje, al cual se le introducen unos elementos esféricos de acero, que al girar el cilindro caen sobre el material. Y por rozamiento entre las ellas, Producen en el material una disminución de partículas, hasta alcanzar un tamaño adecuado. Se realizó una exhaustiva limpieza al interior de la máquina, evitando así una posible contaminación del material arcilloso.

3.4.2 Biosólido cenizas. Para obtener la ceniza del biosólido se llevó a cabo el proceso de quemado en un horno utilizado para la cocción de piezas cerámicas hasta obtener un material totalmente seco y quemado. Se hizo la reducción de tamaño mediante la máquina de desgaste hasta alcanzar el tamaño adecuado (ver Imagen 9).

Imagen 8. Máquina de los ángeles



Fuente: Autores

Imagen 9. Biosólido seco



Fuente: Autores

3.4.3 Tamizado. El tamizado de la materia prima (arcilla, vidrio y ceniza de biosólido) para la conformación de la pasta Cerámica, se realizó con el objetivo de garantizar el cumplimiento del tamaño de las partículas establecidos en el apartado anterior y obtener así una mezcla homogénea al momento del conformado de la pasta. Este se realizó de forma manual utilizando el tamiz N°20 (0.850 mm).

3.4.4 Dosificación Arcilla – Vidrio - Ceniza de Biosólido. En lo que se refiere al porcentaje de incorporación de la ceniza de biosólido y vidrio como materias primas en la fabricación de los elementos cerámicos, se propusieron porcentajes de: 0%-10%-20% en peso. Los porcentajes seleccionados tienen fundamento en la revisión bibliográfica (Ver Tabla 8).

3.4.5 Dosificación del agua. El porcentaje de agua a incluir en la mezcla se determinó a través del cálculo de la humedad óptima de compactación, según la caracterización física de la materia prima límites de Atterberg (ver Imagen 7). Con el objetivo de establecer el porcentaje de agua a adicionar. Se determinaron las humedades óptimas de compactación de los porcentajes de incorporación (0%-10%-20%) de la mezcla, obtenidos a través de la curva densidad-humedad.

Imagen 10. Tamiz N°20



Fuente: Autores

Imagen 11. Dosificación arcilla – vidrio – ceniza de biosólido



Fuente: Autores

3.4.6 Mezclado. La mezcla de las materias primas (arcilla, vidrio, ceniza de biosólido y Agua) se realizó en dos etapas:

- 1) Homogenización del Polvo (Ar-V-CB): esta se realizó de forma manual, agitando el material durante un tiempo considerable, para lo cual se usó bolsas plásticas con sello hermético, las cuales impedían la pérdida de material durante el proceso.
- 2) Mezcla del polvo homogenizado y agua: se realizó de forma manual en un recipiente (Ver Imagen 12). Teniendo precaución para evitar pérdidas de humedad durante la operación del mezclado. Para obtener una humedad homogénea en todas las partículas de la mezcla, esta se dejó en reposo en bolsas plásticas herméticas completamente selladas durante 24 horas.

Imagen 12. Mezclado de la pasta cerámica

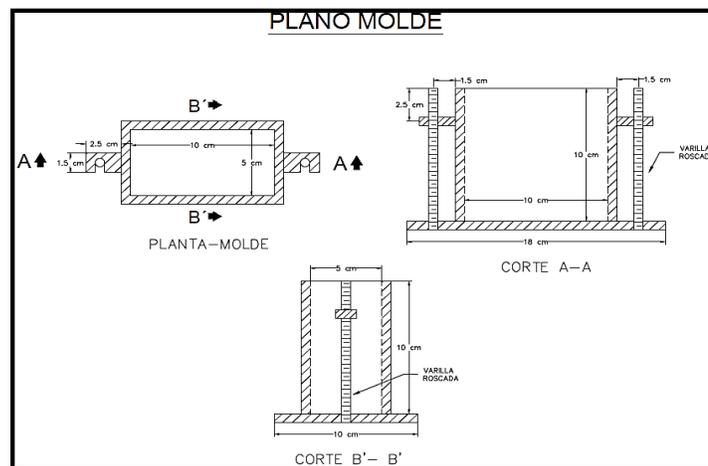


Fuente: Autores

3.4.7 Conformado. Los especímenes cerámicos conformados tienen las siguientes dimensiones: 100 mm x 50 mm x 50 mm. Las medidas adoptadas tienen fundamento en la información recolectada y en el cumplimiento de la norma NTC 296⁹⁵(dimensiones modulares de ladrillos cerámicos); en la cual se presentan algunas medidas modulares y se resalta que; ladrillos que tengan medidas con base en el múltiplo básico de 10 cm cumplen con las especificaciones de coordinación modular dadas en la NTC 45⁹⁶.

Para garantizar las dimensiones propuestas del elemento en el proceso de conformado, se diseñó un molde. El cual fue fabricado en acero con las medidas establecidas. (Ver Figura 8).

Figura 8. Plano diseño molde



Fuente: Mozo, William R.⁹⁷

Los especímenes cerámicos (ladrillos), fueron prensados uniaxialmente para su conformado, utilizando una máquina de compresión, marca “ELE internacional” EL36-4140/01. Con un esfuerzo de compresión de 60 kgf/cm². Basado en la revisión bibliográfica.

⁹⁵ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN, ingeniería civil y arquitectura. dimensiones modulares de unidades de mampostería de arcilla cocida. ladrillos y bloques cerámicos. NTC 296. Bogota,D.C.:ICONTEC,2000. 3 p.

⁹⁶ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN, ingeniería civil y arquitectura. Coordinación modular de la construcción. Bases, definiciones y condiciones generales. NTC 45. Bogota,D.C.:ICONTEC,1981.

⁹⁷ Mozo, William R. (2014). Fabricación de materiales de construcción a partir de biosólido del tratamiento a las aguas residuales. Universidad Santo Tomas. Proyecto de investigación.

Imagen 13. Prensado de la pasta cerámica



Fuente: Autores

Imagen 14. Ladrillo conformado



Fuente: Autores

3.5 SECADO

Para la determinación de la temperatura adecuada de secado; se desarrollaron pruebas preliminares a este. Estas consistieron en aplicar diferentes ciclos de temperatura que oscilaban entre 60°C y 80°C en tiempos determinados. Comparando características tales como deformidades (alabeo) y textura (grietas) de los ladrillos después del secado.

3.5.1 Determinación de curvas de Bigot. Se determinó la contracción en el secado de los diferentes tipos de mezcla de los elementos conformados, mediante la elaboración de las curvas de Bigot; registrando el cambio de longitud y de peso, Cada 30 minutos durante 24 horas hasta completar el secado. La temperatura de secado fue de 60°C.

Imagen 15. Secado en horno



Fuente: Autores

3.6 COCCIÓN

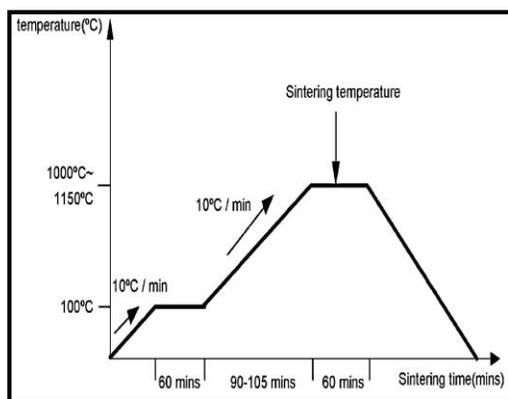
3.6.1 Determinación de curva de cocción. Las curvas de cocción a utilizar fueron determinadas a partir de revisión bibliográfica durante el desarrollo de la investigación. Donde se seleccionaron dos curvas de cocción (ver Figura 9 - Figura 10). Las cuales fueron utilizadas en investigaciones con objetivos similares a esta. La selección de la curva de cocción definitiva se realizó mediante la utilización de dos especímenes referencia, los cuales fueron coccidos a una temperatura de 1000°C.

Después de la cocción, los especímenes fueron evaluados físicamente (textura y Color). Seleccionando el que presentara, mejores resultados en la evaluación física. De esta forma garantizando el desarrollo adecuado de todas las etapas de transformaciones físicas y químicas de los especímenes durante la cocción.

La cocción de los especímenes cerámicos se realizó en un horno mufla marca TERRIGENO referencia MM15, con una temperatura máxima de 1200 °C. De control automático de rampas de temperatura. Lo cual nos permitió la programación completa de la curva de cocción determinada.

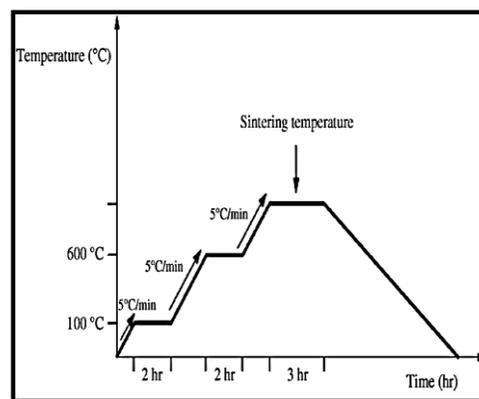
Las muestras fueron coccidas en grupos, que dependían de la temperatura de cocción y el porcentaje de inclusión de ceniza de biosólido. Se realizaron nueve ciclos de cocción con un tiempo de duración que oscilaba entre 10-11 horas, dependiendo de la temperatura máxima de cocción.

Figura 9. Figura Curva de cocción



Fuente: CHIANG, Kung-Yuh; CHIEN, Kuang-Li y HWANG, Sue-Jean. Study on the characteristics of building bricks produced from reservoir sediment. *En:* Journal of Hazardous Materials, Noviembre, 2008 ,Vol. 159, p. 500.

Figura 10. Curva de cocción 2



Fuente: CHIANG. Kung-Yuh, CHOU. Ping-Huai, HUA. Ching-Rou, CHIEN. Kuang-Li, CHEESEMAN. Chris. Lightweight bricks manufactured from water treatment sludge and rice husks. *En:* Journal of Hazardous Materials, (2009) ,vol. 171, p 77.

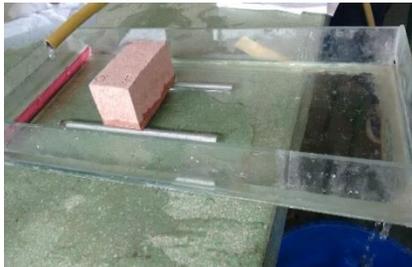
3.7 CALIDAD DE LOS LADRILLOS

Se evaluaron las propiedades de resistencia a la compresión, absorción de agua y tasa inicial de absorción de agua de los elementos fabricados teniendo en cuenta los lineamientos establecidos en las normas técnicas: NTC 4205 (Ingeniería Civil y Arquitectura. Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos) y NTC 4017 (Ingeniería Civil y Arquitectura. Métodos de muestreo y ensayos de unidades de mampostería de arcilla).

3.7.1 Tasa inicial de absorción. Se utilizaron 5 muestras completas para la elaboración de esta prueba, los cuales fueron secados al horno durante 24 horas como lo especifica la norma NTC 4017. Se verificó que los bordes de los especímenes estuvieran libres de partículas sueltas y se pesaron. El ensayo consistió en determinar la masa seca y la masa final del ensayo después de haber transcurrido un minuto. Se empleó un recipiente de vidrio impermeable; que por medio de un vertedero y una manguera que permitía el flujo de agua; se mantuvo constante el nivel de agua a 3 mm de la cara inferior de los ladrillos. Luego se sacó el espécimen y se le retiró el exceso de agua mediante un paño húmedo y se pesó.

3.7.2 Absorción de agua. Se utilizaron 5 muestras secadas al horno a 105°C según lo específica a norma NTC 4017, se les determinó el peso en seco y fueron sumergidos durante 24 horas en agua destilada. Luego fueron retirados y con un paño se les removió el exceso de agua. y antes de pasar 300 segundos fueron pesados.

Imagen 16. Ubicación del ladrillo



Fuente:Autores

Imagen 17. Prueba de nivel



Fuente:Autores

Imagen 18. Absorción de agua



Fuente:Autores

Imagen 19. Elemento puesto en servicio



Fuente:Autores

3.7.3 Resistencia a la compresión. Los ladrillos utilizados para este ensayo fueron 5 unidades secas a 105°C. Para la aplicación de la carga se tuvo en cuenta la dirección en la que los elementos van a estar puestos en servicio (Ver Imagen 19). El procedimiento para la aplicación de la carga fue el siguiente: se aplica una carga inicial hasta la mitad de la máxima esperada (con base en el requisito establecido por la norma NTC 4017). Posterior a esa carga inicial se aplica carga a una velocidad uniforme hasta la falla del elemento, lo anterior en no menos de 60seg ni más de 120seg.

Se analizaron 127 muestras cocidas a 950°C, 1000°C y 1050°C, estos especímenes fueron llevados a una empresa de ingeniería confiable y con certificado para prestar este tipo de servicio, donde posteriormente realizaron el ensayo de resistencia a la compresión para mampostería estructural según la norma NTC 4017.(Ver anexo F)

Una de las propiedades más influyentes en la determinación de la calidad de los elementos cerámicos es la resistencia a la compresión; se tomó como referencia la norma técnica Colombiana NTC 4205, la cual establece unos valores mínimos para variables como: resistencia a la compresión, absorción de agua y tasa inicial de absorción de agua.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERÍA PRIMA

4.1.1 Caracterización del biosólido. En la PTAR EL SALITRE se lleva a cabo un riguroso plan de seguimiento a las características del biosólido generado por la depuración o tratamiento de las aguas residuales; para esto se monitorean periódicamente parámetros físicos, químicos y microbiológicos.

4.1.1.1 Concentración de elementos potencialmente tóxicos en el biosólido. Mensualmente en muestras compuestas se determina la concentración de metales pesados como: Arsénico, Cadmio, Cobre, Cromo, Mercurio, Níquel, Plomo, Selenio y Zinc.

Tabla 9. Comparación con la norma EPA 503.13

PARÁMETRO	CONCENTRACIÓN PTAR EL SALITRE (mg/kg)	CONCENTRACIÓN MÁXIMA EPA 503.13 (MG/KG) ⁹⁸
As	14.22	75
Cd	8.17	85
Cu	188.45	4300
Cr	86.39	57
Hg	4.34	75
Ni	5.89	420
Pb	86.92	840
Se	12.66	100
Zn	1078.96	7500

Fuente: Autores

La norma técnica colombiana 5167, establece los requisitos que deben cumplir y los ensayos a los cuales deben ser sometidos a los productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y como enmiendas de suelo. Fija limitaciones a parámetros como: contenido de metales pesados y calidad microbiológica.

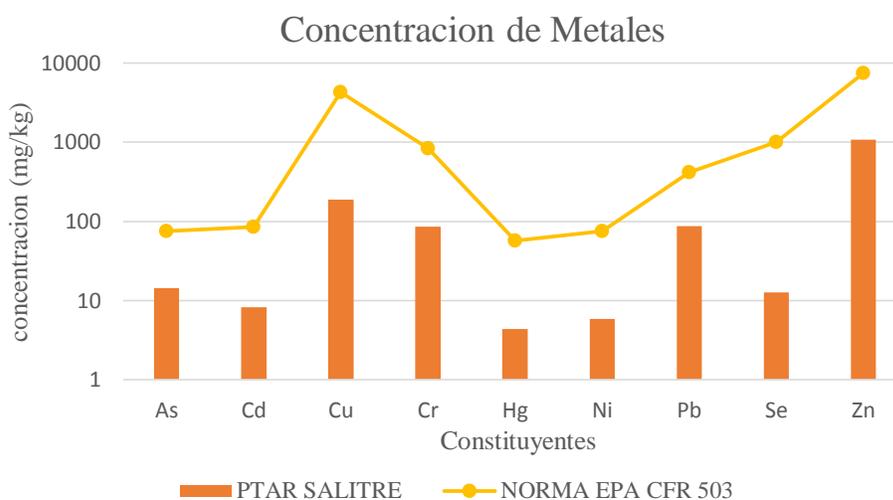
Comparando los valores de concentración promedio de elementos potencialmente tóxicos del biosólido con la concentración máxima permitida por la Norma EPA 503.13 (Ver Tabla 9) es posible concluir que el biosólido de la PTAR EL SALITRE, se mantiene por debajo de los límites máximos permitidos por la norma 503 de la Agencia de Protección Ambiental-EPA. (Ver Gráfica 1).

⁹⁸ ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY. Title 40: Protection of environment: Part 503-Standards for the use or disposal of sewage sludge. 503.13 Pollutant limits.

El biosólido de la PTAR EL SALITRE se clasifica como clase B; material en el cual se detectan patógenos, los cuales han sido estabilizados hasta niveles que no presentan algún riesgo para la salud pública y el medio ambiente. Lo anterior contando con que se tenga control en el manejo y disposición del subproducto.

Para la aplicación del biosólido clase B en los suelos, se deben llevar a cabo medidas de control como restricción al público en las áreas restauradas con este material y la prevención del consumo del material vegetal en animales. Razones como las anteriormente expuestas son una justificación más para la búsqueda de nuevas alternativas de valorización de este residuo producto del tratamiento a las aguas residuales.

Gráfica 1. Concentraciones promedio de metales pesados en el biosólido



Fuente: Autores

4.1.1.2 Caracterización granulométrica del biosólido. Se determinó el contenido de arenas, limos y arcillas del biosólido (Ver tabla 10). Según el sistema de clasificación de suelos de la United States Department of Agriculture (USDA). El biosólido por su textura es un material franco arenoso (Ver Figura 11); con alto contenido de arena, pero con suficiente limo y arcilla para aportarle un poco de cohesión⁹⁹.

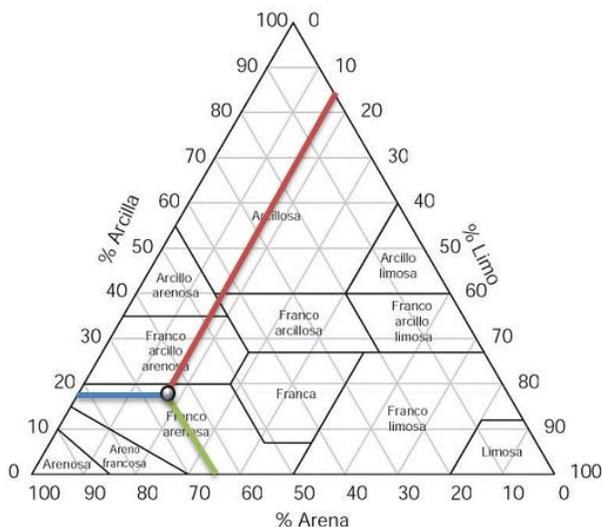
⁹⁹ CASTRO FRANCO, Hugo E. Fundamentos para el conocimiento manejo de suelos agrícolas. Instituto Universitario Juan de Castellanos, Tunja, 1998, p.

Tabla 10. Contenido de finos en el biosólido

CONTENIDO DE FINOS ARCILLA		
Arcilla %	Limo %	Arena %
15.99	18.94	65.06

Fuente: PTAR EL SALITRE

Figura 11. Triangulo textural biosólido



Fuente: Mozo, William, R¹⁰⁰.

4.1.1.3 *Caracterización física del biosólido.* Como se puede ver en la Tabla 11 del contenido de sólidos totales en el biosólido, el 47.29% corresponde a sólidos volátiles; resultado acorde con el contenido de materia orgánica determinado para este material (46.02 %). El contenido de sólidos fijos (minerales de SiO₂) es de 52.7 %, lo cual confirma la naturaleza franco-arenosa del biosólido.

¹⁰⁰ Mozo, W.(2014). *Valorización de biosólido de ptar en la fabricación de ladrillos.* (Tesis de Maestría). Universidad Pedagógica y tecnológica de Colombia, Tunja.

Tabla 11. Resumen: Valores promedio de Sólidos totales, Sólidos Volátiles y Humedad.

CARACTERIZACIÓN FÍSICA BIOSÓLIDO				
Parámetro	pH	Sólidos totales (mg/kg)	Sólidos volátiles (mg/kg)	Humedad (%)
Media	7,97	307218	145307	69,65
Desviación Estándar	0,08	5163	845	0,52

Fuente: PTAR EL SALITRE

4.1.1.4 *Contenido de materia orgánica en el biosólido.* Para la determinación del contenido de materia orgánica en el biosólido se siguió el procedimiento sugerido en la norma INV E -121-07¹⁰¹. Los resultados obtenidos demuestran que el biosólido tiene un 44 % de contenido de materia orgánica. Resultado que se corrobora con la caracterización química en donde el contenido de carbono para el biosólido es de un 46.02 %.

4.1.2 Caracterización física de la arcilla. Se determinó el contenido y distribución del tamaño de partículas de la arcilla a partir del ensayo de granulometría por hidrómetro. Con los resultados obtenidos se construyó la curva granulométrica (Ver Gráfica 2) y se establecieron los porcentajes mostrados en la Tabla 12.

Tabla 12. Distribución granulométrica de la arcilla

CONTENIDO DE FINOS ARCILLA		
Arcilla %	Limo %	Arena %
40	32	28

Fuente: Mozo, William, R¹⁰².

Con el porcentaje de finos obtenidos (arcilla, limos y arenas), se clasificó el material en el triángulo textural de la (USDA) (Ver Figura 12), resultando en un material arcilloso rico en partículas finas (coloides) de comportamiento plástico en estado húmedo y como un material duro y tenaz en estados seco.

¹⁰¹ INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Determinación del contenido orgánico en suelos mediante pérdida por ignición. I.N.V. E -121-07.

¹⁰² Mozo, W.(2014). *Valorización de biosólido de ptar en la fabricación de ladrillos.* (Tesis de Maestría). Universidad Pedagógica y tecnológica de Colombia, Tunja.

4.1.3 Caracterización de los diferentes materiales (Arcilla – ceniza de biosólido – vidrio)

4.1.3.1 *Caracterización química.* Los resultados obtenidos en la caracterización química para las materias primas (arcilla – ceniza de biosólido – vidrio) se presentan en la Tabla 13

Tabla 13. Caracterización química materias primas

Muestra	ELEMENTO								
	O	Al	Si	Fe	K	Ca	SiO ₂	Na	Mg
Arcilla	49,23	8,75	38,72	6,63	-	-	-	-	-
Ceniza de Biosólido	-	3,59	6,41	1,38	1,12	27,64	-	0,17%	1,85
Vidrio (Sódico cálcico)	-	3,0%	-	-	1%	14%	75%	18%	4%

Ar: Arcilla, B: biosólido, V: vidrio, O: oxígeno, SiO₂: **Sílice**, Na: Sodio, Mg: Magnesio Al: Aluminio, Si: Silicio, Fe: Hierro, K: Potasio, Ca: Calcio

Fuente: Autores

En la Tabla 13 se puede ver que el elemento que se encuentra en mayor cantidad en la arcilla es el Silicio (Si) con un 38.72 %; para la ceniza de biosólido el elemento que se encuentra en mayor cantidad es el calcio (Ca) con un 27,64%, valor atribuible al alto contenido de macronutrientes presente en el mismo. En el vidrio el óxido de silicio (SiO₂) llamado comúnmente sílice se encuentra en un 75%, porcentaje que hace parte de la materia prima básica del vidrio. Las fuentes principales de esta materia prima son el cuarzo, las cuarcitas y las arenas silíceas, siendo estas últimas las más utilizadas. El aporte de sílice a la composición vítrea siempre se ha realizado por la adición de arenas de cuarzo en su formulación. El uso de cuarcitas y de areniscas también es posible. Pero en cualquier caso, la arena es la materia prima básica para la obtención de la mayor parte de los vidrios¹⁰⁵. Cuanto mayor es el contenido de SiO₂ mayor es su resistencia química, térmica y mecánica¹⁰⁶.

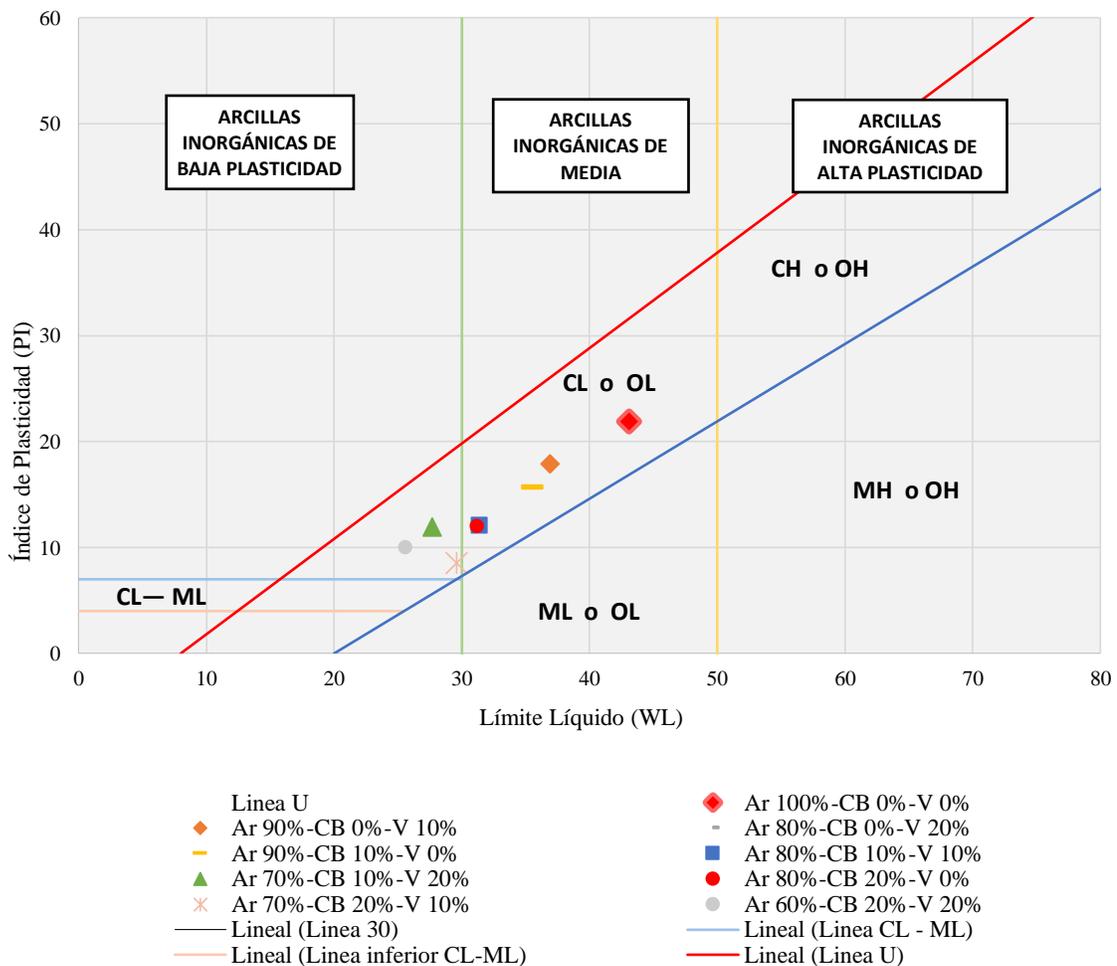
¹⁰⁵ Jesus, M. Materias Primas para la industria del vidrio. Instituto E. Torroja de Ciencias de la Construcción, CSrc

¹⁰⁶ Caselles, M., Gomez, M., Molero, M, y Sarda, Jesus.(2015). *Química aplicada a la ingeniería*. Madrid: Uned.

4.1.3.2 *Plasticidad*. El ensayo de límites de Atterberg (límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad), se usó para establecer el carácter plástico de cada una de las mezclas. La clasificación se realizó según el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) por medio de la carta de plasticidad o diagrama de casa grande.

De los resultados obtenidos se pudo establecer que la mayoría de las mezclas con un contenido bajo de ceniza de biosólido y vidrio, se clasifican como arcillas inorgánicas de media plasticidad (CL) (Ver Gráfica 3).

Gráfica 3. Diagrama de Casagrande



Fuente: Autores

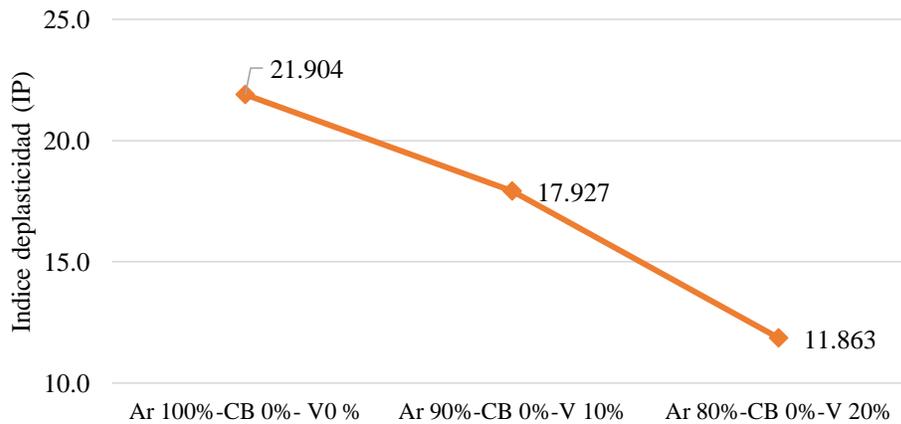
Los resultados de los límites de Atterberg para las mezclas propuestas indican que el incremento de la cantidad de ceniza de biosólido y vidrio se traduce en una disminución de

la plasticidad de las mezclas, debido a su contenido de sílice. Lo anterior, genera facilidades en cuanto al moldeo de la mezcla y mitiga los efectos que se pueden generar en la fase de secado (Ver Gráfica 4 y Gráfica 5).

Para evaluar el efecto del vidrio y la ceniza de biosólido en la mezcla, se determina el índice de plasticidad, se observa que la ceniza de biosólido tiende a disminuir la plasticidad a medida que su adición en la mezcla va aumentando, de igual forma se puede determinar que en el vidrio ocurre un comportamiento similar y proporcional a la disminución de plasticidad.

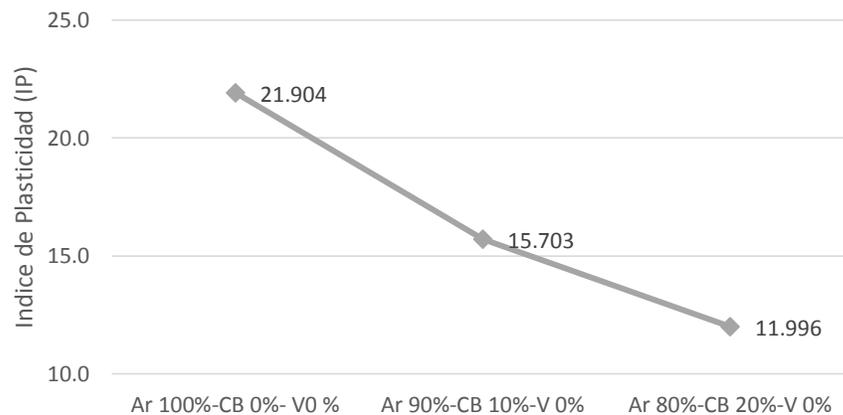
Los resultados de la caracterización de la arcilla y de cada una de las mezclas con adición de ceniza de biosólido y vidrio se muestran en la Tabla 14. (Resultados caracterización materia prima Ver Anexo C)

Gráfica 4. Índice de plasticidad para 0% CB



Fuente: Autores

Gráfica 5. Índice de plasticidad para 0% V



Fuente: Autores

Los resultados de la caracterización física en cuanto a la variable plasticidad ratifican y muestran el efecto de los componentes de cada una de las materias, determinados en la caracterización mineralógica. En la Tabla 14 se demuestra que la ceniza de biosólido y vidrio, disminuyen la naturaleza plástica de la pasta cerámica; como se observa en el índice de plasticidad para las mezclas con 20% ceniza de biosólido y 0-10% vidrio.

Tabla 14. Propiedades físicas de las materias primas

MUESTRA Ar- CB- V	PARÁMETRO		
	Limite Liquido (%)	Limite Plástico (%)	Índice de Plasticidad (%)
100-0-0	43.118	21.214	21.904
90-0-10	36.889	18.962	17.927
80-0-20	30.803	18.940	11.863
90-10-0	35.523	19.820	15.703
80-10-10	31.390	19.295	12.095
70-10-20	27.672	15.735	11.937
80-20-0	31.231	19.235	11.996
70-20-10	29.576	20.997	8.579
60-20-20	25.597	15.570	10.027

Fuente: Autores

4.1.3.3 *Caracterización mineralógica.* En la Tabla 15 se presenta un cuadro comparativo de las diferentes fases mineralógicas identificadas en las muestras con sus respectivos porcentajes en el ensayo de difracción de rayos X.

Tabla 15. Composiciones mineralógicas detectadas en las muestras de materias primas

MINERAL	FÓRMULA QUÍMICA	ARCILLA %	CB %
Cuarzo	SiO ₂	74,0	11
Hematita	Fe ₂ O ₃	-	8.7
Caolinita 1	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	11,0	-
Fosfato de calcio y magnesio	(Ca _{2.589} Mg _{0.411})(PO ₄) ₂	-	14.4
Goethita	FeO(OH)	2,0	-
Aluminosilicatos de calcio y sodio	Ca ₈₅ Na ₁₄ Al _{1.83} Si _{2.16} O ₈	-	33.3
Caolinita 2	Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄	13,0	-
Cristobalita	SiO ₂	-	23.3
Magnetita	Fe ₃ O ₄	-	N.C
Silicato de hierro	Fe ₂ (SiO ₄)	-	2.3

Fuente: Autores

Los resultados encontrados en la caracterización química son acordes con lo que muestra la caracterización mineralógica de las materias primas; existe un alto contenido de cuarzo en la arcilla. El alto contenido de cuarzo (tomado del ensayo de difracción de rayos X) indica un alto contenido de material desgrasante (arena), por su parte en la ceniza de biosólido la concentración de cuarzo es menor debido a que en el proceso de transformación a ceniza estos componentes disminuyen.

Se observa en la Tabla 15 que la muestra de Arcilla corresponde a un material con alto contenido de Cuarzo y de mineral de Caolinita, lo que la hace un material arcilloso apto para la fabricación de piezas cerámicas tradicionales y materiales de construcción entre medianas a altas especificaciones (ladrillos, tejas, mampostería, entre otros).

El contenido de óxidos de hierro (Goethita) es bajo y por ende la coloración de los elementos fabricados con esta arcilla tienden a tornarse de un color pardo claro, como se evidenció con los ladrillos fabricados para esta investigación.

Los resultados de la difracción de rayos x indican que en la ceniza de biosólido de la PTAR El Salitre existe un alto contenido de aluminio silicato de calcio y sodio, y un bajo contenido silicato de hierro Ver Tabla 16.

La técnica de difracción de rayos X permite identificar compuestos en fase cristalina. Entre los compuestos cristalinos identificados el que se detectó con una mayor intensidad fueron los aluminosilicatos de calcio y sodio ($\text{CaNaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) con un porcentaje de 33.3%. Estos son silicatos que pertenecen al grupo de los feldespatos, los cuales representan cerca del 60 % de la corteza terrestre¹⁰⁷ y son el componente esencial de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias. Estos feldespatos se clasifican como plagioclasas que son los feldespatos sódico-cálcicos, donde los cationes presentes son Calcio y Sodio, no contienen Potasio. Pertenecen al grupo mencionado, la albita y la anortita. Varios experimentadores han encontrado estos minerales en cenizas provenientes de diferentes materias primas mediante difracción de rayos X. En el presente estudio se presentan en la ceniza de biosólido, debido a que estos minerales existen en forma cristalina en un rango de temperaturas amplio, desde temperatura ambiente hasta 1500°C, temperatura a la cual inicia su fusión. La presencia de estos minerales genera la plasticidad necesaria para el moldeo, mejora las propiedades

¹⁰⁷ GARCIA-PEREZ, Oscar Daniel et al. Efectividad de productos a base de aluminosilicatos en la detoxificación de dietas contaminadas con aflatoxinas para juveniles de camarón blanco del Pacífico, *Litopenaeus vannamei*. *Cienc. mar* [online]. 2013, vol.39, n.1 [citado 2018-02-02], pp.1-13. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-38802013000100001&lng=es&nrm=iso>. ISSN 0185 3880. <http://dx.doi.org/10.7773/cm.v39i1.2165>.

mecánicas, mejora las propiedades de la suspensión y aporta los componentes para la formación de fases líquidas y cristalinas durante la cocción.¹⁰⁸

Tabla 16. Fases Cristalinas Identificadas en la ceniza de bisolido

	FASE	PDF No.	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalino	Si O ₂	000-85-0796	Cuarzo	11,0%
	Fe ₂ O ₃	000-73-2234	Hematita	8,7%
	(Ca _{2.589} Mg _{0.411}) (P O ₄) ₂	000-87-1582	Fosfato de calcio y magnesio	14,4%
	Ca.85 Na.14 Al1.83 Si _{2.16} O ₈	000-75-1436	Aluminosilicato de calcio y sodio	33,3%
	Fe ₃ O ₄	000-89-0691	Magnetita	N.C
	Si O ₂	000-76-0937	Cristobalita	23,3%
	Fe ₂ (Si O ₄)	000-74-1021	Silicato de hierro	2,3%
Total Cristalino				93,0%
Amorfos y otros				7,0%

Nota:

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

Fuente: Universidad Industrial de Santander, Laboratorio de Rayos X.

Entre los compuestos cristalinos identificados el que se detectó con una considerable intensidad fue el dióxido de silicio, llamado comúnmente sílice. La presencia de sílice en la ceniza de biosólido se debe posiblemente a la existencia de ese compuesto en arena u otros minerales que provienen del río Bogotá y que no fueron removidos en los desarenadores de la PTAR El Salitre y debido a que este se descompone a temperaturas superiores a la trabajada, la descomposición térmica de dicho compuesto se presenta alrededor de los 1600 °C.¹⁰⁹ La presencia de este mineral tiene efectos como disminución de la plasticidad y por tanto disminución de la contracción.

También se detectaron óxidos de hierro, calcio, y de magnesio. Los óxidos de hierro determinados por difracción de rayos X son el óxido férrico (Fe₂O₃) y el óxido ferroso (Fe₃O₄). El óxido férrico es un compuesto presente en la arena, es muy posible que la arena sea la fuente de una parte del óxido férrico presente en la ceniza de biosólido.

El análisis de difracción de rayos X realizado al vidrio presenta una forma general de artefactos muy finos con una forma angular en sus fragmentos, el color reflejado por la

¹⁰⁸ Galán, Emilio y Aparicio, Patricia. Materias primas para la industria cerámica. Universidad de Sevilla. [online]. [citado 13/12/2011]. Disponible de internet:< http://www.ehu.es/sem/seminario_pdf/SEMINARIO_SEM_2_031.pdf >

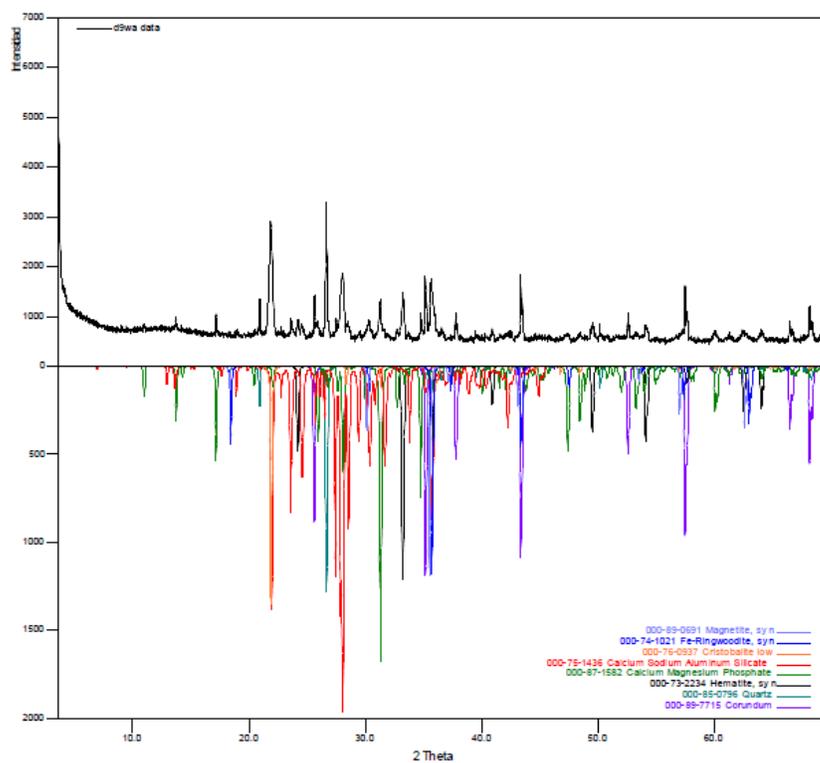
¹⁰⁹ Vasquez. E.,Materiales cerámicos. Propiedades aplicaciones y elaboración. Universidad Autónoma de México. (2005). México, D.F.

muestra está asociado al código de color 5YR 5/8 según tablas de Munsell y presenta mínimos cambios en su color asociados a código de color Gley 1 8/N.

El análisis de difracción de rayos x realizado a la muestra vidrio reveló una presencia de un compuesto totalmente amorfo en su ordenamiento estructural ya que no refleja alguna señal de difracción en el difractograma revelado en el análisis como se observa en la (Grafica 6).

(Los resultados obtenidos de difracción de rayos x del vidrio y la ceniza de biosólido se pueden ver en el anexo B)

Figura 13. Análisis comparativo por difracción de rayos-X de las fases identificadas en la ceniza de biosólido.



Fuente: Universidad Industrial de Santander, Laboratorio de Rayos X.

4.2 DETERMINACIÓN HUMEDAD ÓPTIMA DE COMPACTACIÓN

El contenido óptimo de humedad (MOC) para la elaboración de la pasta cerámica se determinó a través de los resultados obtenidos en la investigación “Titulada fabricación de materiales de construcción a partir de biosólido del tratamiento a las aguas residuales” (Mozo William Ricardo, 2014)¹¹⁰.

El ensayo no se realizó para esta investigación debido a la gran cantidad de material que se pierde en el ensayo, teniendo en cuenta que es escaso el biosólido y su gestión en la PTAR el Salitre es demorada y demanda demasiados trámites administrativos y de logística, para esta investigación el MOC se calcula con un promedio de las humedades obtenidas para cada una de las mezclas; como resultado la totalidad de los elementos cerámicos fueron fabricados con una humedad del 17 %. Esta decisión se tomó con el fin de asegurar una uniformidad en la elaboración de los elementos cerámicos y un control adecuado de esta variable de proceso.

4.3 SECADO

En el proceso de secado se evaluaron dos temperaturas de secado (60 °C y 80 °C); el objetivo de esta evaluación fue determinar una temperatura adecuada para el proceso de secado. Es muy importante saber cuál es la temperatura adecuada para el secado, debido a que, es en esta fase en donde se presentan fisuras y deformaciones por contracción en los elementos, las cuales podrían generar la ruptura de los elementos durante el proceso de cocción.

Los elementos de prueba fueron secados durante 24 horas a 80 °C y 60 °C; las probetas secadas a 80 °C evidenciaron la aparición de fisuras y deformaciones (Ver Figura 14) que daban un indicio de una velocidad de secado muy alta y una diferencia entre la pérdida de humedad del exterior del elemento cerámico y el interior del mismo.

En una segunda prueba se redujo la temperatura de secado a 60 °C, al final del proceso se obtuvieron elementos con mejores condiciones físicas (visuales), no se evidenciaron deformaciones ni fisuras que indicaran problemas en el secado (ver Figura 15); razón por la cual se determinó realizar el secado de la totalidad de los elementos cerámicos a 60 °C.

¹¹⁰ Mozo, W.(2014). *Valorización de biosólido de ptar en la fabricación de ladrillos*. (Tesis de Maestría). Universidad Pedagógica y tecnológica de Colombia, Tunja.

Figura 14. Fisuras en elementos - secado 80 °C



Fuente: Mozo, William, R¹¹¹. Autores

Figura 15. Secado 60 °C



Fuente: Mozo, William, R¹¹². Autores

4.3.1 Curvas de Bigot (Contracción en el secado). Para cada una de las mezclas de arcilla, ceniza de biosólido y vidrio se construyeron curvas de Bigot con el fin de evaluar la evolución de la contracción y pérdida de peso durante la fase de secado a los 60 °C.

En la Gráfica 6 se muestran las curvas de Bigot para cada una de las mezclas propuestas; en ella se puede observar que la contracción máxima fue de 3,58 % y se presentó en los elementos que fueron fabricados con un 80 % de arcilla - 0 % biosólido - 20% vidrio. La mínima contracción obtenida fue para los elementos fabricados a partir de un 70 % de arcilla - 20 % de biosólido - 10% vidrio, su valor fue de 1,74 %.

Los resultados obtenidos demuestran que la incorporación de ceniza de biosólido y vidrio la pasta cerámica disminuye la contracción del secado de los elementos, ver Gráfica 6.

La reducción en el valor de la contracción para los elementos fabricados con ceniza de biosólido y vidrio como materia prima, tiene relación directa con el efecto del residuo en la plasticidad de las pastas cerámicas (Ver Tabla 14). Los resultados demuestran que la ceniza de biosólido y vidrio disminuye la plasticidad de las pastas cerámicas y por ende la contracción que se pueda generar en el proceso de secado; efecto muy positivo pues reduce el riesgo de la aparición de fisuras y deformaciones en el prisma cerámico.

A partir de las curvas de Bigot, se pudo determinar que el tiempo mínimo para alcanzar el punto de humedad crítica es aproximadamente 330 minutos (5 horas y media), tiempo donde la contracción en los elementos alcanza su máximo valor.

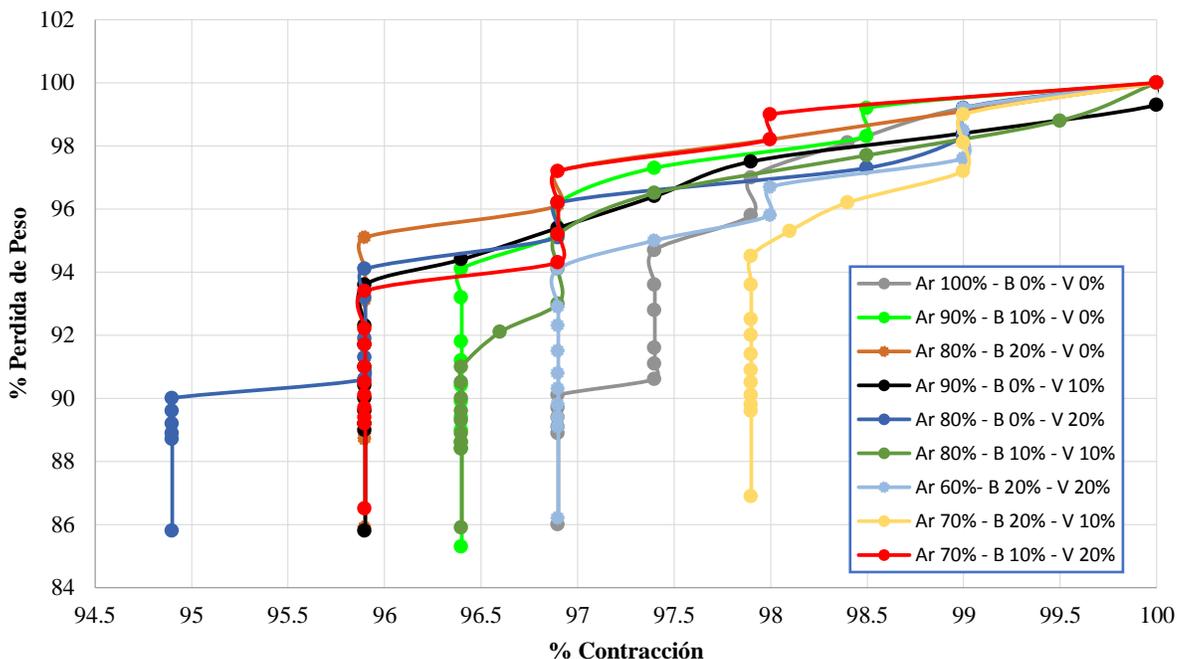
Teniendo en cuenta lo observado se planteó un ciclo de secado compuesto de tres etapas, así: la primera fase de secado se llevó a cabo a temperatura ambiente durante 12 horas; la segunda fase del secado se realizó en un horno a 60 °C durante 12 horas y en la última fase se decidió aumentar la temperatura a 105 °C basados en que la matriz cerámica ya había

¹¹¹ Mozo, William R. Valorización de biosólido de ptar en la fabricación de ladrillos. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.. *Proyecto de Investigación*. 2014.

¹¹² Mozo, William R. Valorización de biosólido de ptar en la fabricación de ladrillos. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.. *Proyecto de Investigación*. 2014.

alcanzado su punto de contracción máxima para ese instante. Con esto el ciclo de secado tuvo un tiempo de duración de 36 horas.

Gráfica 6. Curvas de Bigot



Fuente: Autores

Tabla 17. Punto de humedad crítico

MUESTRA Ar CB V	TIEMPO (min)	WL %	C %
100 - 0 - 0	120	95,8	97,9
90 - 0 - 10	210	93,6	95,9
80 - 0 - 20	330	90,0	94,9
90 - 10 - 0	180	94,1	96,4
80 - 10 - 10	210	92,1	96,6
70 - 10 - 20	240	92,2	95,9
80 - 20 - 0	150	95,1	95,9
70 - 20 - 10	180	94,5	97,9
60 - 20 - 20	210	94,1	96,9

Fuente: Autores

(Los resultados obtenidos de curvas de secado se pueden ver en el anexo A)

4.4 COCCION

En la Figura 16 se muestran dos ladrillos cocidos a partir de las dos curvas de cocción propuestas. Comparando características como color, textura y resistencia a la compresión, se pudo establecer que la curva que mejores propiedades generaba en los elementos cerámicos era la curva 2 (Ver Figura 10). La curva 1 (Ver Figura 9) se descartó debido a la baja resistencia a la compresión y la coloración alterada presentada en el elemento cocido; síntomas de una ineficiente temperatura de cocción o un escaso tiempo de permanencia en la temperatura final de la rampa de cocción.¹¹³(Ver Figura 16).

Seleccionada la curva 2 como la más favorable para el proceso; se presenta en la Gráfica 7 los 3 rangos de temperatura a ensayar: 950°C – 1000°C – 1050°C. Las curvas de cocción mostradas en la Gráfica 7 tienen 3 rampas de temperatura con una tasa de incremento de 5°C/min.

Figura 16. Curva de cocción 1 vs Curva de cocción 2.



Fuente: Mozo, William, R¹¹⁴.

La primera rampa va hasta los 105 °C y se mantiene durante 120 minutos con el fin de evaporar la humedad remanente del proceso de secado.

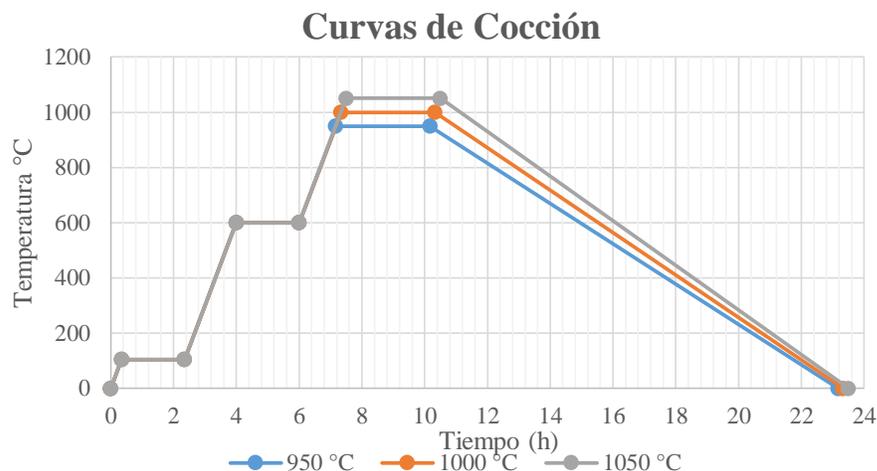
La segunda rampa llega hasta los 600°C y se mantiene durante 120 minutos; en esta etapa se descompone la materia orgánica.

La tercera rampa alcanza la máxima temperatura (950°C-1000°C-1050°C) y se mantiene durante 180 min. Posteriormente la mufla se deja enfriar hasta lograr la temperatura ambiente.

¹¹³ MORALES GÜETO. Op. cit., p. 312.

¹¹⁴ Mozo, William R. Valorización de biosólido de ptar en la fabricación de ladrillos. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. *Proyecto de Investigación*. 2014.

Gráfica 7. Curvas de cocción seleccionadas



Fuente: Autores

(Los resultados obtenidos de curvas de cocción se pueden ver en el anexo D)

4.5 DENSIDAD APARENTE DE LOS LADRILLOS COCIDOS

En la Tabla 18 se presentan los valores promedio de la densidad de los ladrillos cocidos a los 3 niveles de temperatura propuestos (950 °C - 1000 °C - 1050 °C) y fabricados con los 3 porcentajes de incorporación de la ceniza de biosólido y vidrio (0% - 10% - 20%).

Como se puede observar en la Gráfica 8 y la Gráfica 9 las dos variables manipuladas en el estudio (porcentaje de inclusión y temperatura de cocción) tienen influencia directa en la densidad de los elementos cocidos; en las gráficas mencionadas se evalúa el comportamiento que tiene cada materia prima al mezclarse con la arcilla, y el efecto que tiene la temperatura en estas mezclas. Por un lado, el incremento de la densidad en las mezclas que tienen 0% ceniza de biosólido, refleja que el vidrio reduce la porosidad en los elementos a medida que aumenta la temperatura de cocción, lo anterior se atribuye a los componentes del vidrio que permiten disminuir la plasticidad del elemento cerámico, obteniendo una mayor compactación del material (Ver Gráfica 9) y por lo tanto una mayor densidad. También se le atribuye que a una mayor temperatura ocurren transformaciones en la matriz cerámica, como lo es la vitrificación “formación gradual del vidrio que fluye hacia los poros y en parte llena su volumen”¹¹⁵.

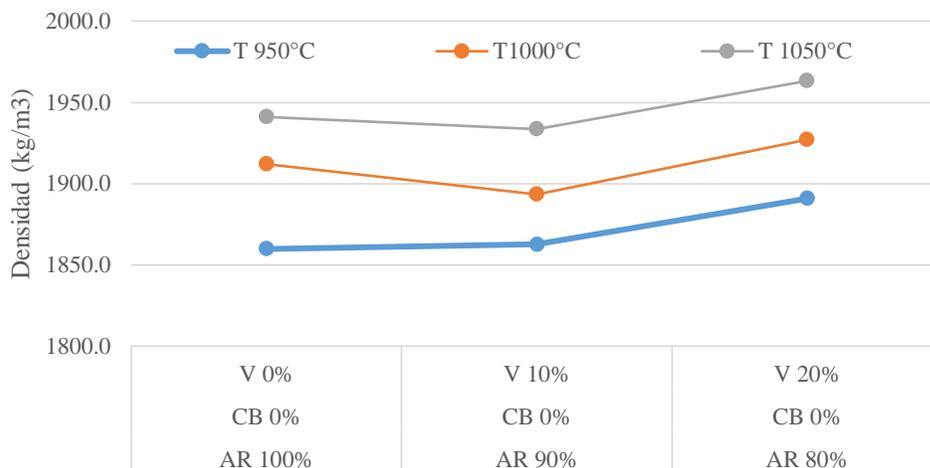
¹¹⁵ CALLISTER, Jr William. Introducción a la ciencia e ingeniería de los Materiales. Vol.1.España: Reverte,1995. 440,p

Tabla 18. Densidad de ladrillos cocidos

MEZCLAS Ar CB V	TEMPERATURA DE COCCIÓN		
	T 950°C	T 1000°C	T 1050°C
	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)
100 – 0 – 0	1859.8	1912.1	1941.0
90 – 0 – 10	1862.5	1897.5	1933.5
80 – 0 – 20	1890.8	1926.9	1963.4
90 – 10 – 0	1826.8	1894.9	1905.1
80 – 10 - 10	1826.9	1872.1	1899.4
70 – 10 - 20	1869.9	1890.0	1895.9
80 – 20 – 0	1813.9	1882.2	1893.5
70 – 20 – 10	1839.4	1869.5	1882.0
60 – 20 – 20	1893.5	1933.8	1855.5

Fuente: Autores

Gráfica 8. Densidad de ladrillos cocidos para 0% CB



Fuente: Autores

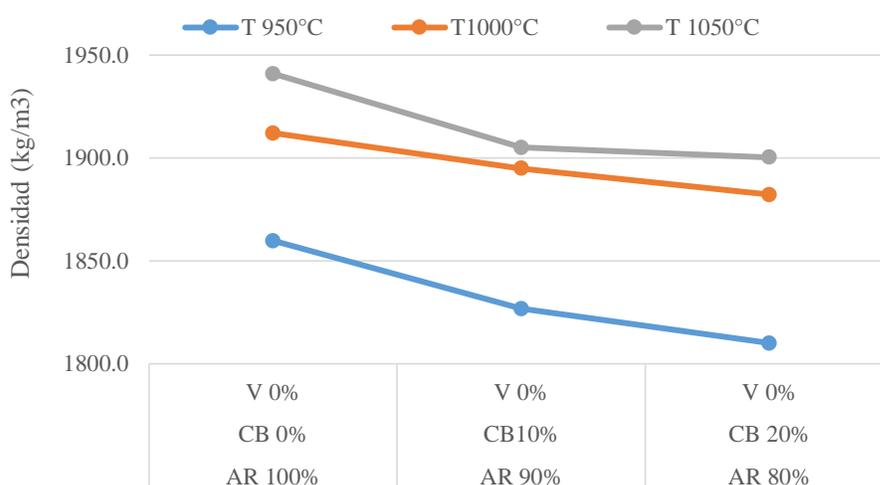
Por otro lado, la densidad aparente de los ladrillos es inversamente proporcional a la cantidad de ceniza de biosólido añadida en la mezcla. Se observa una relación lineal entre la densidad aparente y la proporción de ceniza en la mezcla para las tres temperaturas. Al aumentar el porcentaje de inclusión de la ceniza, se obtiene un elemento cerámico con mayor cantidad de poros, lo cual implicaría un aumento de la absorción de agua y a su vez

un elemento de menor densidad, la porosidad de ladrillo se debe a la materia orgánica restante del proceso de incineración del biosólido que se observa en los resultados mineralógicos por la presencia de carbono. (Ver anexo B).

El incremento de la temperatura y adición de vidrio aumenta la densidad del elemento (Ver Gráfica 8), lo anterior debido a las transformaciones que ocurren en la matriz cerámica al alcanzar las temperaturas máximas de cocción establecidas (950 °C - 1000 °C - 1050 °C), una de ellas es la vitrificación. “Que es la formación gradual del vidrio que fluye hacia los poros y en parte llena su volumen, esta depende del grado de temperatura de cocción y el tiempo”¹¹⁶.

La pérdida de masa que se observa para 20% inclusión de ceniza de biosólido y vidrio, se debe a la exudación del vidrio en la superficie del ladrillo (Ver Imagen 20).

Gráfica 9. Densidad de ladrillos cocidos para 0%V



Fuente: Autores

¹¹⁶ CALLISTER, Jr William. *Introducción a la ciencia e ingeniería de los Materiales*. Vol.1.España: Reverte, 1995. 440.p

Imagen 20. Exudación del vidrio para 20% T 1050°C



Fuente: Autores

Imagen 21. Exudación del vidrio para 10% T 950°C



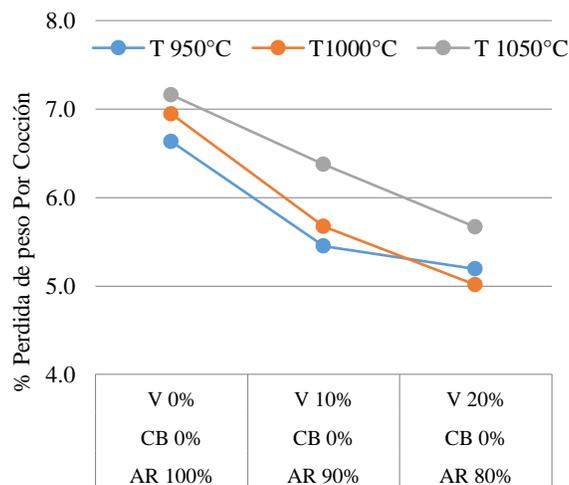
Fuente: Autores

4.6 PÉRDIDA DE PESO DURANTE LA COCCIÓN

4.6.1 Porcentaje de ceniza de biosólido 0%. En la Gráfica 10 se puede ver que para 0% ceniza de biosólido, a medida que aumenta el % de vidrio la pérdida es menor.

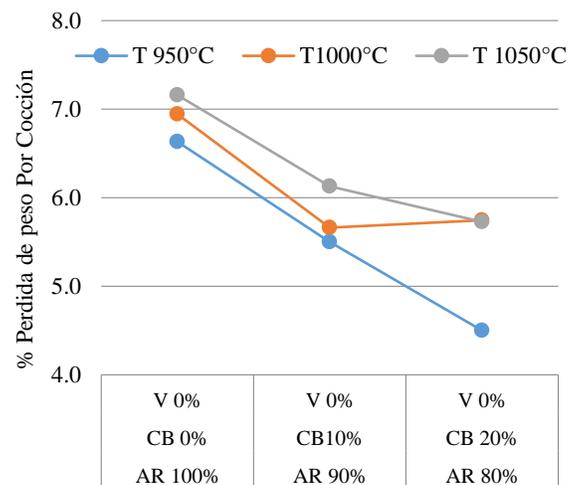
4.6.2 Porcentaje de vidrio 0%. Para 0% de vidrio se puede observar que el incremento en la proporción de la ceniza de biosólido disminuye la pérdida de peso por ignición del ladrillo, es decir que a mayor porcentaje de ceniza de biosólido y vidrio, hay una menor pérdida de peso en el elemento.

Gráfica 10. Pérdida de peso 0% CB



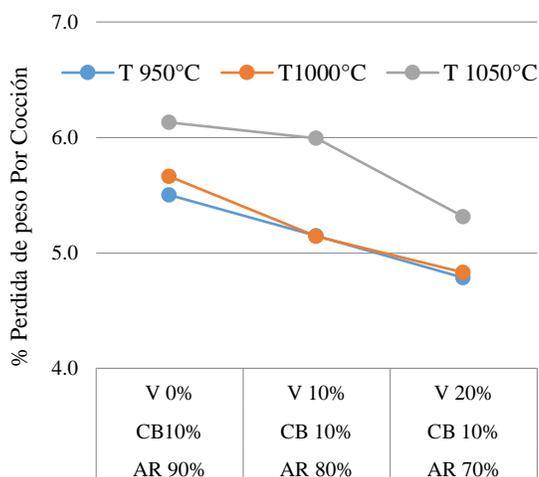
Fuente: Autores

Gráfica 11. Pérdida de peso 0% V



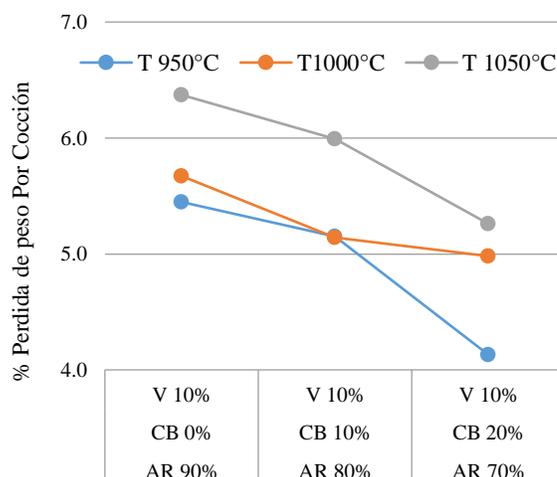
Fuente: Autores

Gráfica 12. Pérdida de peso 10% CB



Fuente: Autores

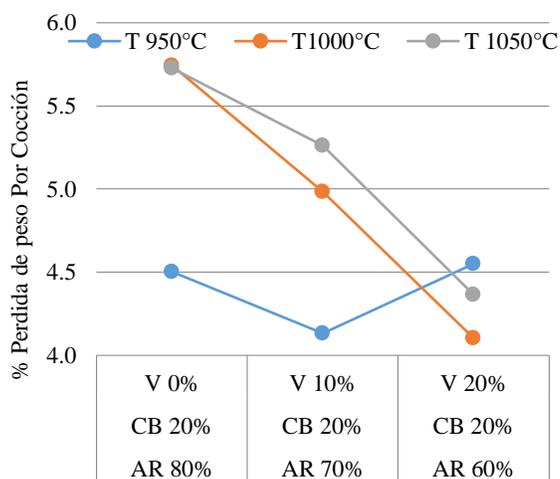
Gráfica 13. Pérdida de peso 10% V



Fuente: Autores

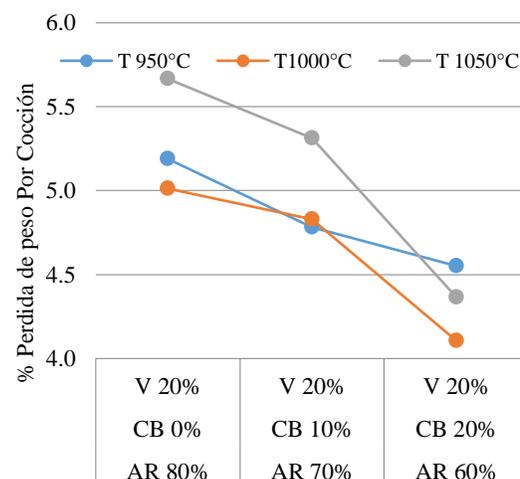
Según (Weng & Lin, 2003), para asegurar la calidad superficial de un ladrillo de arcilla, la máxima pérdida de peso por ignición permitida es del 15 %.¹¹⁷ Como es claro en los elementos obtenidos en esta investigación cumplen a cabalidad este requisito.

Gráfica 14. Pérdida de peso 20% CB



Fuente: Autores

Gráfica 15. Pérdida de peso 20% V



Fuente: Autores

¹¹⁷WENG Chih –Huang, Lin Deng-Fong, CHIANG pen-chi. Op cit, p. 5

Tabla 19. Pérdida de peso por cocción

MEZCLAS Ar CB V	TEMPERATURA DE COCCIÓN		
	T 950°C	T1000°C	T 1050°C
	% WL	% WL	% WL
100 – 0 – 0	6,63	6,95	7,16
90 – 0 – 10	5,45	5,67	6,37
80 – 0 – 20	5,19	5,01	5,67
90 – 10 – 0	5,50	5,66	6,13
80 – 10 - 10	5,15	5,14	5,99
70 – 10 - 20	4,78	4,83	5,31
80 – 20 – 0	4,50	5,74	5,73
70 – 20 – 10	4,13	4,98	5,26
60 – 20 – 20	4,55	4,11	4,36

Fuente: Autores

4.7 CONTRACCIÓN LINEAL EN LOS ELEMENTOS FABRICADOS

En la Tabla 20 se presentan los valores promedio para la contracción de los ladrillos cocidos a temperaturas de (950 – 1000 – 1050) °C, con incorporaciones de ceniza de biosólido y vidrio de (0 - 10 – 20) %. Si se comparan los resultados mostrados en las gráficas (Gráfica 16 - Gráfica 17- Gráfica 18) es posible establecer una relación entre la temperatura de cocción y el (%) de contracción total; a mayor temperatura mayor contracción total. Lo anterior se debe posiblemente a la pérdida del material orgánico presente en la ceniza de biosólido y a la salida de vidrio a la superficie del elemento fabricado.

Como se puede observar en la Tabla 20 tanto el porcentaje de ceniza de biosólido y vidrio, como la temperatura de cocción, son dos variables influyentes en el grado de contracción que los elementos presenten.

La calidad de los ladrillos está relacionada con el grado de contracción en la cocción. Un ladrillo de buena calidad exhibe una contracción por debajo del 8 %.¹¹⁸ Los elementos obtenidos en esta investigación están por debajo de ese umbral; por lo que se puede decir que de algún modo se asegura la calidad de los elementos fabricados con ceniza de biosólido y vidrio.

¹¹⁸ Ibid. p 5.

Además de lo ya mencionado, es importante resaltar que la mayor proporción de contracción se genera en la etapa de secado, por lo que es imprescindible tener un control adecuado en esa fase para evitar posibles casos de agrietamiento en el elemento cerámico

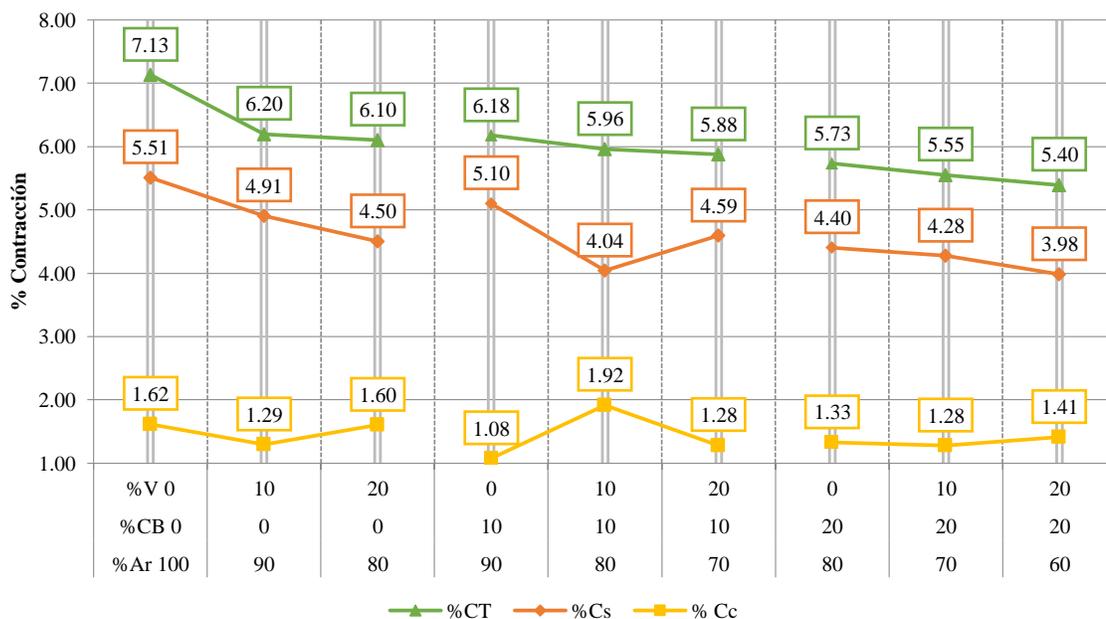
Nota: resultados de las determinaciones en la etapa de cocción ver anexo D.

Tabla 20. Contracción en la cocción

MEZCLAS			TEMPERATURA DE COCCIÓN								
			950°C			1000°C			1050°C		
% Ar	% CB	% V	% Cs	% Cc	% CT	% Cs	% Cc	% CT	% Cs	% Cc	% CT
100	0	0	5,09	1,07	6,16	5,09	1,08	6,16	5,51	1,62	7,13
90	0	10	4,91	1,08	5,99	5,31	1,08	6,38	4,91	1,29	6,20
80	0	20	5,45	1,06	6,52	4,49	1,07	5,56	4,50	1,60	6,10
90	10	0	4,28	1,06	5,34	3,88	1,06	4,94	5,10	1,08	6,18
80	10	10	5,25	1,06	6,32	4,29	1,07	5,35	4,04	1,92	5,96
70	10	20	4,44	1,05	5,50	4,69	1,08	5,77	4,59	1,28	5,88
80	20	0	3,44	1,05	4,49	4,49	1,06	5,55	4,40	1,33	5,73
70	20	10	4,06	1,04	5,10	4,49	1,08	5,57	4,28	1,28	5,55
60	20	20	3,88	1,06	4,95	4,08	1,32	5,40	3,98	1,41	5,40

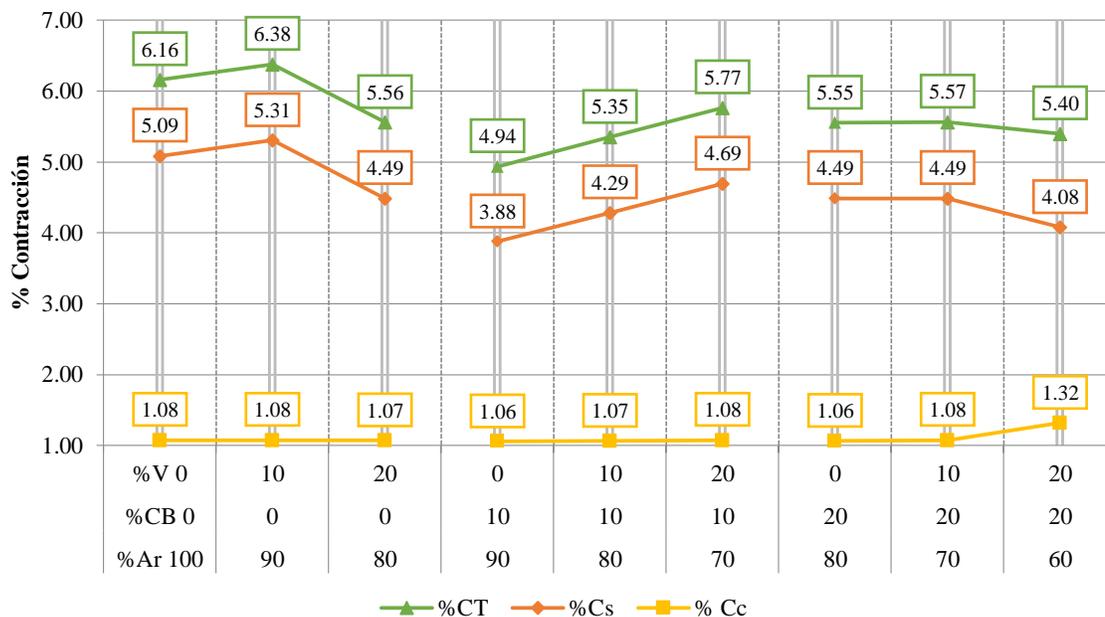
Fuente: Autores

Gráfica 16. Contracción 1050 °C



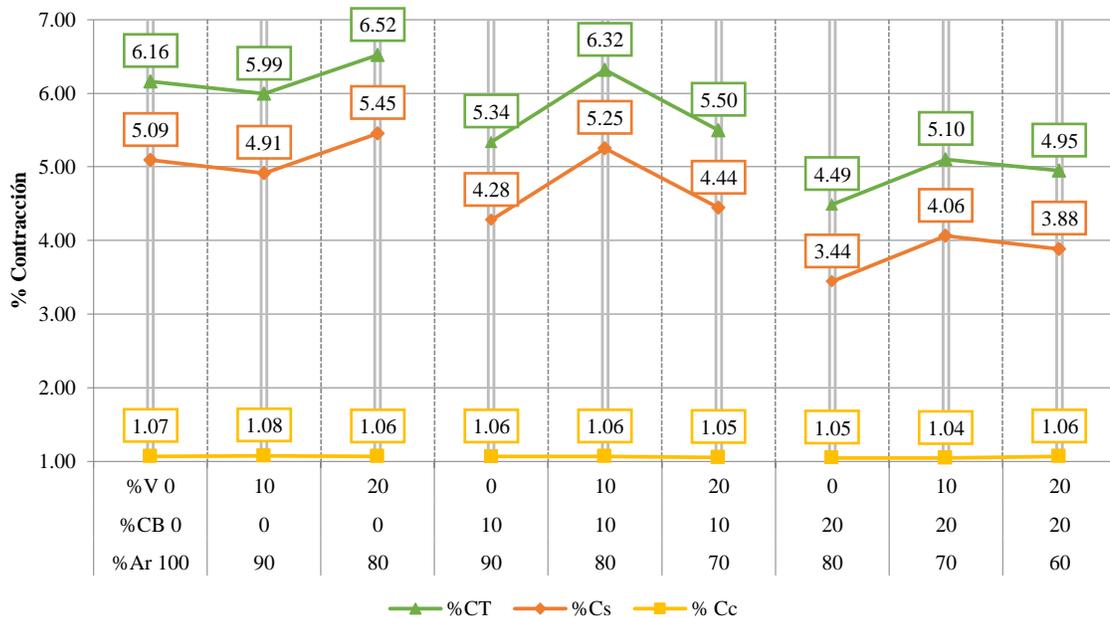
Fuente: Autores.

Gráfica 17. Contracción 1000 °C



Fuente: Autores.

Gráfica 18. Contracción 950 °C



Fuente: Autores.

El porcentaje de contracción más alto es de 7.13 %, se presenta en la mezcla elaborada 100% en arcilla, los demás valores encontrados para las diferentes mezclas son inferiores; lo que demuestra que incluir vidrio y biosólido en cualquiera de las proporciones estudiadas tiene como efecto la disminución de la contracción.

4.8 EVALUACIÓN TÉCNICA DE LA CALIDAD DE LOS LADRILLOS

4.8.1 Tasa inicial de absorción. En la Tabla 21 se muestran los valores promedio de tasa inicial de absorción de agua de 5 unidades elaboradas con los diferentes porcentajes de inclusión de biosólido y las diferentes temperaturas de cocción propuestas. Los ensayos se realizaron con base en lo exigido por la NTC 4017.

De los resultados obtenidos se puede observar el efecto del porcentaje de inclusión (ceniza de biosólido - vidrio) y la temperatura de cocción sobre la variable tasa inicial de absorción de agua. Es posible concluir que la totalidad de las mezclas cumplen con los requerimientos mínimos establecidos por la norma NTC 4205 ya que presentan valores inferiores al máximo permitido (0,25 g/cm²/min).

Tabla 21. Valores de tasa inicial de absorción

TASA INICIAL DE ABSORCIÓN (g/cm ² /min)			
MEZCLAS Ar CB V	TEMPERATURA DE COCCIÓN		
	T 950°C	T 1000°C	T 1050°C
	T.I.A (g/cm ² /min)	T.I.A (g/cm ² /min)	T.I.A (g/cm ² /min)
100 – 0 – 0	0.142	0.120	0.139
90 – 0 – 10	0.078	0.122	0.109
80 – 0 – 20	0.070	0.094	0.055
90 – 10 – 0	0.084	0.140	0.106
80 – 10 - 10	0.111	0.114	0.097
70 – 10 - 20	0.084	0.104	0.091
80 – 20 – 0	0.109	0.102	0.140
70 – 20 – 10	0.117	0.116	0.113
60 – 20 – 20	0.119	0.118	0.147

Fuente: Autores

Teniendo en cuenta lo recomendado por la Norma NTC 4205 (requisitos mínimos de pre-humedecimiento de las unidades de mampostería), se elaboró la Tabla 22 en la que se muestran los tiempos recomendados de pre-humedecimiento para cada uno de los grupos de elementos cerámicos fabricados en el estudio.

Tabla 22. Tiempos recomendados de pre-humedecimiento NTC 4205

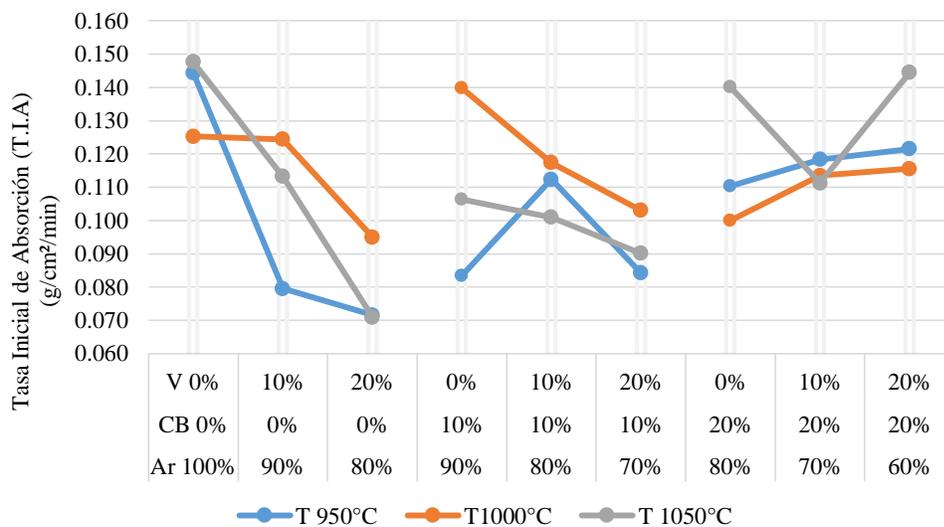
MEZCLAS Ar CB V	TIEMPO RECOMENDADO DE PREHUMEDECIMIENTO		
	TEMPERATURA DE COCCIÓN		
	T 950°C	T1000°C	T 1050°C
100 – 0 – 0	1 h	1 h	1 h
90 – 0 – 10	5 min	1 h	1 h
80 – 0 – 20	5 min	5 min	5 min
90 – 10 – 0	5 min	1 h	1 h
80 – 10 - 10	1 h	1 h	1 h
70 – 10 - 20	5 min	1 h	5 min
80 – 20 – 0	1 h	5 min	1 h
70 – 20 – 10	1 h	1 h	1 h
60 – 20 – 20	1 h	1 h	1 h

Fuente: Autores

Establecer una relación de la T.I.A en los elementos cerámicos elaborados con las variables estudiadas no se evidencia un patrón en las mezclas que permita establecer una relación directa. Lo anterior, se puede estar presentando por la exudación de materiales como el vidrio, que puede quedar expuesto en las caras superficiales de los ladrillos, impidiendo en algunos casos la absorción inicial de agua.

Nota: resultados tasa inicial de absorción de agua para cada unidad ensayada ver anexo E.

Gráfica 19, Tasa Inicial de Absorción



Fuente: Autores

4.8.2 Resistencia a la compresión. Las unidades de mampostería de arcilla cocida deben cumplir con la resistencia mínima a la compresión que se especifica en la NTC 4205, cuando se ensayan según la norma NTC 4017.

En la Tabla 23 se presentan los valores promedio de 5 unidades de cada grupo experimental; ensayadas según lo establecido en la NTC 4017 para la propiedad de resistencia a la compresión.

La norma NTC 4205 exige resistencias a la compresión de 14 MPa para las unidades de mampostería no estructural y de 20 MPa para unidades de mampostería estructural. Teniendo en cuenta lo anterior, las unidades de mampostería fabricadas con los diferentes porcentajes de ceniza de biosólido y vidrio propuestos en la investigación y cocidas a temperaturas de 950 ° C, 1000 ° C y 1050 ° C cumplen con la resistencia a la compresión de 20 MPa; es decir, son materiales aptos para ser usados como mampostería estructural y no estructural.

Tabla 23. Resistencia a la compresión

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (MPa)			
MEZCLAS Ar CB V	TEMPERATURA		
	T 950°C	T1000°C	T 1050°C
100 – 0 – 0	46,44	40,00	52,78
90 – 0 – 10	53,34	46,58	63,34
80 – 0 – 20	51,86	54,36	70,06
90 – 10 – 0	40,66	39,34	45,14
80 – 10 - 10	46,30	34,70	56,12
70 – 10 - 20	46,68	51,00	62,46
80 – 20 – 0	31,54	35,60	41,16
70 – 20 – 10	36,50	32,74	41,38
60 – 20 – 20	28,76	37,10	42,32

Fuente: Autores

Desde el punto de vista de la variable temperatura de cocción se puede establecer según los resultados de (950 – 1050) °C que un incremento en la temperatura de cocción se traduce en el aumento de los valores de resistencia a la compresión en los ladrillos. (Ver Gráfica 20 y Gráfica 22).

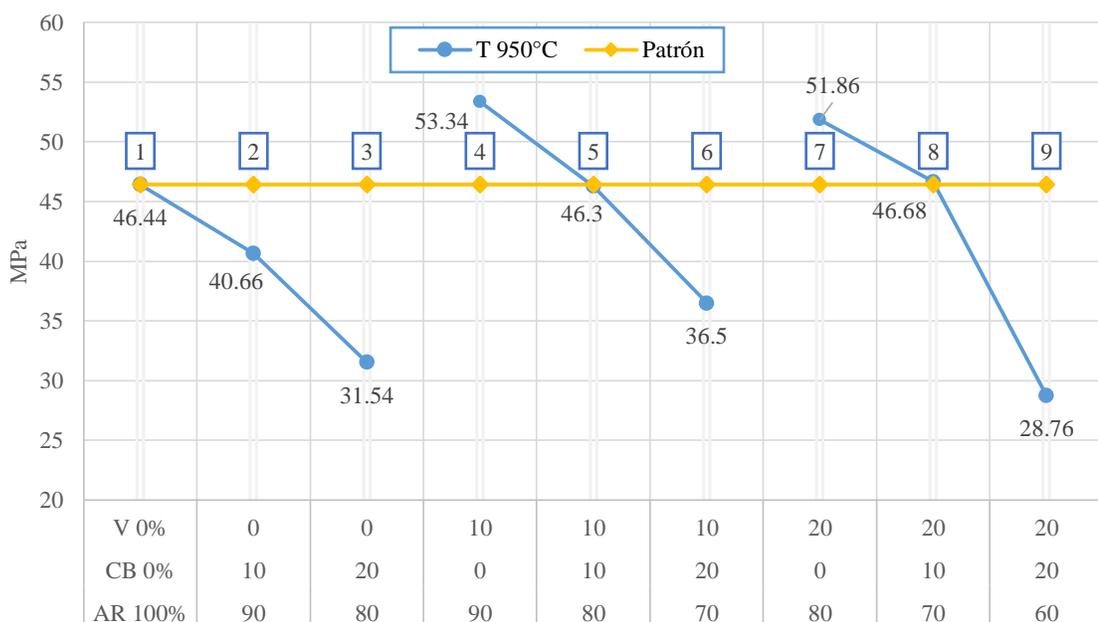
Los elementos fabricados con base en la formulación 4 y 7 (Ver Gráfica 20 y Gráfica 22) presentan los valores más altos de resistencia a la compresión. Son elementos con incorporaciones de 0% cenizas de biosólido y en los que se evidencia un aumento en la resistencia debido a la cantidad de vidrio incorporada. El vidrio está compuesto principalmente por calcio, sodio y sílice; elementos que proporcionan una mayor resistencia al material.

La combinación óptima de ceniza de biosólido y vidrio para obtener ladrillos de buena calidad es del 10% y 20% respectivamente, ya que en cualquiera de las tres temperaturas cumple con lo establecido por la NTC 4205.

Para las mezclas elaboradas con 0% vidrio y los porcentajes (10 y 20) % de ceniza de biosólido se puede observar una disminución de la resistencia con el incremento de CB en la mezcla. Sin embargo, son elementos que cumplen los mínimos exigidos.

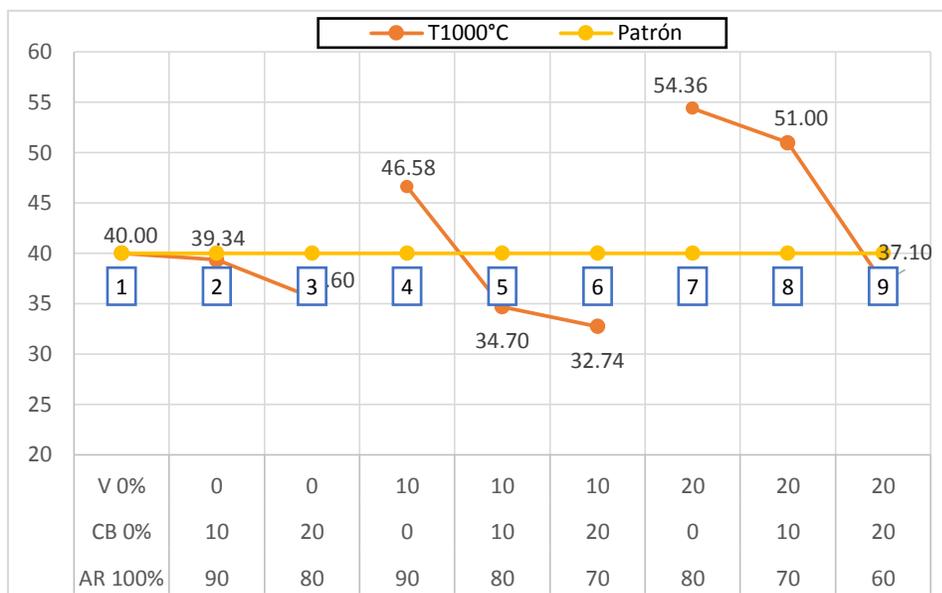
Nota: resultados determinación de la resistencia a la compresión para cada unidad ensayada ver anexo F.

Gráfica 20. Resistencia a la compresión 950 °C



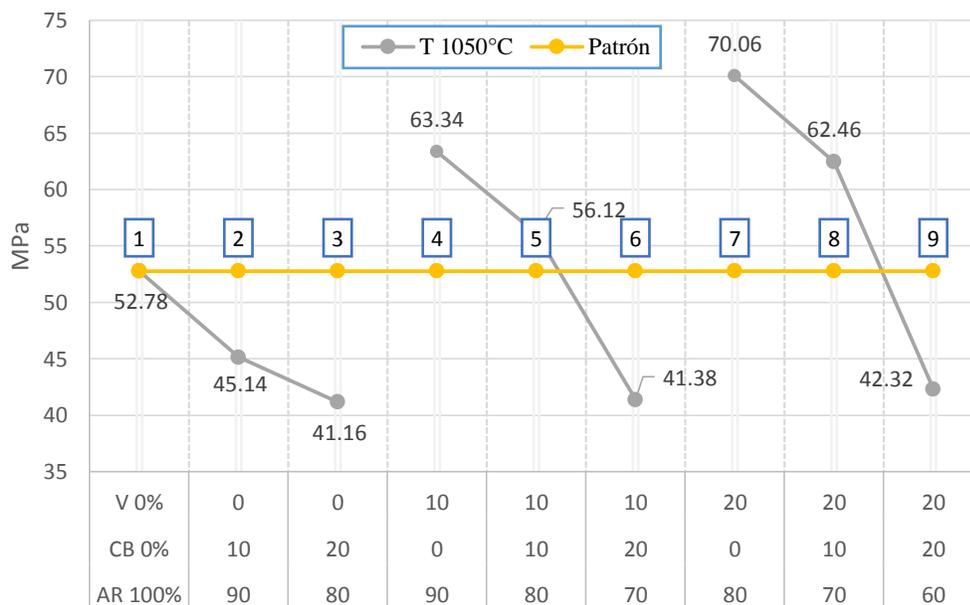
Fuente: Autores

Gráfica 21. Resistencia a la compresión 1000 °C



Fuente: Autores

Gráfica 22. Resistencia a la compresión 1050 °C



Fuente: Autores

4.8.3 Absorción de agua. En la Tabla 24 se muestran los valores promedio de las 5 unidades de mampostería exigidas por la NTC 4205, valores referentes a cada uno de los grupos experimentales propuestos en la investigación. La absorción de agua es un factor importante que afecta la durabilidad de los ladrillos. Un menor porcentaje de absorción de agua se traduce en una mayor durabilidad del ladrillo y una mayor resistencia al ambiente natural.

En la Gráfica 23 y Gráfica 24 que se presentan a continuación, se muestra el grado de cumplimiento de cada una de las mezclas propuestas en esta investigación. Como se puede observar, cualquiera de las combinaciones estudiadas cumple de manera satisfactoria los requisitos para que sean usadas como mampostería NO estructural de uso interior (% de absorción menor al 17%).

Sin embargo, para uso exterior las mezclas en la posición (1 – 4 – 7) elaboradas a (950 – 1000) °C no serían aptas para ser usadas como elementos expuestos al ambiente. Sucede lo mismo con la mezcla en la posición 4 de la gráfica para una temperatura de cocción de 1050 °C.

Respecto a la relación de la temperatura con el % de absorción, se puede concluir que existe una relación inversa entre las dos variables en estudio (mayor temperatura de cocción – menor % de absorción).

Tabla 24. Absorción de agua

MEZCLAS Ar CB V	TEMPERATURA DE COCCIÓN		
	T 950°C	T1000°C	T 1050°C
	T.A %	T.A %	T.A %
100 – 0 – 0	15.383	14.913	13.252
90 – 0 – 10	12.671	12.788	11.592
80 – 0 – 20	11.652	11.516	7.473
90 – 10 – 0	14.860	13.973	14.826
80 – 10 - 10	12.974	12.765	9.849
70 – 10 - 20	11.007	8.989	9.240
80 – 20 – 0	14.562	14.158	13.300
70 – 20 – 10	13.470	13.148	11.592
60 – 20 – 20	12.233	9.428	8.828

Fuente: Autores

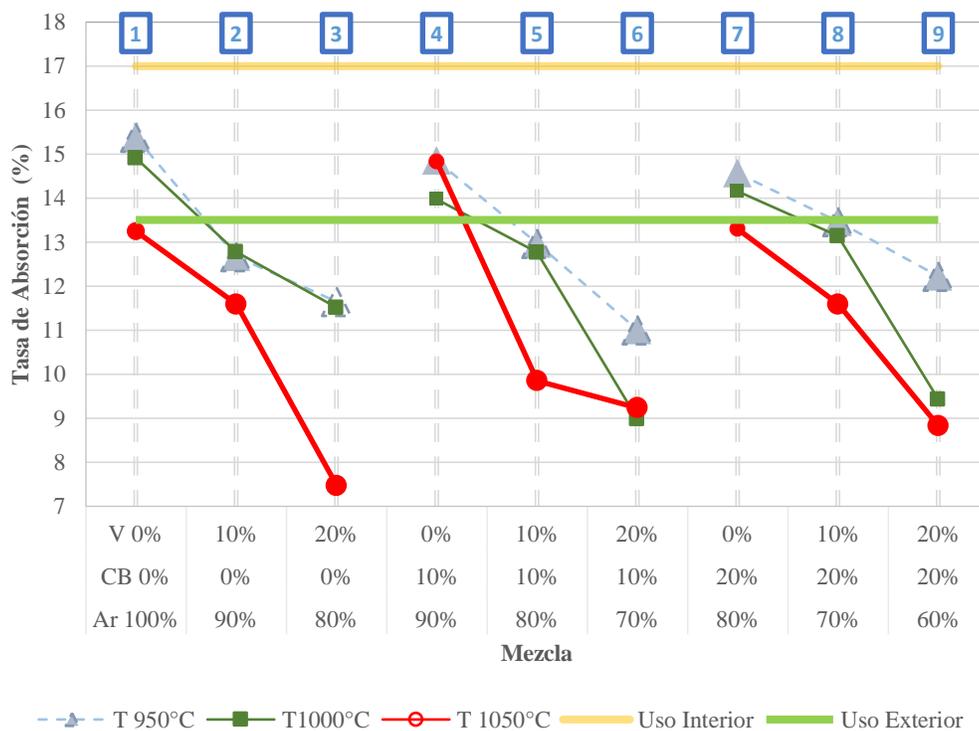
En la Gráfica 23 se ve claramente el efecto positivo que el vidrio genera en los valores de % de absorción, la relación sería a mayor porcentaje de vidrio en la mezcla menor % de absorción en los elementos elaborados. Lo anterior se debe a que el vidrio es un material fundente que a medida que aumenta la temperatura se vuelve más líquido, llenando los poros presentes en la matriz, evitando así el ingreso de agua al elemento cerámico.

Ahora, si se evalúa el efecto que tiene la ceniza de biosólido en el % de absorción, analizando los resultados obtenidos, es posible concluir que un incremento en el % de ceniza en la mezcla, se traduce en aumento de la porosidad de los elementos (en comparación con el blanco, posición 1 en la Gráfica 23), lo anterior se debe a la presencia de materia orgánica que se quema a las altas temperaturas de cocción propuestas en la investigación. Lo anterior, es un indicio de un proceso de incineración ineficiente para la obtención de las cenizas; esto es posible comprobarlo a partir del análisis SEM realizado a uno de los elementos con mejores propiedades mecánicas, en él se encontró un porcentaje considerable de carbono (alrededor de un 30%).

En cuanto al uso como mampostería estructural, se puede concluir que para uso exterior, no son aptas las mezclas del grupo (1 – 4 – 7) elaboradas a (950 – 1000)°C; así como los elementos elaborados a 1050 °C de la combinación 4 (Ver Gráfica 24). Lo anterior, teniendo en cuenta lo establecido en la NTC 4205 para % de absorción de agua.

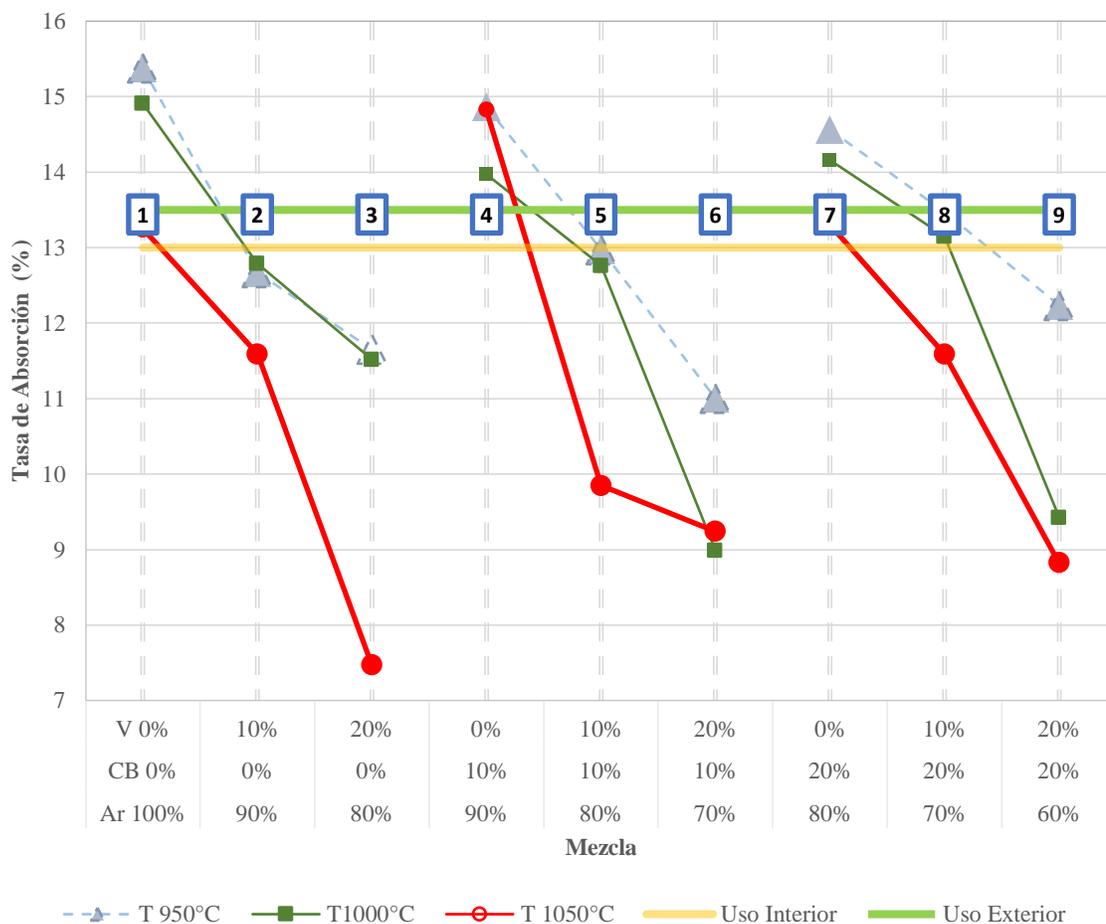
Nota: resultados absorción de agua para cada unidad ensayada ver anexo G.

Gráfica 23. Absorción de agua en la mezclas propuestas – mampostería no estructural



Fuente: Autores

Gráfica 24. Absorción de agua en la mezclas propuestas – mampostería estructural



Fuente: Autores

4.9 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

Se puede observar la composición química de la mezcla en la Tabla 25, este espécimen fue analizado por microscopia electrónica de barrido o SEM (Scanning Electron Microscopy).

Tabla 25. Caracterización química de la mezcla Espectro 1.

MUESTRA Ar CB V	ELEMENTO	PESO %	PESO %	ATÓMICO%
70 – 10 -20			Sigma	
	C K	38,08	1,54	49,97
	O K	36,59	1,32	36,04
	Al K	7,51	0,33	4,39
	Si K	16,39	0,56	9,2
	Fe K	1,43	0,23	0,4
	Total	100		100

O: oxígeno, Al: Aluminio, Si: Silicio, Fe: Hierro, C: Carbono

Fuente: Autores

Tabla 26. Caracterización química de la mezcla Espectro 2.

MUESTRA Ar Cb V	ELEMENTO	PESO %	PESO %	ATÓMICO%
70 -10 - 20			Sigma	
	C K	33,05	1,53	59,45
	O K	11,55	1,03	15,59
	Na K	0,92	0,31	0,86
	Al K	2,01	0,24	1,61
	Si K	5,51	0,32	4,24
	Ca K	0,49	0,16	0,27
	Fe K	46,47	1,28	17,98
	Total	100		100

O: oxígeno, Na: Sodio, Al: Aluminio, Si: Silicio, Fe: Hierro, Ca: Calcio, C: Carbono

Fuente: Autores

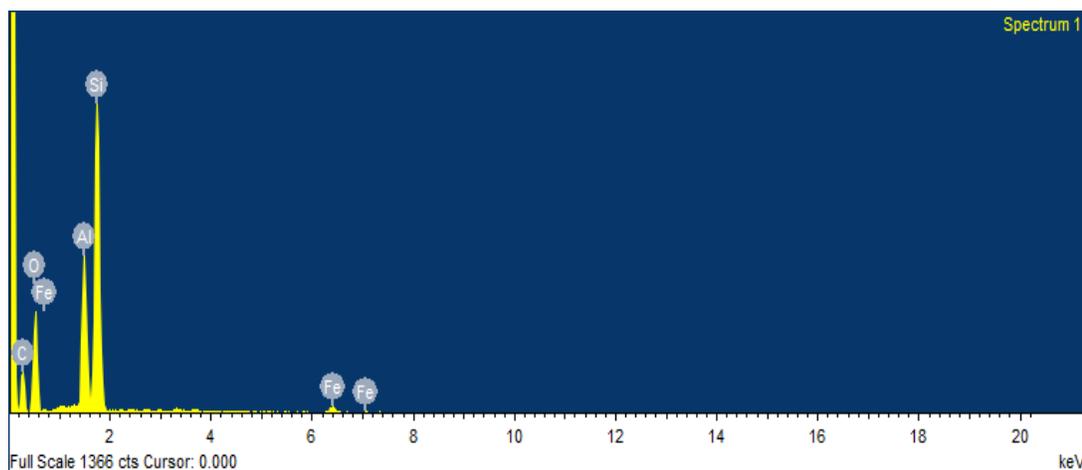
4.9.1 Análisis SEM para el elemento con mejores propiedades. El elemento utilizado para este ensayo está compuesto por 70% Arcilla, 10% de Ceniza de Biosólido y 20% de vidrio. Según la evaluación técnica es la mezcla que presenta mejor comportamiento, en cuanto a resistencia a la compresión, tasa de absorción y tasa inicial de absorción.

Se realizó una técnica puntual a 40 micras, donde no hay una muestra exacta de la cantidad de elementos que se encuentra en el elemento cerámico y no se evidencia una forma

definida. En el punto analizado se determinan ciertos elementos y su porcentaje de peso como se observa en la Tabla 25 y Tabla 26; de los elementos encontrados se evidencia presencia de carbono, esto se debe a que en la temperatura de cocción del ladrillo analizado (950 °C) todavía hay materia orgánica presente, estando ahí en forma de carbono.

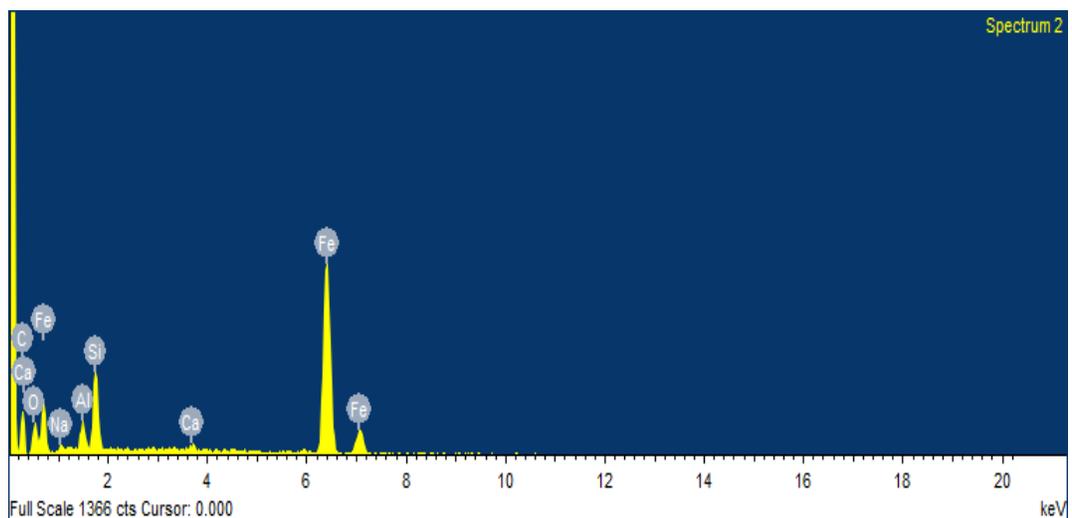
Es necesario por medio de otra técnica hacer un ensayo a todo el ladrillo para observar con más claridad los componentes mineralógicos resultantes en el elemento cerámico.

Figura 17. Spectro 1



Fuente: Autores

Figura 18. Spectro 2

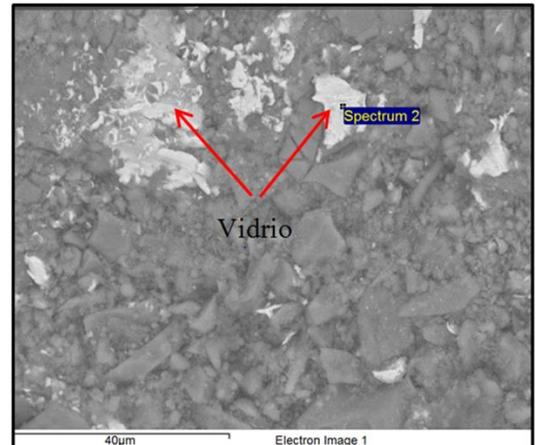


Fuente: Autores

Imagen 22. Microscopia electrónica, Espectro 1.



Imagen 23. Microscopia electrónica, Espectro 2.



Fuente: Autores

La Imagen 22 y Imagen 23 muestran las micrografías SEM de los ladrillos con mejor comportamiento en cuanto a la evaluación técnica (70 Ar – 10 CB – 20 V), se observa una cantidad considerable de vidrio en la muestra analizada, posiblemente se puede inferir que en ese punto de análisis el vidrio tiende a saturarse durante la cocción y ocurre exudación del material hacia la superficie del elemento, la saturación es proporcional a la cantidad de vidrio añadido a la mezcla como se evidencia en las imágenes.

De igual forma en las imágenes se puede inferir que los granos de cristal, actúan de forma independiente, permaneciendo incrustados en el elemento cerámico después de cocción, confirmando el papel del vidrio como relleno en el cuerpo del ladrillo. Esta inferencia se puede confirmar si se realiza un ensayo que abarque una concentración mayor de la muestra.

Nota: los resultados obtenidos en las micrografías se pueden observar en el Anexo H

CONCLUSIONES

Los resultados de la caracterización química, física, mineralógica y el efecto observado en el proceso de secado de los elementos; son base fundamental para concluir que la pasta (ceniza de biosólido – vidrio reciclado) pueden ser usados como materiales desgrasantes en la elaboración de ladrillos, debido a su contenido en sílice, disminuyendo la plasticidad a la pasta cerámica, de esta manera minimizando los riesgos de producirse fisuras y deformaciones en el ladrillo durante el proceso de secado.

El proceso de secado es una de las etapas más importantes dentro de la elaboración de los elementos cerámicos; aproximadamente el 80% de la contracción total se genera durante esta fase del proceso de fabricación, el restante se presenta durante la cocción.

La incorporación de vidrio en la pasta cerámica tiene efectos como:

- Disminución contracción; a medida que se incorporó vidrio reciclado se reduce la contracción en el proceso de cocción y secado, de esta forma disminuye el riesgo de aparición de grietas y defectos dimensionales en los ladrillos. Efecto favorable para la calidad de estos.
- Aumento de la resistencia a la compresión; cumpliendo en los tres niveles evaluados (10 % y 20 %) con las exigencias de las normas técnicas (NTC 4205). Efecto muy positivo teniendo en cuenta que este es el requisito más importante para determinar la calidad de los ladrillos.
- Disminución de la plasticidad; lo que genera una reducción en la contracción durante el proceso de secado y minimiza los riesgos de generación de fisuras y deformaciones durante el mismo.
- Disminución absorción de agua; este efecto desde el punto de vista de la calidad de los elementos favorable, pues un porcentaje de absorción de agua inferior al de la norma se traduce en una mayor durabilidad del ladrillo (mayor resistencia al ambiente natural).
- Disminución de la temperatura de cocción; debido al ser un material fundente los ladrillos alcanzan a cumplir las especificaciones técnicas a una temperatura de 950°C y al complementarlo con la adición de ceniza de biosólido se obtienen elementos de mejor calidad.
- Disminución de porosidad; el vidrio reduce la porosidad en los elementos a medida que aumenta la temperatura de cocción, obteniendo un elemento de mayor compactación y por lo tanto una mayor densidad.
- Los elementos cerámicos con inclusión de vidrio presentan en su superficie acumulación de partículas de vidrio a medida que aumenta el porcentaje añadido y la temperatura de cocción, para disminuir ese efecto se debe utilizar una partícula más pequeña de vidrio.

La incorporación de ceniza de biosólido en la pasta cerámica tiene efectos similares producidos por el vidrio reciclado: disminución de plasticidad, disminución de la contracción, disminución peso ladrillos y disminución temperatura de cocción. En cuanto a la resistencia a la compresión disminuye con el aumento de la proporción en ceniza de biosólido.

La unidad de mampostería compuesta por una mezcla de 70% Arcilla, 10% ceniza de biosólido y 20 % Vidrio, cocida a una temperatura de 1050 ° C; evidenció los mejores resultados en los ensayos de propiedades físicas realizados en la investigación. Un porcentaje de absorción de 9,24% y una resistencia a la compresión de 62,46 MPa, muestran el cumplimiento de las exigencias de la NTC 4205 respecto a las variables aquí relacionadas.

La incorporación de ceniza de biosólido y vidrio reciclado, como materia prima en la fabricación de ladrillos de arcilla cocida, arrojó resultados positivos en la resistencia a la compresión de los elementos cerámicos a diferentes temperaturas (950°C, 1000°C y 1050°C).

Las unidades de mampostería elaboradas con una incorporación de hasta un 20% de ceniza de biosólido y vidrio, pueden ser utilizadas como mampostería no estructural de uso interior y exterior, según los requisitos que establece la norma NTC 4205.

Los resultados de esta investigación desde el punto de vista técnico han demostrado que se puede incluir ceniza de biosólido y vidrio reciclado, como materia prima en la fabricación de ladrillos de arcilla cocida, controlando el porcentaje de inclusión y la temperatura de cocción.

De los resultados obtenidos en DRX para la ceniza de biosólido se encontraron minerales como los feldespatos sódicos – cálcicos (materiales fundentes) que pueden ser usados para la fabricación de ladrillos a un menor punto de fusión, es decir obteniendo elementos con unas resistencias adecuadas a temperaturas menores.

La ceniza de biosólido y el vidrio reciclado, son materiales que pueden reemplazar parcialmente a la arcilla.

La resistencia a la compresión de los elementos disminuye con el aumento de ceniza de biosólido, pero aumenta con la incorporación de vidrio en el elemento cerámico.

RECOMENDACIONES

- Disminuir el tamaño de la partícula del vidrio, para evitar un aumento en la exudación del mismo hacia la superficie lo que posiblemente se traduciría en elementos de mayor calidad y mejor apariencia.
- Se recomienda para futuras investigaciones disminuir la temperatura de cocción, lo cual generaría un menor uso de energía en el proceso de cocción; lo anterior se basa en los resultados obtenidos en cuanto a resistencia a la compresión.
- Controlar la temperatura de enfriamiento de los elementos cocidos, evitando cambios bruscos de temperatura que puedan generar una solidificación súbita de las partículas de vidrio.
- Se recomienda realizar el ensayo de TCLP (Toxicity characteristic leaching procedure) para determinar si hay una posible lixiviación de metales pesados en los elementos cerámicos finales.

BIBLIOGRAFÍA

DAS, Braja. Fundamentos de ingeniería geotécnica. México. 1999. Editorial THOMSON. 594 p. ISBN 970-686-061-4.

DÍAZ RODRÍGUEZ, L. A y TORRECILLAS, R. Arcillas cerámicas: una revisión de sus distintos tipos, significados y aplicaciones. En: Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. Septiembre – Octubre, 2002, Vol.41, Núm.5, p. 459-470.

ELÍAS, Xavier. 3ª Parte la fabricación de los materiales cerámicos. Curso optimización de procesos cerámicos industriales. Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, 2001.

EPAM. (2008). Construcción de criterios técnicos para el aprovechamiento y valorización de residuos sólidos orgánicos con alta tasa de biodegradación, plásticos, vidrio, papel y cartón. Bogotá.

EPA. (1994) A Plain English Guide to the USEPA Part 503 Biosolids Rule.

FERNÁNDEZ, J.M, (2003), *El vidrio*. España: Consejo Superior de Investigaciones Científicas Sociedad Española de Cerámica y Vidrio.

GIPPINI, E, Pastas cerámicas. Instituto Eduardo Torrojo de la Construcción y el Cemento. Madrid, España, 1979

HIDALGO, D. & Poveda, R. (2013). Obtención de adoquines fabricados con vidrio reciclado como agregado. Escuela Politécnica nacional, Quito.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN, ingeniería civil y arquitectura. Dimensiones modulares de unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos. NTC 296. Bogotá, D.C.: ICONTEC, 2000. 3 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN, ingeniería civil y arquitectura. Coordinación modular de la construcción. Bases, definiciones y condiciones generales. NTC 45. Bogotá, D.C.: ICONTEC, 1981.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Gestión ambiental. Calidad de agua. Parte 13: Guía para el muestreo de lodos de aguas residuales y plantas de tratamiento de aguas. NTC - ISO 5667-13. Bogotá D.C.: El instituto, 1998.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Ingeniería civil y arquitectura. Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos. NTC 4205. Bogotá, D.C.: ICONTEC, 2000.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Ingeniería civil y arquitectura. Métodos de muestreo y ensayos de unidades de mampostería de arcilla. NTC 4017. Bogotá, D.C.: ICONTEC, 2000.

LÓPEZ. T. & Martínez, A. (2000). El mundo mágico del vidrio. México: fondo de la cultura económica.

METCALF & EDDY. Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento vertido y reutilización. Ed. Mc Graw Hill.3ed.vol.1.

MORALES GÜETO, Juan. Tecnología de los materiales cerámicos. Consejería de educación. Comunidad de Madrid. Díaz de Santos.2005. p 278.

MORALES PÉREZ, Yeimy Liceth y NIÑO CACERES, Zulma Patricia. Estudio de los efectos térmicos en velocidad y tiempo durante la etapa de cocción de las arcillas en San José de Cúcuta para estudiar los requerimientos energéticos. Trabajo de grado, ingeniero químico. Bucaramanga: universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Química, 2006. 5-6 p

NAVARRO, C. R. (2008). Evaluacion de la potenciabilidad del uso de biosolidos originados en las plantas de tratamiento de aguas servidad en la fabricación de ladrillos. CONAMET/SAM, 9.

NORMA, I.N.V. E – 121 – 07, Determinación del contenido orgánico en suelos mediante pérdida por ignición.

NORMA, I.N.V. E – 124 – 07, Análisis granulométrico por hidrómetro.

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

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

RAHAMAN, M.N. Ceramic Processing and Sintering.2 ed. Marcel Dekker Inc, 2006. 31 p.

RAMALHO, R.S. Tratamiento secundario: el proceso de lodos activados. En: Tratamiento de aguas residuales. Bogotá. Editorial Reverté S.A. 1993. p. 253-409.

ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Tratamiento de Aguas Residuales. Teoría y principios de diseño. Ed. escuela colombiana de ingenieros.(2004).

SINIA. Servicio del manejo y gestión de residuos sólidos. Reciclaje y disposición segura de los residuos, Ministerio de ambiente. Perú.

TECNOLOGÍA CERÁMICA APLICADA / SACMI; Asociación Española de Técnicos Cerámicos; traducción del italiano por Arnold van Gelder. – Castellón de la Plana: Faenza Editrice Ibérica, 2004.

ARTÍCULOS DE REVISTAS CIENTÍFICAS

Abbas Mohajerani, John Vajna, Tsz Ho Homan Cheung, Halenur Kurmus, Arul Arulrajah, Suksun Horpibulsuk, Practical recycling applications of crushed waste glass in construction materials: A review, En: Construction and Building Materials (2017), doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.09.005, Vol. 156, p. 443-467.

Benlalla, M. Elmoussaouiti, M. Dahhou, M. Assafi, Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics bricks, En: Applied Clay Science (2015), doi:10.1016/j.clay.2015.09.012, Vol. 118, p. 171-177.

Fernanda Andreola, Luisa Barbieri, Isabella Lancellotti, Cristina Leonelli, Tiziano Manfredini, Recycling of industrial wastes in ceramic manufacturing: State of art and glass case studies, En: Ceramics International (2016), doi:10.1016/j.ceramint.2016.05.205. Vol. 42, p. 13333-13338.

C. Cardenas. E. Sebastian. K. Elert. M. De La Torre. O. Cazala. N. Rodriguez. Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks. Journal of the European Ceramic Society. 2004. p 547-564.

C. Weng., D. Lin., P. Chiang., Utilization of sludge as brick materials. En: Advances in Environmental Research. 2003. p.679–685.

Callister junior, William D. Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. Traducido por Dr. Pere Molera Solá. 3 ed. Barcelona (España): Editorial Reverté. 2002. p 387.

Castro Franco, Hugo E. Fundamentos para el conocimiento manejo de suelos agrícolas. Instituto Universitario Juan de Castellanos, Tunja, 1998, p.

Cultrone, G., & Sebastian, E. Cenizas Volantes En Los Materiales Arcillosos Para Mejorar La Calidad De Los Ladrillos Macizos. (2008). Science Direct, 7.

D. Eliche-Quesada, J. Leite-Costa, Use of bottom ash from olive pomace combustion in the production of eco-friendly fired clay bricks, En: Waste Management (2016), doi:10.1016/j.wasman.2015.11.042, Vol. 48, 2016, p.323-333.

D. Eliche-Quesada, M.A. Felipe-Sesé, J.A. López-Pérez, A. Infantes-Molina, Characterization and evaluation of rice husk ash and wood ash in sustainable clay matrix bricks, En: Ceramics International (2017), doi:10.1016/j.ceramint.2016.09.181. Vol. 43, p. 463-475.

Environmental Technology & Innovation(2017), doi.:10.1016/j.eti.2017.02.002, Vol. 7, p.152-159.

Deng, F. L., & Chih, H. W. Use of sewage sludge ash as brick material. *Applied Clay Science*, (2005). p 6.

Gonzales, M., Ponce, P. (2012). Use of waste glass in the manufacture of clay bricks. *Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 1 (2), 1-14.

Houda, M., Michael, A., Benzina, M., & Ammar, E. (2008). Valorización Del Alpechín Para Su Incorporación En Los Ladrillos De Construcción. *Science Direct*, 8.

K. Chiang. – Yuh, et al. Lightweight bricks manufactured from water treatment sludge and rice husks. En: *Journal of Hazardous Materials*. Junio, 2009, no 171, p. 76-82.

Liane Wolff, Wilfrid Keller Schwabe, Samuel Vieira Conceição, Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics, In *Journal of Cleaner Production* (2015), doi: 0.1016/j.jclepro.2014.06.018, Vol. 96, p. 282-289.

M. Dondi, G. Guarini, M. Raimondo, C. Zanelli, Recycling PC and TV waste glass in clay bricks and roof tiles, *Waste Management*, June 2009, doi:10.1016/j.wasman.2008.12.003, Vol. 29, p. 1945-1951.

Mahamud, M., Gutiérrez, A., y Sastre, H. (1996). Biosólidos generados en la depuración del agua. *Ingeniería del agua*, 3(2), 16.

Minte Zhang, Chen Chen, Linqiang Mao, Qing Wu, Use of electroplating sludge in production of fired clay bricks: Characterization and environmental risk evaluation, En: *Construction and Building Materials*. En January 2018, Vol. 159, p. 27-36.

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

Mozo, R., Gómez, A., y Camargo, G. Efecto de la adición de biosólido (seco) a una pasta cerámica sobre la resistencia mecánica de ladrillos. *Ingenierías Universidad de Medellín*, 14(27), (2015). 61-68.

Muñoz Velasco, M.P. Morales Ortíz, M.A. Mendivil Giró, L. Muñoz Velasco, Fired clay bricks manufactured by adding wastes as sustainable construction material – A review, En: *Construction and Building Materials* (2014), doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.03.045, Vol. 63, p. 97-107.

Nidhi Gupta, Vidyadhar V. Gedam, Chandrashekhar Moghe, Pawan Labhassetwar, Investigation of characteristics and leaching behavior of coal fly ash, coal fly ash bricks and clay bricks, En:

Onthaphong Phonphuak, Siwadol Kanyakam, Prinya Chindaprasirt, Utilization of waste glass to enhance physical–mechanical properties of fired clay brick, En: Journal of Cleaner Production (2016), doi:10.1016/j.jclepro.2015.10.084, Vol. 112, p. 3057-3062.

P. Muñoz V., M.P. Morales O., V. Letelier G., M.A. Mendivil G., Fired clay bricks made by adding wastes: Assessment of the impact on physical, mechanical and thermal properties, En: Construction and Building Materials (2016), doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.08.024. Vol. 125, p. 241-252.

Quesada, D. E., Martínez, G., ML Martínez, C., Cotes, P., L. Pérez, V., N. Cruz, P., & Corpas, I. (2011). The use of different forms of waste in the manufacture of ceramic bricks. Applied Clay Science, p 6.

R. Maciulaitis., J. Malaiškien, A. Kicait., The regulation of physical and mechanical parameters of ceramic bricks depending on the drying regime. Journal of civil engineering and management. 2008. p 263-268.

Safeer Abbas, Muhammad A. Saleem, Syed M.S. Kazmi, Muhammad J. Munir, Production of sustainable clay bricks using waste fly ash: Mechanical and durability properties, En: Journal of Building Engineering (2017) , doi:10.1016/j.job.2017.09.008, Vol. 14, p. 7-14.

Syed Minhaj Saleem Kazmi, Safeer Abbas, Muhammad Junaid Munir, Anwar Khitab, Exploratory study on the effect of waste rice husk and sugarcane bagasse ashes in burnt clay bricks, En: Journal of Building Engineering(2016), doi:10.1016/j.job.2016.08.001, Vol. 7, p.372-378.

Vorrada Loryuenyong, Thanapan Panyachai, Kanyarat Kaewsimork, Chatnarong Siritai, Effects of recycled glass substitution on the physical and mechanical properties of clay bricks, En: Waste Management (2009), doi:10.1016/j.wasman.2009.05.015, Vol. 29, p. 2717-2721.

FUENTES DE INFORMACIÓN ELECTRÓNICA

ACUEDUCTO. Agua y alcantarillado de Bogotá. Planta de tratamiento de Aguas Residuales EL Salitre Fase1: Informe Mensual de Actividades Diciembre 2012. Bogota. [En línea]. [Citado 16/011/2017]. Disponible en: <<http://www.acueducto.com.co/wpsv61/wps/html/recursos/PTAR/IA2012/DICIEMBRE.pdf>>

ANGÜISACA SARMIENTO, Ronald Vladimir. Proyecto de diseño de un túnel para planta procesadora de arcilla “Bella Azhuquita”. Carrera de ingeniería mecánica. Cuenca. Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca. 2009. p 38-39. [Online]. [Citado 23/12/2011]. Disponible en internet: <<http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/823/3/CAPITULO%20II.pdf>>

DÁGUER, Gian Paolo. Gestión de biosólidos en Colombia. En: Revista ACODAL, noviembre 2003, Vol. 202. Disponible en:< <http://www.geocities.com/ptarcolombia/gestion.htm>

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS. Francisco Blanco Álvarez. Cerámicos. Generalidades. [Online]. [Citado 09/07/2017]. Disponible en internet: <<http://www.etsimo.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion1.Ceramicos.Generalidades.pdf>>

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS. Francisco Blanco Álvarez. Propiedades de las arcillas. [Online]. [Citado 09/07/2017]. Disponible en internet: <http://www.etsimo.uniovi.es/usr/fblanco/leccion3.PropriedadesArcillas.pdf>

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS. Francisco Blanco Álvarez Materias Primas. Cerámicas. [Online]. [Citado 09/07/2017]. En internet: <http://www.etsimo.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion2.MateriasPrimas.Ceramicas.2007.pdf>

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS. Francisco Blanco Álvarez. Preparación materias primas. [Online]. [Citado 09/07/2017]. En internet: <<http://www.etsimo.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion4.Preparacion.MateriasPrimas.pdf>>

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS. Francisco Blanco Álvarez. Secado. [Online]. [Citado 09/07/2017]. Disponible en internet: <http://www.etsimo.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion6.SECADO.pdf>

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA. Manejo de sólidos residuales o biosólidos. [Online]. [Citado 21 octubre 2017]En internet: < <http://www.oocities.org/edrochac/residuales/biosolidos9.pdf>>

GARCÍA ROMERO, Emilia y SUÁREZ BARRIOS. LAS ARCILLAS: PROPIEDADES Y USOS. Universidad d Castilla la Mancha, España, [en línea]. [Citado 25-11-2017]. Disponible en: <<http://www.uclm.es/users/higueras/yymm/arcillas.htm>>

GESTIÓN DE SUBPRODUCTOS [Online]. Bogotá Colombia. PTAR El Salitre. [Citado 05 abril 2017]. Disponible en: <<http://www.acueducto.com.co>>
INFORECICLAJE. Reciclaje del vidrio. Colombia. . [Online]. [Citado 18/12/2017].Disponible en: <http://www.inforeciclaje.com/reciclaje-vidrio.php>

GALÁN, Emilio y APARICIO, Patricia. Materias primas para la industria cerámica. Universidad de Sevilla. [Online]. [Citado 09/07/2017]. Disponible de internet: <http://www.ehu.es/sem/seminario_pdf/SEMINARIO_SEM_2_031.pdf>

PTAR SALITRE FASE I. Planta de tratamiento de aguas residuales [Online]. [Citado 12 abril 2017]. Disponible en: <http://www.acueducto.com.co/wpsv61/wps/html/resources/PTAR/Plegable_tecnico.pdf>

RECICLAJE DEL VIDRIO. Ramírez, L. Grupo de ingeniería medio ambiental. Internatura, España. [Online]. [Citado 18/12/2017]. Disponible en: http://www.internatura.org/estudios/reciclar/r_vidrio.html

RECYTRANS. Soluciones globales para el reciclaje. Vidrio. [Online]. [Citado 18/12/2017]. Disponible n: <https://www.recytrans.com/blog/reciclaje-de-vidrio/>

SEGTEC. Vidrio. Seguridad e inteligencia con tecnología de vanguardia. México. [Online]. [Citado 18/12/2017]. Disponible en: <http://www.segtecvidrio.com/vidrio-reciclado-proceso-usos/>.

UNIVERSIDAD DE OVIEDO, España. Francisco Blanco Álvarez [en línea]. [Citado 08/08/2017]. Disponible en: <<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion4.Preparacion.Mat eriasPrimas.pdf>>

UNIVERSIDAD DE OVIEDO, España. Francisco Blanco Álvarez [en línea]. [Citado 08/08/2017]. <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion7.COCCION.pdf>

USO DEL VIDRIO, Creación integral en vidrio y aluminio. (2016). Crival. México. [Online]. [Citado 18/12/2017]. Disponible en: <http://www.critical.com.mx/index.php/usuarios-del-vidrio>.

ANEXOS