



**LA ECONOMÍA CIRCULAR EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN:
ALTERNATIVA PARA EL MANEJO Y DISPOSICIÓN DE BIOSÓLIDO DE PLANTAS
DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. CASO DE ESTUDIO PTAR EL
SALITRE – BOGOTÁ D.C.**



WILLIAM RICARDO MOZO MORENO

Magister en Ingeniería Ambiental

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS DE AQUINO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON ÉNFASIS EN HIDROAMBIENTAL
TUNJA
2021**



**LA ECONOMÍA CIRCULAR EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN:
ALTERNATIVA PARA EL MANEJO Y DISPOSICIÓN DE BIOSÓLIDO DE PLANTAS
DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. CASO DE ESTUDIO PTAR EL
SALITRE – BOGOTÁ D.C.**

WILLIAM RICARDO MOZO MORENO

DIRECTOR: MELQUISEDEC CORTÉS ZAMBRANO

PhD Ingeniería y Ciencia de los Materiales

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON ÉNFASIS EN HIDROAMBIENTAL
TUNJA
2021**



Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Tunja, 22 de abril de 2021



A mis padres y hermanos, quienes con su ejemplo, dedicación y esfuerzo diario han sido el mayor ejemplo para el desarrollo de mis proyectos.

Al mayor regalo que me ha dado la vida y por quien vale la pena seguir adelante y dar lo mejor de mí, a ti María José dedico el esfuerzo de estos años.



Agradecimientos

Agradezco a Dios por poner en mi camino a las personas adecuadas para lograr cumplir una meta más a través del sacrificio, la disciplina, constancia y perseverancia.

Al director del trabajo por PhD. Melquisedec Cortés Zambrano, por cada uno de los aportes realizados.

A los estudiantes de pregrado que participaron en cada una de las fases y contribuyeron con su trabajo esfuerzo y dedicación

A la Universidad Santo Tomás por permitirme hacer parte de ella y brindar el apoyo y las herramientas para difundir los resultados de este trabajo.

A todos aquellos que de una u otra manera contribuyeron al desarrollo de este proyecto.



Resumen

En la actualidad se promueve la gestión integral del recurso hídrico y uno de los pilares fundamentales para lograr este objetivo es la construcción y puesta en marcha de plantas de tratamiento de aguas residuales tanto industriales como domésticas, lo cual es un beneficio para el medio ambiente y contribuye en la recuperación de los cuerpos de agua en donde normalmente se hace su disposición. Sin embargo, la disposición final de los subproductos del tratamiento de las aguas residuales se está convirtiendo en un problema técnico y ambiental para las unidades o sistemas de depuración que cumplen esta labor.

Desde el punto de vista técnico los biosólidos o lodos se convierten en un problema para las estaciones o plantas de tratamiento debido a la gran cantidad en la que se producen, al problema ambiental en el que se pueden convertir, y a las concentraciones de metales pesados y lixiviados existentes en estos.

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.

Esta investigación se centra en buscar una alternativa viable desde los puntos de vista técnico y ambiental, para la disposición del biosólido en los materiales de construcción, usándolos como materia prima para la fabricación de elementos cerámicos como los ladrillos.

Se seleccionó como zona de estudio la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) el Salitre, la cual trata un caudal de $4.0 \text{ m}^3/\text{s}$ y genera entre 4500 y 5000 toneladas mensuales de biosólido. Para Bogotá es imprescindible la recuperación del Río Bogotá entendiendo esto como una mejora para la calidad de vida de sus habitantes; por esto, se propone dentro del plan de recuperación del Río Bogotá la ampliación y optimización de la PTAR EL Salitre, pasando de 4.0 a $7.0 \text{ m}^3/\text{s}$ y la construcción y puesta en operación de una PTAR adicional (PTAR CANOAS) con una capacidad de hasta $14 \text{ m}^3/\text{s}$ y una generación aproximada de 12360 toneladas mensuales. Como se puede evidenciar, son cantidades considerables (aproximadamente 20000 toneladas) y se debe pensar en generar diferentes alternativas de disposición y valorización.



Para cumplir con el objetivo de la investigación, se desarrolló un plan de trabajo basado en 4 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: los porcentajes de incorporación de biosólido en sus diferentes formas (sin tratamiento, seco, ceniza), 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 4. Evaluar la concentración de metales presentes en los ladrillos aplicando la prueba de lixiviación “*Toxicity Characteristic Leaching Procedure*” (TCLP).

De los resultados obtenidos en la investigación se lograron establecer valores óptimos 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.



Contenido

Resumen.....	6
1. Introducción	17
2. Estado Del Arte	21
3. Marco Teórico Biosólidos.....	27
3.1 Tratamiento De Aguas Residuales	27
3.2 Subproductos Del Tratamiento De Aguas Residuales	28
3.3 Características De Los Biosólidos.....	29
3.4 Clasificación De Los Biosólidos	30
4. Marco Teórico Cerámica	32
4.1 Clasificación.....	32
4.2 Materias Primas.....	33
4.3 Composición De La Pasta	37
4.4 Secado	38
4.5 Cocción.....	42
5. Marco Teórico Vidrio	49
5.1 Clasificación Y Componentes.....	49
5.2 Fabricación	50
5.3 Propiedades	51
5.4 Usos Y Aplicaciones	51
6. Normas Técnicas	54
6.1 Unidades De Mampostería De Arcilla Cocida	54



6.2	Clasificación.....	55
6.3	Propiedades Físicas De Las Unidades De Mampostería.....	56
7.	Metodología	58
7.1	Definición De Hipótesis, Variables E Indicadores.....	58
7.2	Diseño Experimental	59
7.3	Materias Primas.....	61
7.4	Caracterización De Las Materias Primas	62
8.	Fabricación De Los Ladrillos.....	67
8.1	Reducción De Tamaño	67
8.2	Dosificación Y Homogenización	68
8.3	Conformado De Las Piezas Cerámicas	70
8.4	Secado	70
8.5	Cocción.....	71
9.	Calidad De Ladrillos.....	72
9.1	Tasa Inicial De Absorción De Agua (NTC 4017).....	72
9.2	Absorción De Agua (NTC 4017)	72
9.3	Resistencia A La Compresión	73
9.4	Requisitos Norma NTC4205.....	73
9.5	Evaluación Ambiental	75
10.	Análisis De Resultados.....	76
10.1	Caracterización De La Materia Prima	76
10.2	Determinación Contenido Óptimo De Humedad	81
10.3	Caracterización Mineralógica.....	83



10.4	Análisis Térmico.....	84
10.5	Ciclo De Secado	87
10.6	Curva De Cocción	89
10.7	Densidad Aparente De Los Ladrillos Cocidos Fase I.....	90
10.8	Densidad Aparente De Los Ladrillos Cocidos Fase II	93
10.9	Pérdida De Peso Durante La Cocción	94
10.10	Contracción Lineal En Los Elementos Fabricados.....	96
10.11	Evaluación Técnica De La Calidad De Los Ladrillos	99
10.12	Evaluación Ambiental De Los Ladrillos	108
Conclusiones		110
Bibliografía		114



Lista de Tablas

Tabla 3-1. Valores máximos permisibles, biosólidos categoría A y B	31
Tabla 4-1. CO y CO ₂ con relación a la temperatura	44
Tabla 5-1. Clasificación general de vidrios según su composición	50
Tabla 5-2. Composición de los vidrios comerciales	51
Tabla 5-3. Intervalos de composición frecuentes en los vidrios comunes.....	51
Tabla 6-1 Tasa inicial de absorción de agua.....	56
Tabla 6-2 Propiedades físicas de las unidades de mampostería estructural.....	57
Tabla 6-3 Propiedades físicas de las unidades de mampostería no estructural.....	57
Tabla 7-1 Variables Independientes.....	58
Tabla 7-2 Arreglo Experimental Fase 1.....	60
Tabla 7-3 Arreglo experimental Fase 2	60
Tabla 10-1 Concentración promedio de elementos potencialmente tóxicos	77
Tabla 10-2. Contenido de finos en el biosólido (PTAR SALITRE, 2011).....	78
Tabla 10-3. Sólidos totales, Sólidos Volátiles y Humedad Biosólido	78
Tabla 10-4 Distribución granulométrica de la arcilla	79
Tabla 10-5 Caracterización química materias primas.....	80
Tabla 10-6 Límites de Atterberg Mezclas Ar – Bs - Bc - V	81
Tabla 10-7. Humedad óptima de compactación	82
Tabla 10-8. Composiciones mineralógicas materias primas.....	83
Tabla 10-9 Densidad de ladrillos (g/cm ³) Fase 1	91
Tabla 10-10 Densidad Ladrillos Mezcla Ar - Bc - V.....	93



Tabla 10-11 Contracción lineal Fase 1	96
Tabla 10-12 Contracción lineal Fase 2	98
Tabla 10-13 Tasa inicial de absorción Fase 1	99
Tabla 10-14 Tiempo recomendado de pre-humedecimiento	100
Tabla 10-15 Tasa inicial de absorción Fase 2	101
Tabla 10-16 Tiempos recomendados de pre-humedecimiento	102
Tabla 10-17. Resultados de la prueba TCLP para los ladrillos.....	108



Lista de Figuras

Figura 4-1. Composición de cerámica estructural (Galán & Aparicio, n.d.).....	38
Figura 4-2 Evaporación del agua (Vladimir et al., 2009)	40
Figura 4-3. Secado en función del tiempo (Blanco Álvarez, 2007b).....	41
Figura 4-4. Curva de Bigot (Vladimir et al., 2009)	42
Figura 4-5. Transformaciones físicas durante la cocción (Morales Güeto, 2012).....	45
Figura 6-1 Perforación vertical y horizontal (Ladrillos Y Bloques) (PH).....	54
Figura 6-2 Unidades de mampostería de perforación horizontal (NTC 4205, 2000)	55
Figura 6-3 Unidades de Mampostería Macizas (NTC 4205, 2000).....	55
Figura 7-1 Muestreo Arcilla.....	62
Figura 7-2 Granulometría por hidrómetro – Norma INV. E-124-07	64
Figura 7-3 Determinación de la plasticidad.....	65
Figura 7-4 Ensayo de gravedad específica.....	65
Figura 7-5 Ensayo contenido materia orgánica	66
Figura 8-1 Máquina de los Ángeles.....	67
Figura 8-2 Reducción de tamaño biosólido	68
Figura 8-3 Tamizaje.....	68
Figura 8-4 Dosificación Materias Primas	68
Figura 8-5 Humedad óptima de compactación. Ensayo Proctor estándar.	69
Figura 8-6 Homogenización	69
Figura 8-7 Mezcla Materias Primas – Agua	69
Figura 8-8 Prensado	70



Figura 8-9 Curva de cocción 1 (Chiang et al., 2008).....	71
Figura 8-10 Curva de cocción 2 (Chiang et al., 2009).....	71
Figura 9-1 Montaje Tasa Inicial de Absorción de Agua.....	72
Figura 9-2 Montaje Absorción de Agua	73
Figura 9-3 Resistencia a la Compresión	73
Figura 9-4 Propiedades Físicas – Mampostería Estructural (NTC 4205, 2000).....	74
Figura 9-5 Propiedades Físicas - Mampostería No Estructural (NTC 4205, 2000).....	74
Figura 9-6 Tasa Inicial de Absorción de Agua (NTC 4205, 2000)	74
Figura 10-1 Metales pesados biosólido PTAR Salitre – EPA	77
Figura 10-2 Triangulo textural biosólido.....	78
Figura 10-3 Curva Granulométrica Para La Arcilla	79
Figura 10-4 Triangulo textural arcilla.....	79
Figura 10-5 Carta de Plasticidad.....	82
Figura 10-6. Curva DSC (Verde) y TG (Azul) para la muestra 100 % Arcilla	85
Figura 10-7. DSC y TG (Verde) PTAR y DSC y TG (Roja) replica.....	86
Figura 10-8 Fisuras 80°C.....	87
Figura 10-9 Fisuras 60°C.....	87
Figura 10-10 Curvas de Bigot.....	88
Figura 10-11 Punto de humedad crítica.....	89
Figura 10-12 Aspecto físico elementos cocidos curva 1 - curva 2	90
Figura 10-13 Curva de cocción seleccionada	90
Figura 10-14 Densidad Aparente Ladrillos Fase I.....	92
Figura 10-15 Reducción de la Densidad Fase 1.....	92



Figura 10-16 Densidad De Ladrillos Fase II.....	94
Figura 10-17 Exudación del vidrio	94
Figura 10-18 Pérdida De Peso En La Cocción Fase I.....	95
Figura 10-19 Pérdida de peso en la cocción Fase II	95
Figura 10-20 Contracción lineal Fase I.....	97
Figura 10-21 Contracción lineal en la cocción	98
Figura 10-22 Tasa inicial de absorción de agua.....	100
Figura 10-23 Tasa Inicial de Absorción de Agua Fase 2.....	102
Figura 10-24 Resistencia A La Compresión Fase I	104
Figura 10-25 Resistencia A La Compresión Fase II.....	105
Figura 10-26 % de Absorción de Agua Fase - 1	106
Figura 10-27 Porcentaje de Absorción de Agua Fase II.....	107





Capítulo 1

1. Introducción

El 25 de septiembre de 2015, 189 países, incluyendo a Colombia, adoptaron una serie de objetivos globales que buscan erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos con base en la premisa del desarrollo sostenible. Se plantearon diferentes metas, que deberían ser cumplidas para el año 2030.

El mejoramiento de la calidad del agua a través del tratamiento de las aguas residuales (objetivo 6. *Agua limpia y Saneamiento*), el acceso de todas las personas a viviendas y servicios básicos adecuados, seguros y asequibles y mejorar los barrios marginales (objetivo 11. *Ciudades y Comunidades Sostenibles*), la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales enfocado a hacer más y mejores cosas con menos recursos, mediante la reducción de la utilización de los recursos, la degradación y la contaminación (objetivo 12. *Producción y Consumo Responsables*); son algunas de las metas planteadas para el desarrollo sostenible, en las que directa o indirectamente se contribuye a través del desarrollo de la investigación que se documentará en este texto. (Organización de las naciones Unidas, n.d.)

El cumplimiento de las metas que aquí se mencionan, sin duda alguna contribuirá a garantizar el sustento del medio ambiente; pero se deben tener muy en cuenta los efectos secundarios de cada uno de los procesos que serán efectuados para cumplir con cada una de esas metas.

Esta investigación enfoca su atención en el biosólido generado por el tratamiento de las aguas residuales, teniendo en cuenta que se incrementarán los caudales de tratamiento y por ende la cantidad de este subproducto. Se propone entonces una alternativa que permita dar un aprovechamiento a este material, considerado residuo, y que contribuya a realizar una adecuada gestión ambiental en los sistemas de tratamiento de aguas residuales.



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 este; que al no ser absorbido por las plantas puede ser fácilmente lixiviado y movilizado pudiendo generar eutroficación y contaminación por nitratos en mantos acuíferos. La presencia de nitratos en el agua para uso humano implica un riesgo en la salud, sobre todo para los infantes (Facultad de ciencias Químicas Universidad Autónoma de Chihuahua, n.d.).

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

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 primas (Lozano & Peña, 2014).

Si bien la economía circular no es un concepto nuevo, sí es una dinámica y una práctica actual, que busca reinventar la economía presente (economía lineal = “extraer, producir, desperdiciar”), la que en algunos casos se sigue dando a pesar de los constantes recordatorios de que es una economía sin futuro que lleva a la destrucción y al total fracaso del concepto de sostenibilidad.

Teniendo en cuenta lo ya mencionado, se podría definir la economía circular como aquella economía en la que no existen desechos o residuos, sino que en todos los procesos éstos se convierten en nuevas materias primas generando así, no sólo beneficios para los empresarios y para el medio ambiente, sino que también para los consumidores, ya que el desarrollo de éstas prácticas permite, en muchos casos, reducir los costos de producción, lo cual genera una disminución también en el costo de consumo.

Dos de los principios más importantes y destacados de la economía circular son: reciclaje, que se refiere a hacer uso de los materiales denominados residuos; y reutilización, que se refiere al uso de residuos para el diseño y desarrollo de nuevos productos.

En esta investigación se tiene como objetivo evaluar la alternativa de incluir los biosólidos de la PTAR EL SALITRE de la ciudad de Bogotá como materia prima para la fabricación de materiales de construcción comunes y muy utilizados como son los ladrillos macizos, aplicando de esta manera los dos principios de la economía circular anteriormente descritos.



Para lograr elementos de características mecánicas apropiadas, se probaron 4 formas de inclusión de la materia prima alternativa: biosólido sin tratamiento (B), biosólido seco (Bs), ceniza de biosólido (Bc) y ceniza de biosólido con vidrio reciclado (V).

La selección de la PTAR SALITRE tiene su fundamento en: la cantidad de biosólido que genera, 4500 toneladas (t) al mes (PTAR SALITRE, 2011), su incremento en el caudal de tratamiento (4 a 7 m³/s), la implementación de una 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 14 m³/s. Las razones anteriormente mencionadas hacen necesaria y pertinente la investigación y propuesta de alternativas para la valorización y adecuada disposición de este tipo de residuos.

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: biosólido, 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 óptimas de fabricación de los ladrillos relacionadas con las variables: temperatura de cocción, porcentaje y forma de inclusión del biosólido como materia prima alternativa, condiciones que serán establecidas con base en los resultados obtenidos en las pruebas de: resistencia a la compresión, absorción de agua y tasa inicial de absorción.

La investigación se dividió en 2 fases: la primera se desarrolló con el biosólido en sus tres formas de inclusión (B, Bs, Bc) y la segunda se propuso con el fin de optimizar los resultados encontrados en la fase inicial, incluyendo vidrio reciclado como materia prima.

La caracterización de las materias primas se hizo a través de un análisis químico (fluorescencia de rayos X), un análisis mineralógico (difracción de rayos X) y un análisis físico



(análisis granulométrico o de tamaño de partículas y análisis de plasticidad).

El diseño experimental de la investigación contempló dos variables críticas en el proceso de fabricación de los ladrillos, el porcentaje de inclusión de las materias primas y la temperatura de cocción; vale la pena destacar que en cada una de las fases se realizaron algunas modificaciones con base en los resultados experimentales que se iban obteniendo, todo con miras a lograr una optimización de resultados en función de la manipulación de variables.

Dentro de los resultados obtenidos, vale la pena destacar el efecto del pretratamiento sobre las propiedades mecánicas de los elementos ensayados, la alternativa de la ceniza de biosólido arroja los mejores resultados respecto a las propiedades mecánicas y la temperatura de cocción, cumpliendo con las exigencias de la Norma Técnica Colombia NTC 4205; se presentan incrementos en propiedades como la tasa inicial de absorción y la absorción de agua, propiedades que se mejoran a través de la inclusión del vidrio.



Capítulo 2

2. Estado Del Arte

Los materiales de construcción hoy en día son vistos como una opción para la reutilización, incorporación, valorización o transformación de diferentes tipos de residuos; el desarrollo de obras civiles con la utilización de estos materiales alternativos viene creciendo y se hace más importante teniendo en cuenta su contribución al desarrollo sostenible.

La importancia de la investigación en el campo de los materiales de construcción en específico los ladrillos, radica en dos aspectos ambientales importantes, “aproximadamente 340 billones de toneladas son explotadas al año en todo el mundo para la fabricación de ladrillos” (Riaz et al., 2019), lo que genera un impacto ambiental negativo por la degradación de la condición natural del suelo y la sobreexplotación de un recurso natural no renovable; el hecho de remplazar un porcentaje de la materia prima (arcilla) contribuiría a alargar la vida útil de los yacimientos. El segundo aspecto tiene que ver con la disposición segura y el valor agregado que se le estaría dando a los residuos.

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. Lodos de curtiembre (Juel et al., 2017), cenizas volantes y de fondo de carbón (Sutcu et al., 2019b), cenizas volantes (subproducto del carbón) (Abbas et al., 2017), cenizas producto de la combustión de orujo de oliva (Eliche-Quesada & Leite-Costa, 2016), desechos sólidos agrícolas (biomasa) como harina de roca de olivo usada como fertilizante y residuos de paja de trigo (Aouba et al., 2016), ceniza de bagazo de caña de azúcar y cenizas de cascarilla de arroz (Kazmi et al., 2018), desechos del sector minero metalúrgico (residuos del proceso de fabricación de aleaciones de ferromanganeso y polvo de esteatita) (Cota et al., 2018), residuos de vidrio y lodos galvanizados (Mao et al., 2019), ceniza de lodos de plantas de tratamiento de agua residual (Smol et al., 2015), son algunos ejemplos de residuos usados.



La cascarilla de arroz, las cenizas de la cascarilla de arroz, el bagazo, vidrio, lodos provenientes del tratamiento de las aguas residuales, lodos provenientes del tratamiento de agua potable (Benlalla et al., 2015a), cenizas de diferentes tipos y composiciones, aserrín, tabaco y pasto (Cultrone et al., 2004a; Demir, 2008; Lin & Weng, 2001; Mačiulaitis et al., 2008; Umaña P., Francy Yolima y Romero R., 2001; Weng et al., 2003) son residuos que tienen un alto porcentaje de composición orgánica y han sido utilizados de manera satisfactoria en la fabricación de ladrillos en la última década, logrando resultados que cumplen con las normas técnicas de las zonas en donde han sido elaborados.

En general, la industria de la fabricación de ladrillos como materiales de construcción se perfila como una alternativa para la disposición, reutilización y valorización de residuos, brindando ventajas como la disminución del consumo de materias primas y el impacto ambiental que pueda generar la acumulación de esos materiales residuales (Abbas et al., 2017).

Para dar a conocer los aspectos más relevantes de esta alternativa, se presentan diferentes investigaciones desarrolladas en la última década, en donde se hace énfasis en las materias primas, resultados y conclusiones.

Sutcu et al. (2019a) evalúa el efecto sobre las propiedades mecánicas de ladrillos de arcilla cocida, fabricados incluyendo cenizas volantes y cenizas de fondo de carbón como materia prima. La caracterización de estos residuos y la arcilla se realiza a través de la difracción de rayos X (XRD), para evaluar la fase cristalina y un análisis de fluorescencia de rayos X (XRF), para la composición química. Se proponen porcentajes de remplazo de arcilla en un 5, 10, 20 y 30%, en cada uno un 50% de cada tipo de ceniza. El proceso de conformado se realiza en una prensa hidráulica a 20 MPa. Para el secado, se usan dos métodos combinados, el secado inicial al ambiente y posteriormente en un horno en ciclos de temperatura, para la cocción se ensayan dos temperaturas 950 – 1050°C mantenidas en su punto alto durante 2 horas.

En los ladrillos elaborados se determinó, la porosidad aparente, la absorción de agua, la gravedad específica aparente, densidad aparente, resistencia a la compresión, conductividad térmica, pérdida por ignición y análisis de lixiviación.

Los resultados permiten concluir que el incremento en la temperatura de cocción se traduce en: menor porosidad aparente, menor absorción de agua, mayor densidad aparente, mayor conductividad y esto tiene explicación en que se logra una mayor densificación de los ladrillos. Respecto a la lixiviación de metales pesados se concluye que la estructura de arcilla cocida los inmoviliza.

El estudio termina concluyendo que es posible desarrollar nuevos ladrillos utilizando hasta un 30% en peso de remplazo de arcilla con materiales a base de desechos. Lo cual conducirá al desarrollo de materiales de construcción con importantes beneficios medio ambientales.



Jual et al. (2017) evaluaron la alternativa de incluir lodos del proceso de curtiembre (ricos en cromo) como materia prima para fabricar ladrillos, con el fin de estabilizarlos de forma sostenible. En este estudio los porcentajes de inclusión del lodo fueron (10%, 20%, 30%, 40% en peso seco) y las temperaturas experimentales usadas fueron (900 °C, 1000°C, 1050°C). Para determinar la calidad de elementos fabricados, se hicieron pruebas de resistencia a la compresión, absorción de agua, contracción, pérdida de peso por ignición y densidad aparente. Los elementos desarrollados cumplieron con los requisitos técnicos de Bangladesh (zona en donde se llevó a cabo la investigación) con valores de 10.98 MPa hasta 29.61 MPa para la resistencia a la compresión, y porcentajes de absorción de 7.2 % a 20.9 %.

Desde el punto de vista ambiental, una contribución de este estudio es la determinación del porcentaje de disminución en energía utilizado para la fabricación de los ladrillos y las pruebas de lixiviación de metales practicadas. Los resultados arrojados permitieron establecer que se reduce entre un 15 – 47 % al incorporar un contenido de 10 – 40 % de lodo procedente del proceso de curtiembre.

Respecto a la lixiviación de metales, se encontró que sus concentraciones son muy bajas y están muy por debajo de los límites exigidos por regulaciones holandesas y de la agencia de protección ambiental de los estados unidos (USEPA). Los resultados de las pruebas TCLP (toxicity characteristic leaching procedure) mostraron que un aumento en la temperatura de cocción causó una mayor inmovilización de metales pesados como el cromo.

Phonphuak et al. (2016), 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: resistencia a la compresión, absorción de agua, densidad, porosidad y análisis de 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.

Según la difracción de rayos X se demostró 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. 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 cocción.

Andreola et al. (2016), 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 tenían entre 10 y 15% en peso de vidrio. Los resultados de DRX muestran granos de cristal incrustados en el centro del elemento cerámico después de la cocción, concluyendo así que, el vidrio cumple el papel de relleno en los poros del ladrillo, obteniendo un elemento de mayor densidad. En la etapa de secado el vidrio actúa como material inerte, lo que permite reducir el encogimiento de la muestra (hasta en un 1% menor que la muestra patrón) dando como resultado menores cambios dimensionales (contracción). Se concluye entonces que el polvo de vidrio en la mezcla de cerámica reduce el encogimiento en la etapa de secado y la probabilidad de la aparición de casos de agrietamiento.

Benlalla et al., (2015b), fabrican ladrillos en arcilla incluyendo residuos sólidos industriales generados por una planta de tratamiento de aguas residuales de fábrica de pulpa. En la investigación se evalúan tres tipos de residuos sólidos (heces, sémola y lodo de cal); se proponen tres temperaturas de cocción 850, 950 y 1050°C a fin de obtener fases cristalinas y mejorar las propiedades mecánicas de los ladrillos. De los resultados obtenidos concluyen que la porosidad está relacionada directamente con la temperatura de cocción, para temperaturas más altas se espera un tamaño de poro más grande y por ende un incremento en la porosidad. Definen la temperatura óptima de cocción en los 1000°C con un porcentaje de inclusión de hasta un 30% para obtener resistencias superiores a la del ladrillo común.

Cheeseman et al., (2003), implementan el uso de ceniza de lodos de aguas residuales como materia prima en productos cerámicos; en esta investigación vale la pena destacar la evaluación del efecto de sinterización de metales a través de un ensayo TCLP en los elementos finales. Los resultados muestran una relación inversa entre la densidad de los ladrillos y la temperatura de cocción, elementos fabricados a temperaturas superiores a los 1040°C presentan una apariencia vidriosa en la superficie y un volumen significativo de poros (20 a 30 μm de diámetro) formados por la descomposición de residuos inorgánicos presentes en la ceniza de biosólido. Los resultados de la prueba TCLP (Toxicity characteristic leaching procedure) dejan ver que el proceso de sinterización reduce la lixiviación de los metales presentes en la ceniza de biosólido.



Teixeira et al., (2011), se evaluó la viabilidad de la incorporación de los lodos de los estanques de decantación de una planta de tratamiento de aguas residuales en la fabricación de ladrillos. Los resultados obtenidos permiten establecer que el porcentaje óptimo de inclusión es de un 10% para temperaturas de cocción inferiores a 1000 °C, por encima de este valor se puede llegar a incluir hasta un 20% del residuo. Se evidencio un incremento en la absorción de agua, disminución en la densidad aparente y en la resistencia a la flexión, efectos que se atribuyen principalmente a la alta concentración (29%) de la materia orgánica en el lodo, lo que aumenta la porosidad de los ladrillos durante la cocción.

Eliche-Quesada et al., (2011), estudian la inclusión de residuos industriales, tales como: lodos de aguas residuales urbanas, bagazo, lodos de la industria cervecera, alpechín, y el residuo de café molido, como materias primas en la elaboración de ladrillos. La caracterización de la materia prima contemplo ensayos como: difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X, y análisis termogravimétrico. Los ladrillos se conformaron aplicando un esfuerzo de compresión de 54,5 MPa. Los ensayos de caracterización de los elementos fabricados contemplan: pérdida de masa en la ignición, contracción lineal, densidad aparente, absorción de agua, resistencia a la compresión, y conductividad térmica. Los resultados muestran un incremento de la absorción de agua y una reducción en la resistencia a la compresión a medida que se aumenta el porcentaje de residuos en la mezcla de fabricación.

Loryuenyong et al., (2009), Investigan la inclusión de vidrio reciclado como materia prima para la fabricación de ladrillos, contemplando la temperatura de cocción y el porcentaje de vidrio como variables de proceso. Los resultados dejan ver que el vidrio genera un aumento en la porosidad de los ladrillos (incremento en la absorción inicial de agua), cuya explicación es la exudación del vidrio hacia la superficie y la consecuente generación de poros abiertos. La temperatura óptima de cocción definida para el proceso fue de 1100 °C y el porcentaje máximo de inclusión para elaborar elementos de calidad de hasta un 30%, con valores superiores se compromete la resistencia a la compresión de los ladrillos.

Chiang et al., (2009), fabrican ladrillos ligeros utilizando cáscara de arroz y lodo proveniente de plantas de tratamientos de agua residual. 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 la matriz arcillosa en porcentajes de 0, 5, 10, 20, y 25 % en peso. Como resultados de la investigación se pudo concluir que, la absorción de agua se vuelve mayor a medida que aumenta la relación de 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.

Navarro et al., (2008) investigan el potencial del uso de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas servidas en la fabricación de ladrillos. Se incluyen proporciones en (7%, 11% y 15%) de



biosólido, para destacar el ensayo TCLP realizado a las probetas fabricadas, en el cual se demuestra 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.

Cultrone & Sebastián., (2008), evalúa la calidad técnica de un ladrillo macizo incorporando un 5% en peso de cenizas volantes. Los ladrillos se prepararon utilizando dos tipos de materias primas arcillosas y luego fueron cocidos a temperaturas entre 800°C y 1000°C. Los resultados muestran que la adición de cenizas volantes puede mejorar la calidad del ladrillo. Sin embargo, añadir porcentajes de cenizas volantes superiores a un 10% en peso, puede cambiar la apariencia estética de los ladrillos.

Deng, F.L., & Chih, (2005), Realizan una investigación sobre la viabilidad de fabricar ladrillos incorporando cenizas de depuradora. La caracterización fisicoquímica básica de las materias primas incluye el tamaño de las partículas, pH, elementos químicos básicos, densidad y contenido de materia orgánica. Para la obtención de las cenizas, el lodo fue incinerado en una cámara de combustión a 800°C. Los resultados demuestran que el incremento en la temperatura de cocción disminuye la absorción de agua, así como una relación inversa entre el porcentaje de ceniza y la porosidad. Para obtener elementos de calidad, se definen como rangos óptimos de fabricación los siguientes: entre 20% y 40% como contenido óptimo de ceniza, entre 13% y 15% de contenido de humedad, temperatura de cocción de 1000°C durante 6 horas.

Cultrone et al.,(2004b), 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 cuarcítica y pobre en carbonatos. Se demostró que la presencia o ausencia de carbonatos tenía gran influencia sobre la porosidad de los elementos, textura y propiedades físico-mecánicas. Los carbonatos promueven la formación de fisuras y poros de menos de 1µm en tamaño, cuando los ladrillos son cocidos entre 800°C y 1000 °C. La ausencia de carbonatos resulta en una continua reducción en la porosidad, esto permite inferir 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.

Se pudo establecer que existe una relación directamente proporcional entre la pérdida de peso por ignición y la cantidad de lodos en la mezcla; esto se debe a la cantidad de materia orgánica presente en el lodo, la cual es eliminada a temperaturas cercanas a los 550°C. Uno de los criterios más importantes para establecer la calidad de los ladrillos y que limita su uso es la resistencia a la compresión. En la investigación se determinó que 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.



Capítulo 3

3. Marco Teórico Biosólidos

Según la normativa colombiana en este caso el reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico RAS 2000, se tienen las siguientes definiciones para los subproductos generados en las PTAR:

Lodo: líquido con contenido de sólidos en suspensión sin ningún tipo de tratamiento.

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 fisicoquímica 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).

3.1 Tratamiento De Aguas Residuales

Las aguas residuales municipales son una mezcla compleja que contiene agua (por lo común más de 99%) mezclada con contaminantes orgánicos e inorgánicos, tanto en suspensión como disueltos. En general, se consideran aguas residuales doméstica (ARD) los líquidos provenientes de las viviendas o residencias, edificios comerciales e institucionales. Se denominan aguas residuales municipales (ARM) los residuos líquidos transportados por el alcantarillado de una ciudad o población tratados en una planta de tratamiento municipal, y se llaman aguas



residuales industriales (ARI) las aguas residuales provenientes de las descargas de industrias de manufactura (Romero, 2000).

El objetivo básico del tratamiento de las aguas es proteger la salud y promover el bienestar de la sociedad en general. El tratamiento primario contempla el uso de operaciones físicas tales como la sedimentación y el desbaste para la eliminación de los sólidos sedimentables y flotantes presentes en el agua residual. El tratamiento secundario son procesos biológicos y químicos los que emplean para eliminar la mayor parte de la materia orgánica. El tratamiento terciario se emplean combinaciones adicionales de los procesos y operaciones unitarias con el fin de eliminar otros componentes (Burton & Tchobanoglous, 1995).

3.2 Subproductos Del Tratamiento De Aguas Residuales

El agua se contamina por la adición de residuos de agricultura, domésticos, industriales y comerciales en concentraciones o cantidades importantes, llegando al punto de restringir su uso (Salvato et al., 2003). Se entiende por aguas residuales, en general, aquellas alteradas en su composición por el uso al que han sido sometidas, lo que conlleva a una pérdida de calidad y una necesidad de tratamiento o depuración (Orozco Barrenetxea et al., 2003). El tratamiento de las aguas residuales es esencial para minimizar la carga contaminante sobre las plantas de tratamiento de agua y los riesgos de salud asociados con el agua potable y fuentes de aguas recreativas, (Salvato et al., 2003).

Para la normativa colombiana en este caso el reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico (RAS 2000) existen tres definiciones o tipos de agua residual:

- Aguas crudas: las cuales son consideradas como aguas residuales que no han sido tratadas.
- Aguas residuales municipales: agua residual de origen doméstico, comercial e institucional que contiene desechos humanos.
- Aguas servidas: aguas de desecho provenientes de lavamanos, tinas de baño, duchas, lavaplatos y otros artefactos que no descargan materias fecales

De los procesos de tratamiento a que son sometidas las aguas residuales se obtienen subproductos, los cuales deben tener una gestión adecuada para evitar que se conviertan en un material generador de contaminación. Dependiendo del proceso de tratamiento de las aguas residuales del que sean obtenidos los subproductos, se tendrá un tipo de material residual. Los lodos que resultan únicamente de los procesos de separación sólido – líquido (decantación, flotación) se conocen como lodos primarios, formados básicamente por partículas sólidas de naturaleza orgánica. Los provenientes de procesos biológicos son llamados lodos secundarios



(biosólidos), compuestos fundamentalmente por biomasa en exceso producida en los procesos biológicos. (Ramalho, 1983).

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 lodos, (ACUEDUCTO AGUA Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ, n.d.). Los biosólidos se obtienen por separación de la fase líquida en dos etapas del proceso de depuración convencional, (Mahamud et al., 1996):

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

3.3 Características De Los Biosólidos

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 (NNO_3), amoniacal (N-NH_4) 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 los 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 (fiebre tifoidea), Escherichia coli (gastroenteritis), Shigellas (disenteria), las Vibrio Cholerae (diarreas extremadamente fuertes o cólera), etc. Entre los protozoos se encuentran la Cryptosporidium y la Balantidium Coli (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 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.

3.4 Clasificación De Los Biosólidos

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/g de solido total o también la densidad de Salmonella. Es menor a 3 NMP /4g de solido total; los virus entéricos deben tener una densidad de menor o igual a 1UFC/4g de solido total y los huevos viables de helmintos deben ser menor a 1/ 4g de solido total.

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.

El Decreto 1287 de 2014 establece los criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, 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 3-1.

Tabla 3-1. Valores máximos permisibles, biosólidos categoría A y B (DECRETO 1287 DE 2014, 2014)

Parámetro	Variable	Unidad de Medida	Valores Máx Permisibles	
			Cat. A	Cat. B
Microbiológicos	Coliformes Fecales	UFC/g de biosólidos (base seca)	< 1*103	< 2*103
	Huevos de helmintos viables.	Huevos de helmintos viables/4g de biosólidos (base seca)	< 1	< 10
	Salmonella sp.	UFC/en 25 g de biosólidos (base seca)	Ausencia	< 1*103
	Virus Entéricos	UFC/4 g de biosólidos (base seca)	< 1	-
	Fagos Somáticos	UFC/g de biosólidos (base seca)	< 5 *104	-
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
	Níquel (Ni)		80	420
	Plomo (Pb)		300	400
	Selenio (Se)		36	100
	Zinc (Zn)		2000	2800



Capítulo 4

4. Marco Teórico Cerámica

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 cocción. (Callister et al., 2010).

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” (S.c.a.r.l., 2004). En general los materiales cerámicos son materiales inorgánicos formados por elementos metálicos y no metálicos unidos químicamente por fuertes enlaces iónicos y covalentes entre átomos, (Schaffer, 2000). pueden ser cristalinos, amorfos o mezcla de ellos.

4.1 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 estos. ***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. 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).

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 forma (Galán & Aparicio, n.d.):

Productos de color: cerámica estructural: Temperatura: 850 °C – 1100°C

Productos de cocción blanca: Temperatura: 1100°C – 1250 °C

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 intenso. (Orozco Barrenetxea et al., 2003)

4.2 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 relleno no plástico en el conformado y elemento fundente en el proceso de cocción; y la sílice, relleno que mejora la refractariedad. De una manera general la composición de una pasta cerámica puede ser representada como sigue: (S.c.a.r.l., 2004).

Materiales arcillosos: Proporcionan suficiente plasticidad para obtener una forma definida de los elementos a elaborar. 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 gresificación, (Morales Güeto, 2012).

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), (Morales Güeto, 2012).

Otros materiales: son materiales como el talco, sílice, pirofilita, CaCO_3 , 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). (Galán & Aparicio, n.d.)

4.2.1 Materias Primas Plásticas

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 agua, (Das, 1999).

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 hierro, (ASHBY, Michael F & JONES, 1998). 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 orgánica, (Callister, 2010).



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 cocción, (Galán & Aparicio, n.d.).

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 láminas. Dependiendo del contenido de humedad en las arcillas se pueden distinguir tres fases:

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

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.

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:

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.

4.2.2 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 fundentes (Galán & Aparicio, n.d.).

4.2.3 *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 tamaño (Morales Güeto, 2012).

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 secado (Galán & Aparicio, n.d.). Los más utilizados son:

La arena de cuarzo (SiO_2) 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 feldespato 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, etc (Morales Güeto, 2012).

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

4.2.4 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.

4.2.5 Óxidos de hierro

Feldespatos Morales Güeto, (2012). 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.

4.3 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 ladrillos, la composición química es variada, con altos contenidos de sílice y hierro total. En la Figura 4-1, se presenta una configuración aproximada de la composición de la pasta.

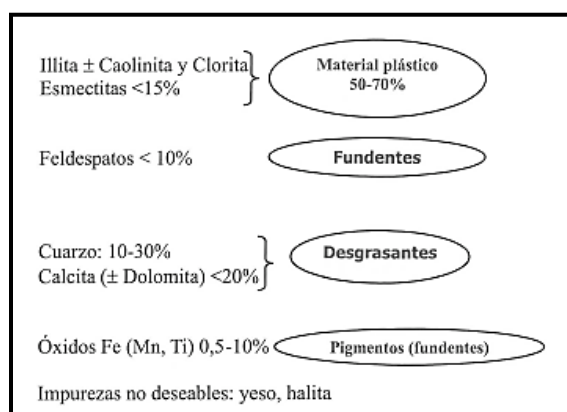


Figura 4-1. Composición de cerámica estructural (Galán & Aparicio, n.d.)

4.4 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 parámetros: cantidad de agua residual, dimensiones longitudinales, superficiales y de volumen, la resistencia a la flexión, la plasticidad.

4.4.1 Humedad Eliminada Durante El Secado

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 fisicoquímica 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. 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.

4.4.2 Mecanismos y cinética del secado

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 cerámica (Vladimir et al., 2009). Dentro de este método de secado se desarrollan las siguientes etapas: (S.c.a.r.l., 2004).



- 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.

Con relación a lo anterior el proceso se puede dividir en dos etapas: en la primera de ellas el aire arrastra las moléculas de agua libre situadas en la superficie de la pieza. Este arrastre da lugar a un movimiento ascendente o flujo de agua libre sobre la superficie para llenar el espacio vacío dejado por las moléculas de agua que han pasado a la atmósfera. Debido a este fenómeno de arrastre se pueden presentar eflorescencias generadas por el transporte de sales solubles a la superficie. Figura 4-2

La primera humedad que pierde la arcilla es la última adicionada, es decir el agua libre que ocupa los capilares. Mientras exista agua libre en los capilares, la cantidad de agua evaporada por unidad de tiempo será constante como se puede ver en la Figura 4-3. Lo anterior se debe a que el agua fluye hacia la superficie con la misma velocidad con que se evapora. La primera fase de secado habrá terminado en el momento en que el agua libre o intersticial ha sido eliminada; en este punto se considera finalizada la contracción de la pieza y se conoce como el “punto crítico” en la humedad residual de la arcilla.

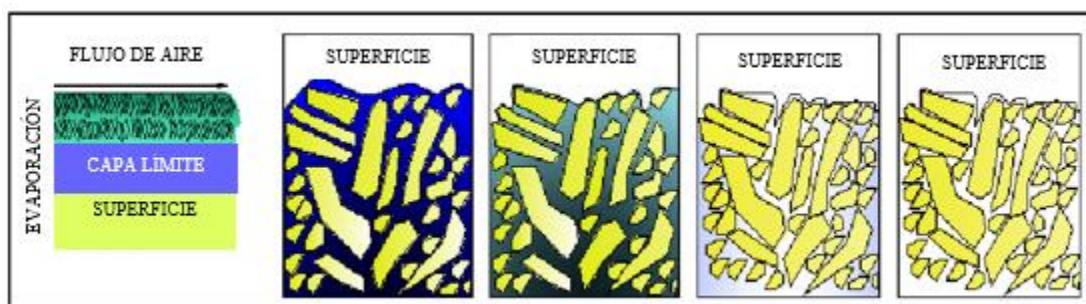


Figura 4-2 Evaporación del agua (Vladimir et al., 2009)

A partir del punto crítico se da inicio a la segunda etapa en el proceso de secado, en la que deja de fluir agua hacia la superficie y comienza la evaporación del agua ligada mediante fuerzas electrostáticas a las superficies de las partículas arcillosas. Como se puede observar en la Figura 4-3 el rendimiento de secado deja de ser constante para presentar una reducción.

En esta etapa el agua ya no alcanza la superficie y es evaporada en el interior de los capilares; por lo tanto, no se presentan eflorescencias superficiales, pues las sustancias generadoras ya no son arrastradas ni depositadas en la superficie.

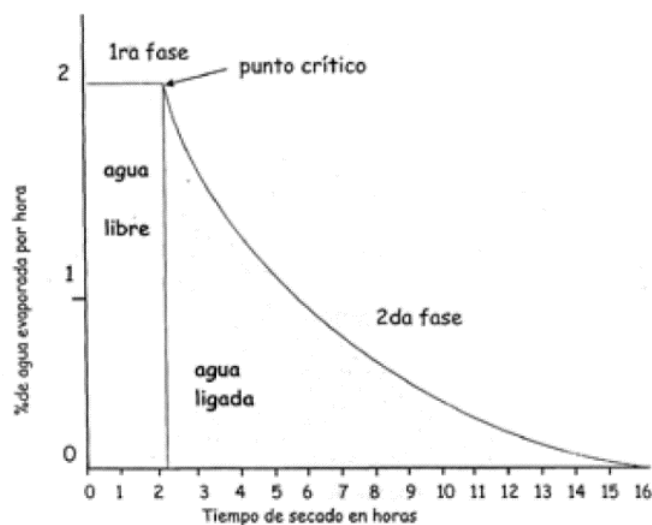


Figura 4-3. Secado en función del tiempo (Blanco Álvarez, 2007b)

A parte del método de secado por convección, existe la posibilidad de realizar el proceso por radiación; estos sistemas ofrecen la posibilidad de una aceleración consistente del proceso de secado, con elevadas aportaciones energéticas. Dichos sistemas aprovechan la aplicación de la radiación electromagnética en el campo de los infrarrojos (IR) o de las microondas (MW).

En ambos casos, ya que el mayor contenido de agua en la pieza se encuentra en las capas más interiores, y siendo los materiales cerámicos casi transparentes a las radiaciones, el calentamiento se produce desde el interior, ya que el agua es la primera en transformar la energía radiante en energía térmica: esto favorece también obviamente la evacuación del vapor, a medida que se forma, ya que, a diferencia del calentamiento convencional, la porosidad superficial no se ve afectada, a no ser al final del secado, por las contracciones estructurales que se puedan generar.

Las arcillas y las pastas cerámicas sometidas a secado sufren modificaciones en forma de contracción y pérdida de peso, debidas a la evaporación del agua. El desarrollo de estas variaciones se estudia mediante las curvas de Bigot, que reflejan el comportamiento del material mediante los valores de contracción /pérdida de peso a tiempo constante, o con otras curvas derivadas de esta.

4.4.3 La curva de Bigot

La curva de Bigot (Figura 4-4) 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 (Vladimir et al., 2009).



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 (Elías, 2001).

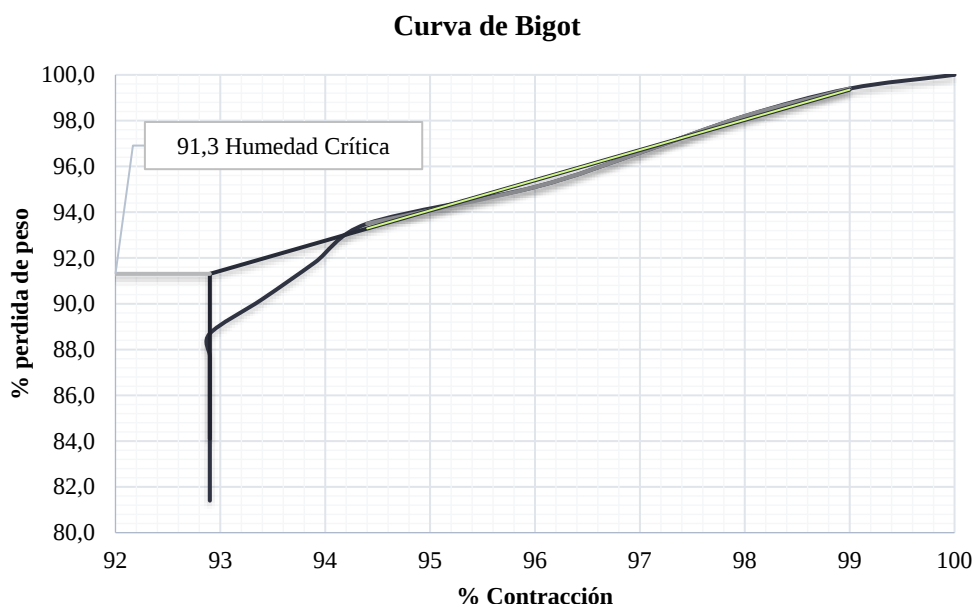


Figura 4-4. Curva de Bigot (Vladimir et al., 2009)

4.5 Cocción

La cocción de los productos cerámicos constituye 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 normas (Blanco Álvarez, n.d.).

La cocción consiste en el calentamiento, por lo tanto, en la transmisión de energía al producto seco hasta una temperatura establecida y durante un tiempo determinado, para que se puedan desarrollar las transformaciones químicas y físicas que llevan a la pasta a adquirir las propiedades requeridas del producto cerámico. En el pasado la temperatura a alcanzar, el tiempo y las modalidades de cocción se decidieron en función de la experiencia; actualmente, los mismos parámetros operativos se establecen en función de los conocimientos químicos y del comportamiento técnico de las materias primas empleadas, y a través de los análisis preliminares realizados sobre las mismas, especialmente mediante los análisis térmicos. Los equipos



actualmente disponibles permiten reproducir, de modo cada vez más preciso, las condiciones de operación, realizando cocciones extremadamente controladas.

4.5.1 Fenómenos que acompañan a la cocción de los productos cerámicos

Eliminación de la humedad. Sobreviene alrededor de los 100°C. Conviene que la humedad de los productos que entran al horno sea lo más baja posible. Si las piezas están demasiado húmedas, el agua no tiene tiempo de eliminarse a través de la superficie y provoca lesiones y fracturas en las piezas (Morales Güeto, 2012).

Eliminación del agua de combinación de los hidrosilicatos de aluminio desde 400°C hasta 700°C, formándose metacaolín con efecto endotérmico.

Disociación de los silicatos de aluminio obteniéndose los óxidos: alúmina y sílice, libres.

Formación de silicatos por encima de 700°C se inicia la combinación entre sílice y alúmina, con lo álcalis, cal, magnesia, óxidos de hierro, etc., para formar una amplia gama de silicatos, aluminatos y sílico-aluminatos, constituyentes finales de la pieza cocida. La formación de estos compuestos está en relación directa con la temperatura, con la velocidad de variación de esta, y con la granulometría de los materiales.

Disociación de carbonatos. Se disocian desde los 600°C hasta los 900-950°C.

La descomposición tiene lugar según las fórmulas:



También sufren disociación térmica los sulfatos de sodio, potasio, calcio, magnesio desprendiendo gases de SO_3 .

La combustión de la sustancia orgánica y carbonosa, que en atmósfera oxidante se inicia a 275 °C para las partículas de turba, se da a 350°C para las de madera y a 380°C las de lignito y carbón. La combustión de estos materiales deja en la masa pequeñas cavidades que retienen residuos de la combustión, lo que provoca porosidad y fusibilidad. En los productos de gran espesor puede ocurrir que los gases que se forman no lleguen a salir, o bien que las sustancias no se quemen completamente, lo que puede provocar ampollas, burbujas y fracturas, y ennegrecimiento de la parte interna.

Carburación y descarburación de la pasta. El monóxido de carbono, CO , en una combustión incompleta se disocia según la reacción: $2\text{CO} \rightarrow \text{C} + \text{CO}_2$

Esta disociación es tanto mayor cuanto más se aproxima la temperatura a 100°C, y es de cerca del 1% a 900°C. Por encima de 1000°C prácticamente no tiene lugar.



El carbono, C, procedente de la disociación, es muy persistente y penetra en los poros de la pasta ennegreciéndola. Su combustión o descarburación puede producirse cociendo en atmósfera oxidante. Si esta descarburación es demasiado rápida, la pasta permanece negra en el interior mientras en el exterior, en que se ha verificado la descarburación, se recupera el color correspondiente a la temperatura. La proporción de CO y CO₂ varía, por tanto, con relación a la temperatura, como se puede ver en la Tabla 4-1:

Tabla 4-1. CO y CO₂ con relación a la temperatura (Blanco Álvarez, 2007b)

Temperatura °C	CO	CO ₂
400	0,01	0,99
500	0,05	0,95
600	0,23	0,77
700	0,57	0,43
800	0,87	0,13
900	0,99	0,01

4.5.2 Transformaciones Desarrolladas En La Cocción

La cocción se realiza a través de la propagación de calor dentro del horno y en la masa de los productos cerámicos. El calentamiento provoca la dilatación de los productos, a causa del aumento de la amplitud de las vibraciones de los átomos que los compone. La magnitud de este fenómeno depende de la naturaleza química del material, de su estructura cristalina o vítrea y de sus proporciones relativas. De las transformaciones que se desarrollan durante el calentamiento; se ha constatado que los compuestos cristalinos presentan una mayor dilatación con respecto a los vítreos, como las estructuras compactas con respecto a las porosas (S.c.a.r.l., 2004).

Ya que los materiales que componen los productos sufren, en el transcurso de la cocción, transformaciones que conducen a la desaparición de determinados compuestos y a la formación de otros nuevos, la *dilatación* refleja esta evolución con un desarrollo en función de la composición inicial de la pasta, de las transformaciones que se producen y de la temperatura alcanzada.

Otra transformación física que se produce durante la cocción es la *fusión de los fundentes* integrados en la composición de la pasta. La acción de fusión contrasta, en sucesión, con aquella expansiva descrita anteriormente, y provoca una serie de transformaciones estrechamente correlacionadas entre sí (Figura 4-5)

Con el incremento de la temperatura crece progresivamente la proporción de fundido y, al mismo tiempo, disminuye la viscosidad del sistema. Se verifica un gradual reblandecimiento del conjunto y una progresión de los fenómenos ligados a la formación de la fase líquida: infiltración



del líquido en las cavidades de la masa, disolución de los gránulos, difusión del material del material disuelto en el residuo de la fase líquida, cristalización del soluto en equilibrio con el disolvente una vez alcanzada la saturación.

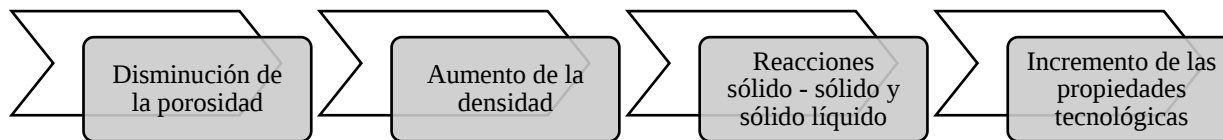


Figura 4-5. Transformaciones físicas durante la cocción (Morales Güeto, 2012)

En el interior del horno, durante el proceso de cocción, se pueden identificar zonas térmicas críticas, a causa de las reacciones de tipo genéricamente químico que se puedan desarrollar:

Un poco por encima de 100°C: eliminación del agua higroscópica, o la humedad residual después de un secado no perfecto, o la reabsorbida de humedad del ambiente.

Hasta 200 °C: eliminación del agua zeolítica o de cristalización, cuyas moléculas están ligadas por absorción en las estructuras cristalinas.

Entre 350 °C y 650°C: combustión de las sustancias orgánicas, que pueden estar presentes en diferentes proporciones en las arcillas, y la disociación oxidante de los sulfuros minerales con la liberación de anhídrido sulfuroso.

Entre 450 °C y 650°C: eliminación del agua de constitución (deshidroxilación) y consiguiente destrucción del retículo cristalino arcilloso.

Entre 800 °C y 950 °C: descarbonatación de la caliza y la dolomita con la liberación de CO₂.

A partir de 700 °C: formación de nuevas fases cristalinas constituidas por el SiO₂ de los silicatos y silicoaluminatos complejos.

A partir de aproximadamente 900 °C: disociación térmica de las otras sales presentes, como los sulfatos y fluoruros.

Temperaturas superiores a 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, se pueden evaporar algunos componentes de las pastas y los revestimientos como los óxidos alcalinos, el óxido de plomo, el óxido de cinc, el anhídrido bórico. La presencia de la mullita en los productos cerámicos es apreciada por su gran dureza y su pequeño coeficiente de dilatación.



Otro fenómeno físico, causado por el aumento de la temperatura, es la transformación polimorfa reversible del cuarzo α en cuarzo β (575°C) y luego, a temperaturas superiores, en tridimita y cristobalita (generan un brusco aumento de volumen). A estas transformaciones se asocian reordenaciones estructurales expansivas durante el calentamiento, y de contracción en el enfriamiento. Durante el calentamiento la pieza cerámica es suficientemente elástica y desligada para poder absorber las dilataciones que se presentan sin excesivos inconvenientes, la contracción asociada a la transformación de cuarzo β a cuarzo α , durante el enfriamiento es soportada por una pieza ya rígida y rica en nuevas fases frágiles, esto justifica la necesidad de programar el ciclo de enfriamiento.

Durante la cocción, la pasta modifica su color, por las distintas sustancias que entran en su composición, y especialmente por los óxidos metálicos. El óxido de manganeso da una coloración grisácea; el óxido de titanio, azul grisáceo; el vanadio da eflorescencias amarillas; el óxido de hierro da una coloración marrón más o menos intensa según la atmósfera del horno.

4.5.3 El Ciclo De Cocción

La sucesión de valores de temperatura a los cuales se somete un producto durante la cocción y los tiempos que regulan su aumento constituyen el ciclo térmico de cocción. En el proceso cerámico, un ciclo térmico se compone de al menos tres fases (Morales Güeto, 2012):

Aumento de la temperatura desde el valor ambiental hasta un valor máximo establecido: El valor máximo de temperatura se obtiene después de repetidos ensayos, y es el considerado óptimo para la obtención de las propiedades deseadas del producto cerámico. La velocidad de aumento de la temperatura se regula de forma conveniente en función de los parámetros intrínsecos del material y de las condiciones de trabajo.

Tiempo de permanencia del producto a la máxima temperatura: la duración de esta fase depende de las dimensiones del producto y del horno; cuanto más elevados son estos parámetros, mayor es la exigencia de uniformar la temperatura para que las transformaciones físicas y químicas previstas se cumplan.

Reducción de la temperatura: en esta fase la temperatura se reduce hasta alcanzar los valores ambientales de acuerdo con un programa que tenga en cuenta la sensibilidad del cuerpo cerámico a los gradientes térmicos y exigencias particulares; en algunos casos es necesario favorecer fenómenos de cristalización, ralentizando el enfriamiento en algunos intervalos de temperatura.



4.5.4 *Curva De Cocción*

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. No se puede fijar la curva a priori, sino que esta depende del tipo de material, de la potencia del horno y de la temperatura máxima a alcanzar. El ciclo térmico de cocción de los productos cerámicos se divide en cuatro periodos (Morales Güeto, 2012):

Precalentamiento. Hasta los 100°C se tiene la evaporación de la humedad residual o apurada 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.

4.5.5 *Tiempo De Cocción*

Debe ser suficientemente largo para que tenga lugar regularmente todas las reacciones químicas. Además, hay que tener presente que el material a calentar y a cocer es mal conductor del calor. Es necesario, por tanto, dar tiempo suficiente para que la temperatura se distribuya uniformemente (Morales Güeto, 2012). En la cocción hay que tener presente que:

El inicio debe ser muy lento para permitir la eliminación de la humedad residual y para evitar roturas del refractario.

Desde los 300°C a los 1000-1100°C para permitir la eliminación del agua de combinación y los gases SO₃, SO₂, O₂, CO₂, etc., debe ser igualmente lento.



En cambio, durante el periodo de fusión del barniz es mejor que la cocción sea relativamente rápida, porque los materiales vítreos tienen tendencia a desvitrificarse cuando se mantienen mucho tiempo a la temperatura de fusión, perjudicando así el lustre y el brillo del esmalte.

4.5.6 Conclusiones Sobre La Cocción

De experiencias realizadas sobre cocción de productos cerámicos, se han obtenido las siguientes conclusiones (Morales Güeto, 2012):

La densidad disminuye por efecto de la dilatación durante toda la curva de calentamiento, hasta alcanzar los fenómenos de vitrificación con aparición de fase líquida en el último tramo de calentamiento, en que la porosidad tiende a cerrarse hasta que se anula.

Solo una mínima parte de los cristales de mullita que se forman a los 950°C como producto de descomposición de la arcilla se disgregan en la fase fundida, mientras que la mayor parte permanece insoluble.

Los cristales de mullita no disueltos, por encima de 1200°C, sufren un crecimiento debido a saturación con mullita de la parte fundida.

Durante el enfriamiento, no tienen lugar variaciones en la cantidad ni en la magnitud de los cristales formados. El porcentaje de feldespatos es de gran importancia facilitando la formación, en tanto que el cuarzo obstaculiza la cristalización.

Prolongar la cocción a una temperatura inferior a la máxima no influye sobre el crecimiento de los cristales, obteniéndose un estado de reposo de todas las variaciones estructurales.

La traslucidez crece al disminuir el contenido de cuarzo o al aumentar el de feldespatos, o sea, a medida que se hace más extensa la fase vítrea.

La porción de fundentes, como los feldespatos, proporciona en la cima de la curva térmica una fase vítrea semifundida, viscosa, que es absorbida por la porosidad, permitiendo el reagrupamiento de los granos a quienes separaba antes de fundir. Por disolución de ingredientes más refractarios, a los que aún no les toca fundir, puede ampliarse la fase líquida, lo que puede comprometer a las piezas si se prolonga el calentamiento, aunque no aumente la temperatura. Al enfriar, esta fase vítrea se solidifica, soldando al resto de granos que no se ablandaron, fenómeno denominado gresificación, que puede ser más o menos extenso, según la naturaleza de las pastas y los propósitos sobre las características a obtener y que son la clave de la calidad cerámica resultante.



Capítulo 5

5. Marco Teórico Vidrio

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 cristalización (Fernández, 2003).

El vidrio suele ser considerado como un líquido subenfriado, 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.

5.1 Clasificación Y Componentes

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. (Lagua et al., 2013)

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 5-1, 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.

Tabla 5-1. Clasificación general de vidrios según su composición (Fernández, 2003)

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.)

5.2 Fabricación

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 zinc. 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 5-2, donde se resumen los compuestos y elementos que poseen los vidrios comerciales más comunes (Martínez Ana, 1995).

Tabla 5-2. Composición de los vidrios comerciales (Martínez Ana, 1995)

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

5.3 Propiedades

Las propiedades de los vidrios, lo mismo que las de cualquiera 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 térmica (Fernández, 2003). 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.

5.4 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 aplicación

Tabla 5-3. 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

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. 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 otros.

5.4.1 Reciclaje Y Reutilización Del Vidrio

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 (*Vidrio reciclado: un proceso fascinante y de usos múltiples*, n.d.)

. Cada kilogramo de vidrio reciclado esconde un sinnúmero de beneficios y virtudes para el medio ambiente:

El vidrio reciclado exige una menor temperatura de fusión que las materias primas originales; es por esto por lo que requiere 26% menos de energía para su fabricación.

La cadena de reciclaje contamina 40% menos de agua y reduce las emisiones de gases tóxicos a la atmósfera en un 20%.

Cada tonelada de vidrio reciclado evita la emisión de 315 kilogramos de dióxido de carbono.



5.4.2 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. (MARTINEZ RAMIREZ, n.d.)

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

5.4.3 Disposición Final Controlada

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.



Capítulo 6

6. Normas Técnicas

6.1 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 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC], 2011).

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.

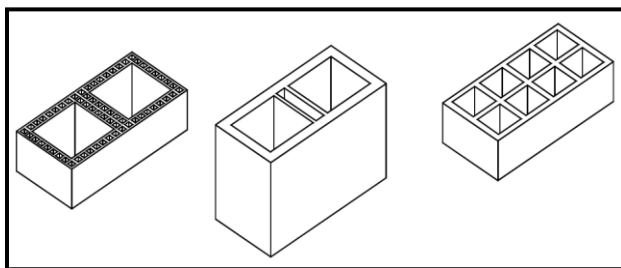


Figura 6-1 Perforación vertical y horizontal (Ladrillos Y Bloques) (PH)

Unidad cuyas celdas o perforaciones son paralelas a la cara o superficie en que se asientan en el muro.

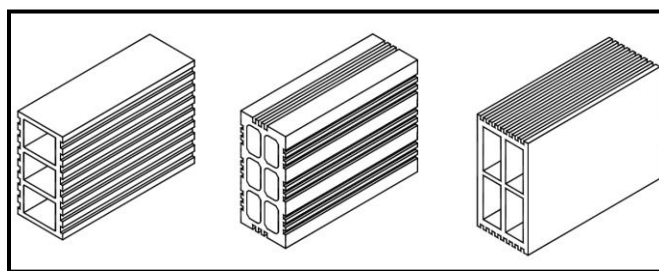


Figura 6-2 Unidades de mampostería de perforación horizontal (NTC 4205, 2000)

6.1.2 Unidades Macizas (Ladrillos) (M)

Mampuestos aligerados con pequeñas perforaciones que ocupan menos del 25 % de su volumen o, también, que no contienen ninguna perforación.

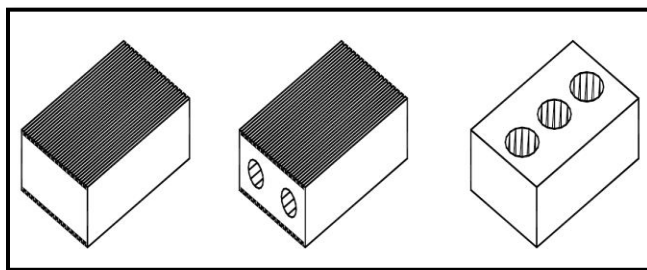


Figura 6-3 Unidades de Mampostería Macizas (NTC 4205, 2000)

6.2 Clasificación

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 (divisores o de cierre); y las unidades de mampostería de uso exterior, o de fachada, y las unidades de uso interior. (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC], 2011)

6.2.1 Unidades De Mampostería De Uso Interior

Son aquéllas 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.

6.2.2 Unidades De Mampostería De Uso Exterior O Para Fachada

Son aptos para construir muros a la vista que estén expuestos a la intemperie.



6.2.3 Unidades Para Mampostería Estructural

Son aquéllas 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.

6.2.4 Unidades Para Mampostería No Estructural

Son aquéllas que se utilizan para muros divisorios o de cierre que únicamente atienden las cargas debidas a su propio peso.

6.3 Propiedades Físicas De Las Unidades De Mampostería

6.3.1 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 $\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}$. La NTC 4017 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 y cuando se tengan valores de absorción mayores que los anotados en la Tabla 6-1, 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 6-1 Tasa inicial de absorción de agua (NTC 4205, 2000)

Tasa inicial de absorción $\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}$	Tiempo recomendado de pre-humedecimiento
< 0,10	5 min
< 0,15	1 h
< 0,25	24 h

6.3.2 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 6-2 y Tabla 6-3. 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 debido a la materia prima utilizada, las unidades de mampostería de uso exterior (fachada) resultan con absorción mayor a la especificada, se puede acudir al análisis termo diferencial 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 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.

6.3.3 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 6-2 y

Tabla 6-3, 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 6-2 Propiedades físicas de las unidades de mampostería estructural (NTC 4205, 2000)

Tipo	Resistencia Mínima A La Compresión (Mpa)		Absorción De Agua Máxima En %			
			Interior		Exterior	
	Prom 5 U	Unidad	Prom 5 U	Unidad	Prom 5 U	Unidad
PH	5,0	3,5	13	16	13,5	14
PV	18,0	15,0	13	16	13,5	14
M	20,0	15,0	13	16	13,5	14

Tabla 6-3 Propiedades físicas de las unidades de mampostería no estructural (NTC 4205, 2000)

Tipo	Resistencia Mínima A La Compresión (Mpa)		Absorción De Agua Máxima En %			
			Interior		Exterior	
	Prom 5 U	Unidad	Prom 5 U	Unidad	Prom 5 U	Unidad
PH	3,0	2,0	17	20	13,5	14
PV	14,0	10,0	17	20	13,5	14
M	14,0	10,0	17	20	13,5	14



Capítulo 7

7. Metodología

7.1 Definición De Hipótesis, Variables E Indicadores

Hipótesis De Investigación. Los ladrillos fabricados a partir de la mezcla arcilla – biosólido (modificado o sin modificar), cumplen con los requisitos de resistencia a la compresión, absorción de agua y tasa inicial de absorción establecidos en la NTC 4205.

Definición Conceptual De Variables

Variables Independientes. Con base en la revisión de estado del arte y marco teórico establecida para la investigación, se seleccionaron como variables a manipular en el estudio: el tipo de residuo y su forma de inclusión, el porcentaje de inclusión del residuo y la temperatura de cocción; definidos en la Tabla 7-1.

Tabla 7-1 Variables Independientes

Material	Temperatura de Cocción 950 - 1000 - 1050 °C				
	0%	5%	10%	15%	20%
B	Si	Si	Si	Si	-
Bs	Si	Si	Si	Si	-
Bc	Si	Si	Si	Si	
Bc + V	Si	-	Si	-	Si



Variables Dependientes. Como variables dependientes se seleccionaron las principales propiedades mecánicas establecidas por la reglamentación colombiana NTC 4205.

Resistencia a la compresión. Medida de la capacidad que tienen los elementos cerámicos para soportar esfuerzos de compresión. Se mide en (kgf/cm^2 o Pa).

Absorción de agua. medida de la cantidad de agua absorbida por el ladrillo, sumergido totalmente en agua durante 24 h. Se expresa en forma de porcentaje (%).

Tasa inicial de absorción. Es la capacidad de absorción capilar que tienen las unidades secas, medida durante 1 min; se expresa en ($\text{g/cm}^2/\text{min}$).

Variables de proceso. Contenido óptimo de humedad, tamaño de partículas, dimensiones de los elementos, proceso de conformado de los elementos (compactación), energía de compactación o presión de compactación, tiempo de maduración, perfil de secado, tiempo de cocción (Curva de cocción).

7.2 Diseño Experimental

La investigación se desarrolló en 2 fases, en la primera se trabajó únicamente con biosólido y sus transformaciones (B, Bs, Bc) en porcentajes del 5, 10 y 15%. En la segunda se incluyó vidrio (V) junto con ceniza de biosólido (Bc) en porcentajes del 10% y 20% con el fin de optimizar las propiedades mecánicas de los ladrillos fabricados en la fase 1.

El diseño experimental general está basado en un arreglo factorial con el ladrillo como unidad experimental y los factores: 1. material de inclusión, 2. Temperatura de cocción, 3. Porcentaje de inclusión.

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.

7.2.1 Diseño Experimental Fase 1

En esta fase se ensayaron las 30 combinaciones posibles de los factores % de remplazo, y temperatura de cocción, en total se fabricaron 300 especímenes cerámicos; las diferentes combinaciones se pueden ver en la Tabla 7-2.



Tabla 7-2 Arreglo Experimental Fase 1

% Reemplazo	(Ar) (B) (Bs) (Bc)	Temperatura de cocción (Factor T)		
		950 °C (T1)	1000 °C (T2)	1050 °C (T3)
0%	Ar	ArT1	ArT2	ArT3
	B1	B1T1	B1T2	B1T3
	Bs1	Bs1T1	Bs1T2	Bs1T3
5%	Bc1	Bc1T1	Bc1T2	Bc1T3
	B2	B2T1	B2T2	B2T3
	Bs2	Bs2T1	Bs2T2	Bs2T3
10%	Bc2	Bc2T1	Bc2T2	Bc2T3
	B3	B3T1	B3T2	B3T3
	Bs3	Bs3T1	Bs3T2	Bs3T3
15%	Bc3	Bc3T1	Bc3T2	Bc3T3

7.2.2 Diseño Experimental Fase 2

En esta fase de la investigación se definieron dos porcentajes de inclusión 10% y 20% para los residuos ceniza de biosólido (Bc) y vidrio reciclado (V). Los porcentajes de inclusión y el arreglo experimental de la combinación ceniza de biosólido y vidrio (BcV) se pueden ver en la Tabla 7-3. Son 90 elementos por cada nivel de temperatura, para un total de 270 unidades fabricadas.

Tabla 7-3 Arreglo experimental Fase 2

950 °C				1000 °C				1050 °C			
% Bc	% V	% Ar	Und	% Bc	% V	% Ar	Und	% Bc	% V	% Ar	Und
0	0	100	10	0	0	100	10	0	0	100	10
	10	90	10		10	90	10		10	90	10
	20	80	10		20	80	10		20	80	10
10	0	90	10	10	0	90	10	10	0	90	10
	10	80	10		10	80	10		10	80	10
	20	70	10		20	70	10		20	70	10
20	0	80	10	20	0	80	10	20	0	80	10
	10	70	10		10	70	10		10	70	10
	20	60	10		20	60	10		20	60	10



Nota: Bc: Ceniza de Biosólido, V: Vidrio, Ar: Arcilla

7.3 Materias Primas

La muestra de arcilla se tomó de uno de los frentes de explotación de la empresa de fabricación de ladrillos “EL OASIS”, localizada cerca de la ciudad de Tunja - Boyacá. Se seleccionó esta empresa por la facilidad de consecución del material.

La muestra de biosólido se tomó de la PTAR EL SALITRE de la ciudad de Bogotá, en donde se generan aproximadamente 4000 ton al mes de este residuo.

El vidrio se obtuvo de una campaña de recolección de las botellas de vidrio generadas en el día a día en las instalaciones de la Universidad Santo Tomás sede Campus, se recogieron aproximadamente 50 botellas diarias.

7.3.1 Muestra de Biosólido

Siguiendo los lineamientos establecidos por la NTC – ISO 5667-13; 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.

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.



7.3.2 Muestreo 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. 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, como se muestra en la Figura 7-1. 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.



Figura 7-1 Muestreo Arcilla

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

7.4 Caracterización De Las Materias Primas

7.4.1 Análisis Químico

Con el análisis químico se establece el tipo y proporción de elementos químicos presentes en las materias primas. Se realizó esta caracterización teniendo en cuenta que la presencia o ausencia de determinados elementos en determinadas proporciones puede, en efecto, tener un significado en la determinación del comportamiento en la cocción.

Los resultados de análisis químico de cualquier sustancia se expresan normalmente en óxidos y, para los materiales cerámicos de la pasta se suelen indicar 8 principales: dióxido de



silicio (sílice SiO_2), trióxido de aluminio (Alúmina Al_2O_3), dióxido de titanio (TiO_2), trióxido de hierro u óxido férrico (Fe_2O_3), óxido de calcio (CaO), óxido de magnesio (MgO), óxido de sodio (Na_2O) y óxido de potasio (K_2O). Los óxidos volátiles a 1000°C (dióxido u óxido de carbono, CO_2 y CO , óxidos de azufre como SO_3 y SO_2 , junto con el agua) normalmente se indican como pérdida por calcinación. (S.c.a.r.l., 2004, p. 27)

7.4.2 Análisis Mineralógico

Con este análisis se establece la presencia de fases cristalinas individuales en una muestra para obtener su composición en minerales; esta valoración es de importancia fundamental para la definición de las características tecnológicas de la materia prima misma o su aportación a una pasta.

Es importante realizar esta caracterización, pues la presencia o ausencia de los diferentes minerales arcillosos condicionan el comportamiento de las pastas cerámicas durante todo el proceso de elaboración del material cerámico e influye en sus propiedades, estética y durabilidad. (INGEOMINAS, 2003)

7.4.3 Análisis Térmico

Con este tipo de análisis se identificaron los cambios físicos y/o químicos que se producen en una muestra en función de la temperatura. (Alarcón, n.d.)

Análisis Térmico – Gravimétrico (ATG). En un análisis termogravimétrico se registra de manera continua, la masa de una muestra colocada en una atmósfera controlada en función de la temperatura. El experimento a realizar será de tipo dinámico por lo que la temperatura de la muestra irá aumentando de manera controlada. De los resultados se podrá obtener un termograma o curva de descomposición térmica.

Análisis Térmico Diferencial. Se usa para medir los cambios de energía en un material; en este análisis se mide la diferencia de temperatura entre la muestra a analizar y un material inerte de referencia mientras son sometidos al mismo programa de temperaturas. Con esta técnica se podrán detectar los cambios en el contenido calorífico de la muestra; es decir las reacciones endotérmicas y exotérmicas que ocurren en el material arcilloso, al ser tratado térmicamente.

7.4.4 Análisis Físico

Dentro de las características físicas evaluadas se encuentran:

Análisis Granulométrico (Método De Sedimentación). Las propiedades de los elementos cerámicos dependen mucho del tamaño y la distribución de partículas que las materias primas presenten. La granulometría afecta propiedades como: plasticidad, porosidad, gravedad específica, homogeneidad, permeabilidad, y penetrabilidad. (Espitia et al., 2003)



La distribución de las partículas de las fracciones finas de la arcilla se determinó mediante el método de granulometría por hidrómetro según la norma INV. E – 124 – 07 (Figura 7-2)



Figura 7-2 Granulometría por hidrómetro – Norma INV. E-124-07

Plasticidad (Método Indirecto O Método De Atterberg). Para determinar las propiedades plásticas de la arcilla y las diferentes mezclas (arcilla – biosólido), se aplicó el método indirecto o de Atterberg. Para el desarrollo se siguió la metodología establecida por la norma I.N.V E – 125 – 07. Con el método mencionado se determinó el intervalo de humedades en el que es moldeable la masa arcillosa.

Por medio del método de Atterberg se pueden determinar los siguientes límites para definir la consistencia de una pasta:

Límite líquido (LL): Contenido de agua expresado en porcentaje; interpretado como la humedad por encima de la cual una pasta no tiene la suficiente consistencia para ser moldeable. “El límite líquido es el punto de paso del estado líquido al plástico y mide la cantidad de agua que contiene el material en el momento en el que el líquido denso pierde la fluidez” (Gippini Pérez & Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento, 1979)

Limite Plástico (LP): Contenido de agua (expresado también en porcentaje) para el cual un cilindro de 3 mm de diámetro no se puede enrollar sin que se desmenuce. Es el contenido mínimo de agua para que la pasta sea moldeable. “El límite plástico es el punto en el que se pasa del estado plástico al estado semi - sólido.” (Espitia et al., 2003)

Índice de plasticidad (IP): es el rango en el cual el suelo presenta plasticidad, numéricamente es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico.



Figura 7-3 Determinación de la plasticidad

Densidad y gravedad específica (I.N.V. E-128-07). “La densidad es la masa por unidad de volumen y a este valor contribuyen las densidades de todos los componentes de la mezcla natural de una arcilla, ya sean minerales o materia orgánica.” (Espitia et al., 2003) La gravedad específica se determinó según lo establecido en la norma I.N.V.E – 128 - 7. (Figura 7-4)



Figura 7-4 Ensayo de gravedad específica

Contracción en quema. (Norma ASTM C-326). La contracción en quema o cocción se determinó midiendo la variación de las dimensiones de los elementos elaborados con las diferentes mezclas de arcilla y biosólido.

La matriz arcillosa cuando es sometida al proceso de secado cede agua de forma gradual hasta perder la totalidad de agua libre. Este proceso en una primera etapa se lleva a cabo a velocidad de eliminación o de pérdida de agua constante; en la segunda etapa la velocidad decrece hasta haberse eliminado el agua libre. Es en la primera etapa donde se genera la contracción de la pieza cerámica.

En el proceso de cocción, también existe una variación volumétrica producto de las reacciones químicas que se generan entre los componentes de la pasta cerámica. En general la pieza cocida tiene menor volumen que la pieza seca; aun cuando se podría presentar un



mantenimiento del volumen si los gases que se desprenden del proceso de cocción quedan retenidos y ayudan a mantenerlo.

Contenido de materia orgánica. Para establecer el contenido de materia orgánica en las materias primas se desarrolló el método de pérdida de peso por ignición; una muestra de 20 gramos del material (previamente pasada por el tamiz N° 10) fue sometida a una temperatura de 445°C durante 6 horas. El contenido de materia orgánica es la diferencia de pesos secos antes y después de realizado el procedimiento. (Instituto Nacional de Vías (Invías), n.d.) (Figura 7-5)



Figura 7-5 Ensayo contenido materia orgánica



Capítulo 8

8. Fabricación De Los Ladrillos

8.1 Reducción De Tamaño

A partir de un proceso de molienda se estableció una primera clasificación de tamaño entre $70\ \mu\text{m}$ y $1\ \text{mm}$ (material que pasa tamices N° 200 - N°18). Este valor 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.

La reducción de tamaño en la arcilla se realizó de forma mecánica haciendo uso de la máquina de desgaste o de los ángeles. La máquina consta de un cilindro que gira sobre su propio eje y esferas en acero inoxidable que cumplen la función de un molino de bolas Figura 8-1.



Figura 8-1 Máquina de los Ángeles

Para el biosólido y el vidrio la reducción de tamaño se llevó a cabo de forma manual usando una pesa con recubrimiento de caucho. El material fue disgregado apisonándolo repetidas veces hasta alcanzar el tamaño de partículas adecuadas Figura 8-2.



Figura 8-2 Reducción de tamaño biosólido

8.1.1 Tamizado

Con el proceso de tamizaje se controló el tamaño de partículas en todas las pastas; las cuales fueron elaboradas con el material que pasó el tamiz N° 20 (0.850 mm) Figura 8-3.



Figura 8-3 Tamizaje

8.2 Dosificación Y Homogenización

Dosificación Materias Primas. La dosificación de los materiales componentes de la pasta cerámica se realizó en peso y su configuración se basó en los porcentajes propuestos, Tabla 7-2 y Tabla 7-3. Figura 8-4



Figura 8-4 Dosificación Materias Primas



Dosificación Del Agua. Para definir la cantidad de agua a incluir en la mezcla, se determinó la humedad óptima de compactación para mezclas (Ar – B) según el ensayo Proctor estándar y la caracterización física de la materia prima (límites de Atterberg) Figura 8-5.



Figura 8-5 Humedad óptima de compactación. Ensayo Proctor estándar.

8.2.1 Homogenización De Las Materias Primas

La mezcla de las materias primas (arcilla, residuo(s) y agua) se realizó en dos etapas:

Homogenización del polvo Arcilla – Residuo(s). Para impedir la pérdida de material y lograr una homogenización adecuada de la mezcla, se usaron bolsas con sello hermético Figura 8-6.



Figura 8-6 Homogenización

Mezcla del polvo homogenizado y agua. La mezcla se hizo de forma manual en un recipiente plástico. Para lograr un humedecimiento total, las diferentes mezclas (arcilla – residuo (s) – agua) se dejaron en reposo durante 24 horas en bolsas plásticas con sello hermético Figura 8-7.



Figura 8-7 Mezcla Materias Primas – Agua



8.3 Conformado De Las Piezas Cerámicas

Los ladrillos fueron conformados con las siguientes dimensiones: 100 mm de largo, 50 mm de ancho y 50 mm de alto. Las anteriores medidas se propusieron con base en la norma NTC 296 (ICONTEC, 2015); en la cual se presentan algunas medidas modulares y se resalta lo siguiente: ladrillos que tengan medidas con base en el múltiplo básico de 10 cm cumplen con las especificaciones de coordinación modular dadas en la NTC 45. Para garantizar las dimensiones propuestas se diseñó un molde y se fabricó en acero.

Para el conformado de los ladrillos se usó la técnica de prensado uniaxial Figura 8-8 máquina de compresión marca “ELE international” EL36-4140/01. El esfuerzo de compresión aplicado fue de 60 kgf/cm²; valor que se seleccionó con base en la revisión bibliográfica.



Figura 8-8 Prensado

8.4 Secado

Un perfil de secado adecuado garantiza en alguna medida la calidad de los elementos cerámicos. Para asegurar una etapa de secado adecuada se realizaron ensayos previos aplicando curvas de secado con dos grados diferentes de temperatura (60°C - 80°C) a especímenes cerámicos de prueba. De las fases experimentales se elaboraron curvas de Bigot en las que se determinaron: la zona de secado crítico y uniformidad del proceso de secado. Se registró el cambio de longitud y peso (de cada elemento cerámico) cada 30 minutos durante 24 horas hasta completar el ciclo de secado



8.5 Cocción

La cocción de los elementos cerámicos se realizó en un horno mufla marca TERRIGENO referencia MM15 (temperatura máxima de 1200°C), con control automático de rampas de temperatura; condición que permitió la programación completa de la curva de cocción.

Para determinar la curva de cocción, se hicieron pruebas para dos rampas de temperatura extraídas de la revisión bibliográfica Figura 8-9 y Figura 8-910. Propiedades físicas como: color, textura y resistencia en los ladrillos de prueba, fueron las características determinantes a la hora de seleccionar una de las dos curvas presentadas.

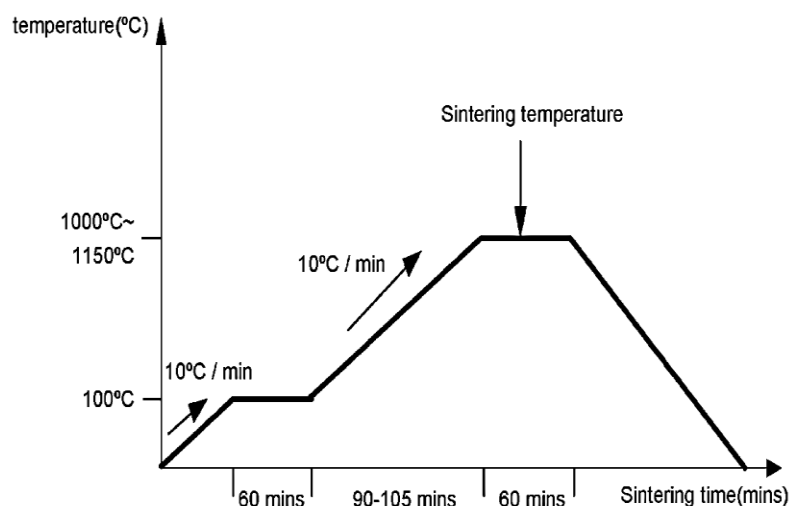


Figura 8-9 Curva de cocción 1 (Chiang et al., 2008)

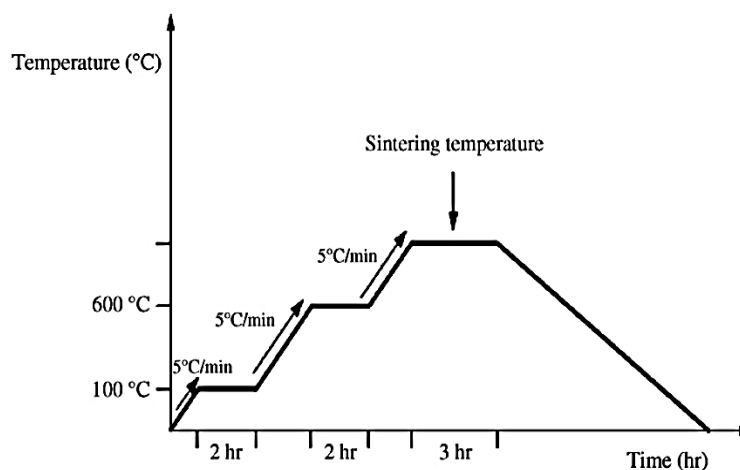


Figura 8-10 Curva de cocción 2 (Chiang et al., 2009)



Capítulo 9

9. Calidad De Ladrillos

Se evaluaron las propiedades de resistencia a la compresión, absorción de agua y tasa inicial de absorción 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).

9.1 Tasa Inicial De Absorción De Agua (NTC 4017)

Se utilizaron 5 muestras completas secadas en un 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 determinó la masa inicial y final de cada elemento Figura 9-1.



Figura 9-1 Montaje Tasa Inicial de Absorción de Agua

9.2 Absorción De Agua (NTC 4017)

Se utilizaron 5 muestras secadas al horno a 105°C según lo especifica la NTC 4017, se les determinó su peso en seco y fueron sumergidas durante 24 horas en agua destilada, una vez se cumplió el tiempo fueron retirados y con un paño se les removió el exceso de agua y finalmente antes de que pasaran 300 segundos se registró su peso final Figura 9-2.



Figura 9-2 Montaje Absorción de Agua

9.3 Resistencia A La Compresión

Se usaron 5 unidades de cada grupo experimental. Los ladrillos fueron refrentados con azufre según el procedimiento de la NTC 4017. Para la aplicación de la carga se tuvo en cuenta la dirección en la que los elementos van a estar puestos en servicio. 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 4205). Posterior a esa carga inicial se aplica carga a una velocidad uniforme hasta generar la falla del elemento, lo anterior en no menos de 60 s ni más de 120 s. Figura 9-3

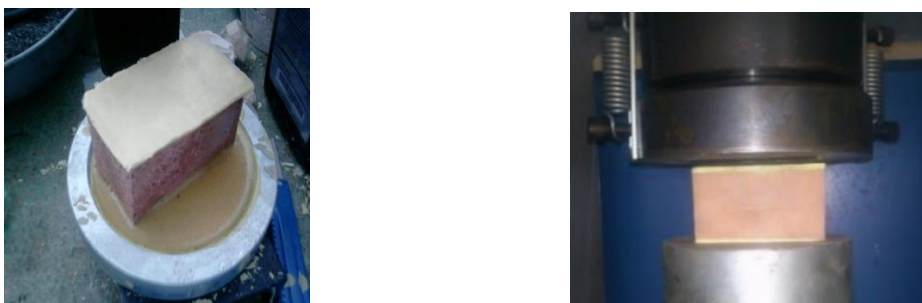


Figura 9-3 Resistencia a la Compresión

Vale la pena destacar que los ensayos de resistencia a la compresión para las cinco unidades de cada grupo propuesto en el diseño experimental se realizaron en una empresa de ingeniería confiable y con certificado para prestar este tipo de servicio y la realización del ensayo.

9.4 Requisitos Norma NTC4205

Una de las características más importantes a la hora de evaluar la calidad de los elementos cerámicos es la resistencia a compresión; se tomará como referencia la norma técnica Colombiana NTC 4205, la cual establece unos valores mínimos para variables como: resistencia mecánica a la compresión, Absorción de agua y tasa inicial de absorción de agua. (Ingeniería Civil Y Arquitectura. Unidades De Mampostería De Arcilla Cocida. Ladrillos Y Bloques Cerámicos)

Los valores de resistencia a la compresión y absorción de agua establecidos por la norma para mampostería estructural y no estructural se muestran en la Figura 9-4 y



Figura 9-5. Estos valores permitirán establecer el grado de cumplimiento de los elementos. Vale la pena aclarar que en cuanto a la absorción de agua, la norma indica que en general no se pueden tener absorciones inferiores al 5% en promedio.

Respecto a la propiedad física de tasa inicial de absorción la norma recomienda lo siguiente:

“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.”

Los valores recomendados por la norma se muestran en la Figura 9-6. Sin embargo la norma aclara lo siguiente:

“Cuando se tengan valores de absorción mayores que los anotados en la Figura 9-6, se debe vigilar el cumplimiento de los requisitos de absorción y resistencia, y diseñar los morteros de pega y tiempos de pre-humedecimiento apropiados.”

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

Figura 9-4 Propiedades Físicas – Mampostería Estructural (NTC 4205, 2000)

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

Figura 9-5 Propiedades Físicas - Mampostería No Estructural (NTC 4205, 2000)

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

Figura 9-6 Tasa Inicial de Absorción de Agua (NTC 4205, 2000)



9.5 Evaluación Ambiental

Se realizará un análisis de TCLP, siguiendo los lineamientos establecidos por la EPA (Environmental Protection Agency) en su *Method 1311 Toxicity characteristic leaching procedure (EPA)*. Su fin es determinar la movilidad de contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos, esta prueba será aplicada a un elemento con el mayor porcentaje de inclusión y mejores propiedades técnicas.



Capítulo 10

10. Análisis De Resultados

10.1 Caracterización De La Materia Prima

10.1.1 Biosólido

Concentración De Metales Pesados. En la NTC 5167 se establece los requisitos que deben cumplir y los ensayos a los cuales deben ser sometidos 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.

En la Tabla 10-1 se muestra la comparación de los datos informados por la PTAR SALITRE y los límites establecidos por la Norma EPA 503.13, en está y en la Figura 10-1, se puede evidenciar que el subproducto se mantiene por debajo de los límites máximos permitidos según la norma americana.

Con la información suministrada por la PTAR y comunicación específica de la empresa de acueducto de Bogotá, el biosólido generado se puede clasificar como de clase B, pudiendo ser usado como material para reforestación, pero no para agricultura de consumo. (*Empresa de Acueducto de Bogotá*, n.d.)

En un biosólido de clase B se detectan patógenos, los cuales han sido estabilizados hasta niveles que no presentan algún riesgo para la salud pública y el medio ambiente. Sin embargo, 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.

Contenido De Materia Orgánica En El Biosólido. El contenido de materia orgánica se determinó siguiendo la norma colombiana INV E -121-07 (Determinación del contenido orgánico en suelos



mediante pérdida por ignición). Los resultados muestran un 44 % de contenido de materia orgánica; confirmando el contenido de carbono de un 46.02 % encontrado en la caracterización química.

Tabla 10-1 Concentración promedio de elementos potencialmente tóxicos

Parámetro	Concentración	Concentración máxima EPA 503.13 (mg/kg) ¹
	PTAR EL SALITRE (mg/kg) (Empresa de Acueducto de Bogotá, n.d.)	
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

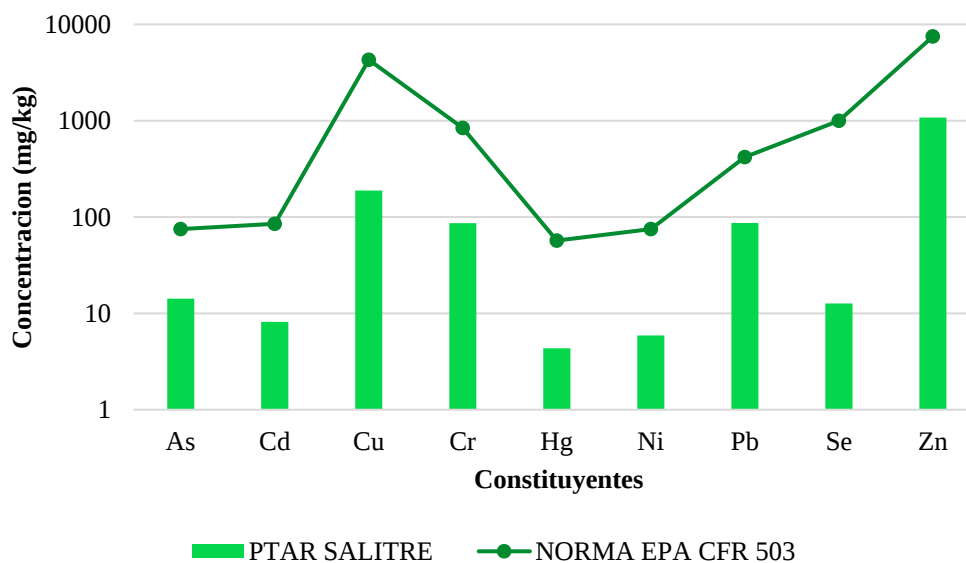


Figura 10-1 Metales pesados biosólido PTAR Salitre – EPA

¹ ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY. Title 40: Protection of environment: Part 503-Standards for the use or disposal of sewage sludge. 503.13 Pollutant limits.



Granulométrica Del Biosólido. En la Tabla 10-2. se muestra el contenido de arenas, limos y arcillas del biosólido. Según el sistema de clasificación de suelos de la United States Department of Agriculture (USDA). Como se puede ver en el triángulo textural Figura 10-2, el biosólido es un material franco arenoso con alto contenido de arena, pero con suficiente limo y arcilla para aportarle un poco de cohesión”(Castro Franco, 1998).

Tabla 10-2. Contenido de finos en el biosólido (PTAR SALITRE, 2011)

Arcilla %	Limo %	Arena %
15.99	18.94	65.06

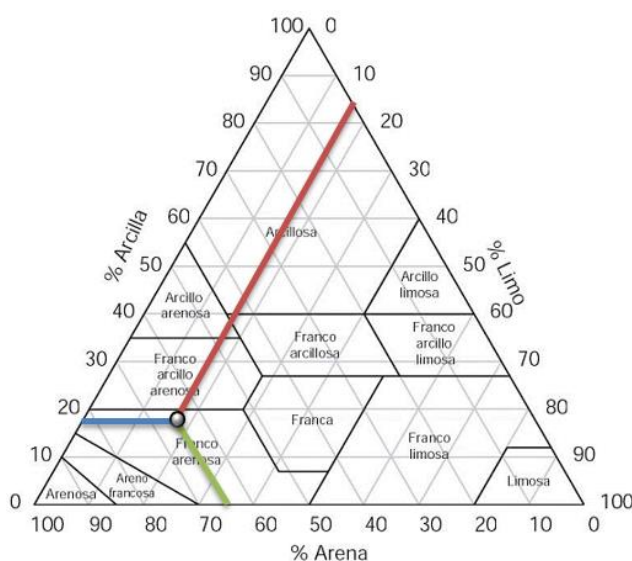


Figura 10-2 Triángulo textural biosólido

En la Tabla 10-3 se muestra el 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 %). Los sólidos fijos (minerales de SiO₂) corresponden a un 52.7 %, lo cual confirma la naturaleza franco-arenosa del biosólido.

Tabla 10-3. Sólidos totales, Sólidos Volátiles y Humedad Biosólido (PTAR SALITRE, 2011)

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



10.1.3 Composición Química De La Arcilla y el Biosólido

La composición química de la arcilla se determinó a través de un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM), al cual se le acoplo una sonda detectora de Espectroscopia de Energía Dispersiva (EDS).

El análisis químico para la ceniza de biosólido se realizó mediante el método QUANT-EXPRESS 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. En la Tabla 10-5 se muestran los resultados obtenidos por fluorescencia de rayos-X de la ceniza de biosólido con código interno dado por el laboratorio de rayos X de la universidad industrial de Santander.

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.

Como se puede ver en la Tabla 10-5, 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 (SiO_2) 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 la materia prima básica para la obtención de la mayor parte de los vidrios(Rincón, n.d.). Cuanto mayor es el contenido de SiO_2 mayor es su resistencia química, térmica y mecánica (CASELLES POMARES et al., 2010).

Tabla 10-5 Caracterización química materias primas

Muestra	Elemento									
	O	Al	Si	Fe	K	Ca	C	SiO2	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, Bc: biosólido, V: vidrio, O: oxígeno, SiO2: Sílice, Na: Sodio, Mg: Magnesio Al: Aluminio, Si: Silicio, Fe: Hierro, K: Potasio, Ca: Calcio, C: Carbono



10.2 Determinación Contenido Óptimo De Humedad

10.2.1 Plasticidad Límites de Atterberg

El ensayo de límites de Atterberg (límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad), se usó para establecer el carácter plástico de mezclas elaboradas con los diferentes residuos. 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. Se incluyeron el biosólido, la ceniza de biosólido y el vidrio en porcentajes del 0%, 10% y 20%; con el fin de determinar el efecto de cada uno de los residuos sobre la plasticidad de la pasta cerámica.

Tabla 10-6 Límites de Atterberg Mezclas Ar – Bs - Bc - V

Mezcla	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice de Plasticidad (%)
100% Ar	43,1	21,2	21,9
90% Ar - 10 % Bs	40,2	23,1	17,1
80% Ar - 20 % Bs	44,6	28,2	16,4
90% Ar - 10% Bc	35,5	19,8	15,7
80% Ar - 20% Bc	31,2	19,2	12,0
90% Ar - 10% V	36,9	19,0	17,9
80% Ar - 20% V	30,8	18,9	11,9

En la Tabla 10-6 se presentan los resultados de límites de Atterberg para las diferentes combinaciones arcilla – residuo propuestas; los valores indican que los residuos incorporados disminuyen la plasticidad de la mezcla arcillosa (disminuye el índice de plasticidad) y por ende actúan como materiales desgrasantes, lo cual se debe al contenido de sílice presente en estos.

Los resultados demuestran que incluir biosólido, ceniza de biosólido o vidrio en la mezcla generará facilidades en cuanto al moldeo de la mezcla y puede mitigar los efectos negativos de la contracción durante las fases de secado y cocción.

En la Figura 10-5 se puede ver como las mezclas propuestas se clasifican como arcillas inorgánicas de plasticidad media (CL) con tendencia al límite de plasticidad baja, a medida que se incorpora residuo en estas. Para la mezcla 80% Ar – 20% B, se presenta la clasificación de suelo orgánico de compresibilidad media, debido al contenido de materia orgánica presente en el biosólido.

Teniendo en cuenta que la metodología de fabricación de los ladrillos establecida usa el método de la compactación como alternativa para el conformado de las piezas cerámicas, se decidió llevar a cabo ensayos de Proctor Modificado con el fin de establecer un valor referencia



para la humedad óptima de compactación, estos ensayos fueron practicados para las proporciones presentadas en la Tabla 10-7.

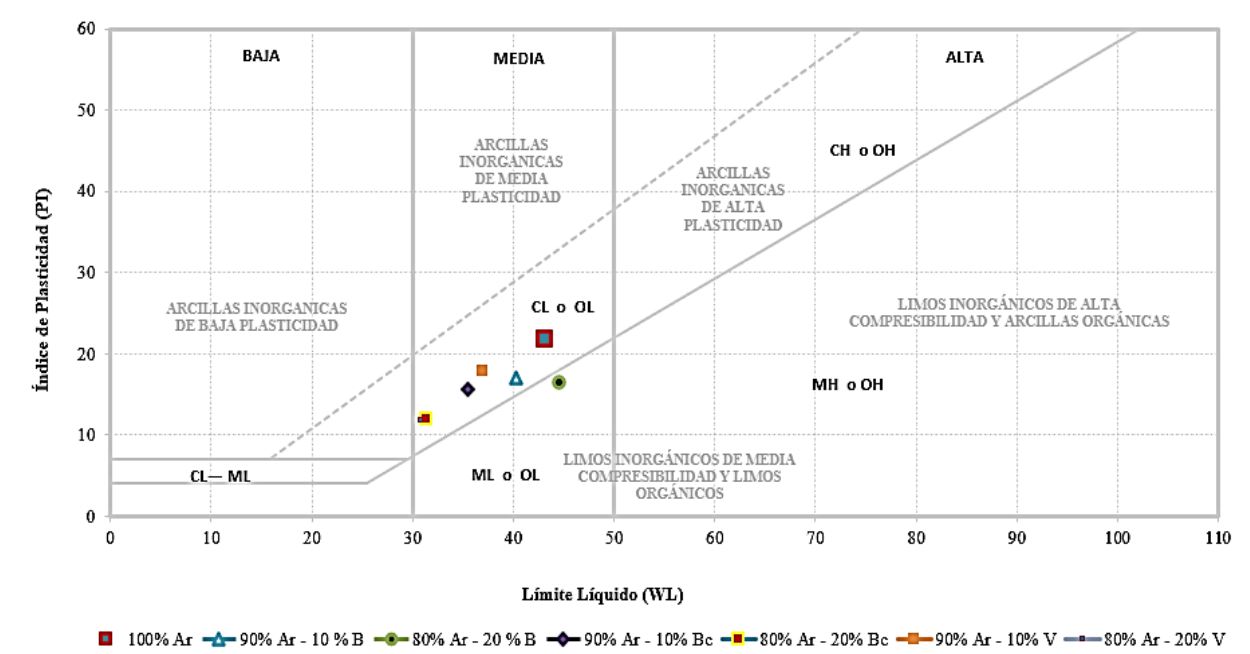


Figura 10-5 Carta de Plasticidad

Para la determinación del contenido óptimo de humedad se realizaron ensayos de mezclas arcilla – biosólido en diferentes proporciones. La fabricación de los ladrillos se realizó definiendo un porcentaje de humedad con base en los resultados de límites de Atterberg y el ensayo de Proctor de Compatación (Mozo William Ricardo, 2014). Inicialmente se fabricaron ladrillos con un 19% de adición de agua con relación al peso total de la muestra. Sin embargo, en la segunda fase (en la que se incluye el vidrio como material de mejora), se hizo necesario bajar el porcentaje de agua en la mezcla a un 17%, debido a un incremento en la plasticidad y una mayor dificultad a la hora de hacer el prensado de los elementos.

Tabla 10-7. Humedad óptima de compactación

Parámetro	Mezclas				Promedio
	A 100% - Bs 0%	A 95% - Bs 5%	A 90% - Bs 10%	A 85% - Bs 15%	
MOC (%)	16,5	18	20	21,5	19
Densidad Seca (g/cm3)	1,8	1,7	1,6	1,5	1,6

Los resultaos obtenidos demuestran que un aumento en la proporción de biosólido en la mezcla se traduce en un incremento en la humedad óptima de compactación y una disminución en la densidad seca del material.



10.3 Caracterización Mineralógica

10.3.1 Caracterización Mineralógica Materias Primas

La caracterización mineralógica para la arcilla y el biosólido se llevó a cabo en un difractómetro de rayos X marca PANALYTICAL referencia X'PERT PRO MPD, haciendo un barrido entre 4 y 70 grados en el eje 2Theta. Se utilizó un tiempo de 59 s por paso y un tubo de Cu con radiación característica $K\alpha_1 = 1,5406 \text{ \AA}$. Para la identificación de las fases se utilizó el software propio de la marca del equipo referencia X'Pert High Score Plus.

La caracterización mineralógica de la ceniza de biosólido se llevó a cabo en un difractómetro de rayos X de polvo 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) y los análisis cuantitativos de las fases se realizaron mediante el refinamiento del Método de Rietveld.

En la Tabla 10-8 se presentan las composiciones mineralógicas detectadas en las muestras de arcilla (Ar), biosólido (B) y ceniza de biosólido (Bc) con sus respectivos porcentajes.

Tabla 10-8. Composiciones mineralógicas materias primas

Mineral	Fórmula Química	Ar %	B %	Bc %
Silicon Oxide (Cuarzo)	SiO ₂	74,0	71,3	11
Aluminum Hydroxide Silicate (Caolinita 2)	Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄	13,0	-	-
Aluminum Silicate Hydroxide (Caolinita 1)	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	11,0	9,9	-
Iron Oxide Hydroxide (Goetita)	FeO(OH)	2,0	-	-
Calcium Carbonate (Calcita)	Ca(CO ₃)	-	6,9	-
Aluminum Hydroxide (Gibbsite)	Al(OH) ₃	-	11,9	-
Hematita	Fe ₂ O ₃	-	-	8,7
Fosfato de calcio y magnesio	(Ca _{2,589} Mg _{0,411})(PO ₄) ₂	-	-	14,4
Aluminosilicatos de calcio y sodio	Ca ₈₅ Na ₁₄ Al _{1,83} Si _{2,16} O ₈	-	-	33,3
Cristobalita	SiO ₂	-	-	23,3
Silicato de hierro	Fe ₂ (SiO ₄)	-	-	2,3

De los resultados de la caracterización mineralógica se puede concluir que:



La arcilla usada para la fabricación de los ladrillos es un material con alto contenido de Cuarzo y mineral de Caolinita, lo que la hace una materia prima apta para fabricar materiales de construcción como los ladrillos. Se esperan elementos de un color pardo claro, pues el contenido de óxidos de hierro (Goetita) es bajo.

Los resultados que se presentan en la caracterización mineralógica están en la misma línea que la caracterización química realizada, la arcilla y el biosólido tiene en su composición un alto porcentaje de cuarzo (SiO_2)

El alto porcentaje de cuarzo (SiO_2) en el biosólido sugieren su uso como material desgrasante para reducir la plasticidad, lo cual se corrobora con los ensayos de plasticidad realizados.

El biosólido puede llegar a ser incorporado en diversos materiales de construcción como material cementante; gracias al contenido de fases mineralógicas como la Gibbsita y Calcita ($\approx 20\%$) encontrado en su composición.

Se encontró un 9.9 % de caolinita en el biosólido de la PTAR, mineral que favorece la sinterización, al ser activado térmicamente.” (Cerdeño del Castillo & Agripino Pérez, n.d.)

La presencia de fases de aluminosilicatos permitirá que a temperaturas superiores a los 1000°C se formen fases como el corindón o la mullita, pudiéndose obtener productos cerámicos muy estables y duros (compactos).

En la ceniza de biosólido se encontraron aluminosilicatos de calcio y sodio ($\text{CaNaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) en un 33.3%; son silicatos que pertenecen al grupo de los feldespatos.(García-Pérez et al., 2013) La presencia de estos minerales contribuye a bajar el punto de fusión, y disminuir en los productos porosos el coeficiente de dilatación, lo que genera aspectos positivos tanto en la parte técnica, como en la parte económica, ya que se producen las reacciones fundamentales necesarias para la constitución del ladrillo a temperaturas más bajas (Blanco Álvarez, 2007a).

La inclusión de la ceniza de biosólido contribuirá para generar la plasticidad necesaria en el moldeo, mejorar las propiedades mecánicas y la formación de fases líquidas y cristalinas durante la cocción (Galán & Aparicio, n.d.).

El dióxido de sílice o sílice presente en Bc (11%), contribuirá para disminuir la plasticidad y la contracción.

10.4 Análisis Térmico

De cada una de las muestras se pesó una porción en una balanza analítica marca OHAUS referencia Adventurer con resolución de 0,1 mg. Luego fueron sometidas a un programa



controlado desde temperatura ambiente hasta 1000 °C con una velocidad de calentamiento de 10 °C*min⁻¹. Estos ensayos se llevaron a cabo en un equipo de Análisis Térmico Simultáneo (Calorimetría de Barrido Diferencial (DSC) – Termogravimetría (TG)) marca NETZSCH referencia STA 409 CD con capacidad de elevar la temperatura hasta 1400 °C y con resolución gravimétrica de 0,005 mg. A continuación, se presentan los diferentes termogramas obtenidos para las muestras ensayadas. (Mozo et al., 2015)

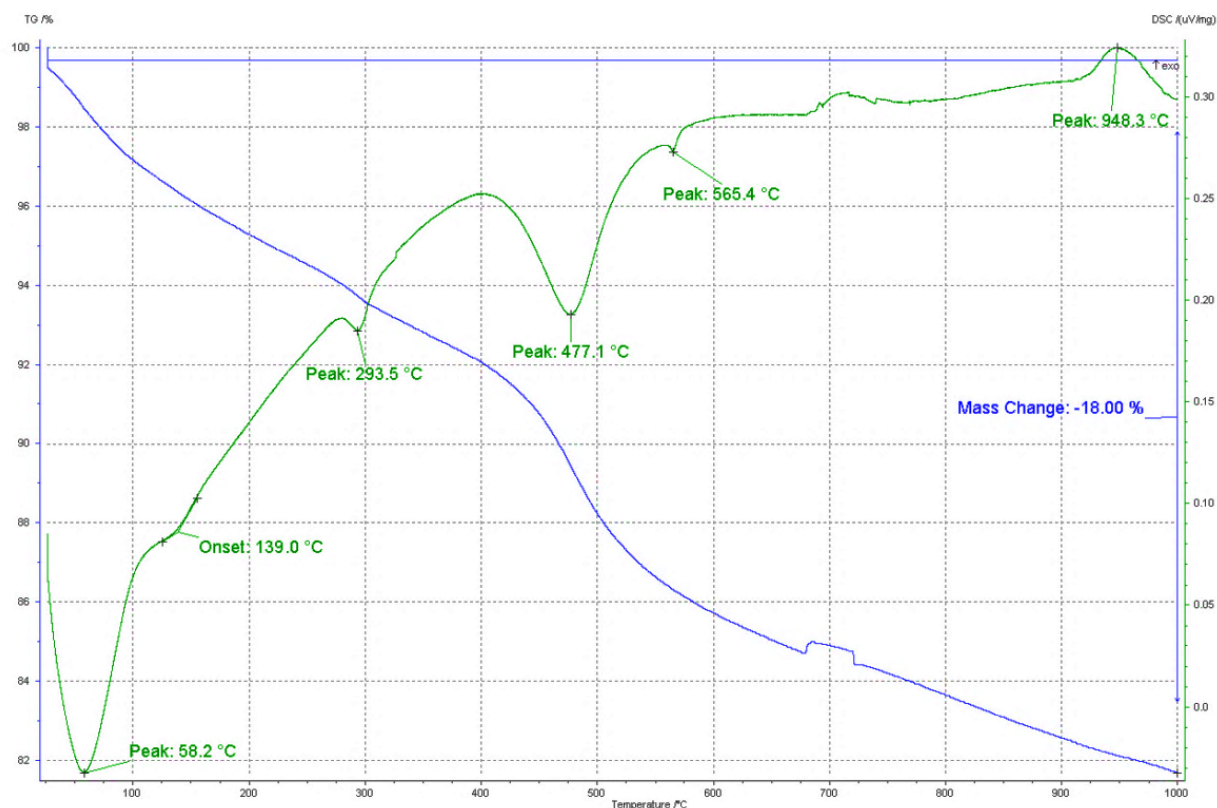


Figura 10-6. Curva DSC (Verde) y TG (Azul) para la muestra 100 % Arcilla

En este análisis térmico se puede ver un primer pico endotérmico a los 58,2 °C; el cual puede estar relacionado con la eliminación del agua libre de la arcilla. El punto de inflexión u Onset a 139 °C puede estar asociado a una pequeña transformación del cuarzo libre presente en la muestra. El pico endotérmico a 293 °C corresponde a la transformación o transición de la fase Goetita a la fase Hematita. El pico endotérmico a 565,4 °C y el exotérmico a 948,3 °C corresponde a transformaciones de la caolinita; aunque el pico de 565,4 °C está muy cercano al de la transformación de cuarzo α a cuarzo β (573 °C teórico). Estos valores pueden estar ligeramente o por encima o por debajo de los teóricos, debido a que éstos pueden estar reportados para la fase mineralógica pura y no para una mezcla de ellas. Figura 10-6

Del ensayo térmico para la muestra PTAR y su repetición, se pudieron detectar varios picos los cuales se explican a continuación:



Un pico endotérmico promedio a los 78 °C relacionado con la eliminación de agua libre en las muestras. Un punto de inflexión u Onset a los 140 °C puede estar asociado a una pequeña transformación del cuarzo libre presente en las muestras. El doble pico a 371,6 °C y 381,7 °C puede deberse a algún tipo de contaminante de origen polimérico mezclado y no detectado en la muestra. El pico endotérmico alrededor de los 450 °C podría estar asociado a una transición del mineral de carbonato de calcio de la muestra. Estos valores pueden estar ligeramente o por encima o por debajo de los teóricos, debido a que éstos pueden estar reportados para la fase mineralógica pura y no para una mezcla de ellas Figura 10-7.

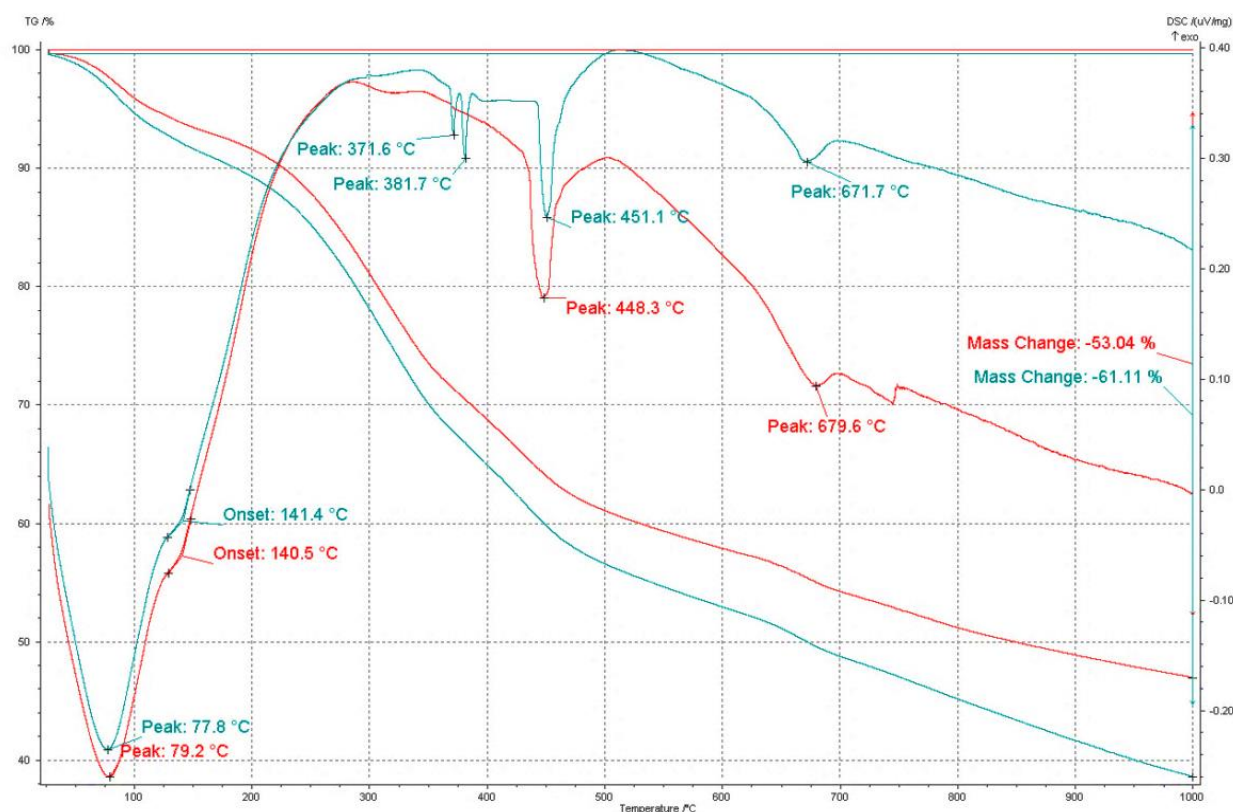


Figura 10-7. DSC y TG (Verde) PTAR y DSC y TG (Roja) replica.

Con relación a los ensayos de análisis térmico se pueden hacer las siguientes apreciaciones:

La pérdida de masa (humedad y materia orgánica) para la muestra de Arcilla 100% fue del 18%, mismo comportamiento reflejado por las muestras en el proceso de secado y cocción de los ladrillos.

Donde se puede observar que los ladrillos pierden alrededor de un 12% de masa en el proceso de secado y un 6% aproximadamente durante la cocción.



10.5 Ciclo De Secado

De la revisión bibliográfica realizada se pudo establecer que el secado de los elementos cerámicos es uno de los procesos más relevantes en la fabricación, pues es en este momento donde aparecen fisuras y deformaciones que se traducen en una falla o ruptura del elemento a la hora de ser sometido a la cocción. Por esto, en esta investigación se llevaron a cabo pruebas de secado a dos temperaturas diferentes (60 °C y 80 °C), para de esta manera determinar un régimen de secado adecuado.

En el ladrillo que se secó a 80°C se presentaron fisuras y deformaciones apreciables en la Figura 10-8; las cuales se atribuyen a una pérdida diferencial muy marcada entre la parte externa e interna del elemento.

Para la temperatura de secado a 60 °C se obtuvieron elementos con mejores condiciones físicas (visuales), que no evidenciaron fisuras o deformaciones Figura 10-9, por esta razón se determinó realizar el secado de la totalidad de los elementos cerámicos a 60 °C.



Figura 10-8 Fisuras 80°C



Figura 10-9 Fisuras 60°C

10.5.1 Curvas de Bigot (Contracción en el secado)

Una vez se definió la temperatura de secado como 60 °C, se buscó hacer más eficiente el consumo de energía y el tiempo de secado. Para esto se elaboraron curvas de Bigot en muestras con diferentes combinaciones de arcilla y biosólido.

En la Figura 10-10 se pueden ver los resultados de pérdida de peso vs contracción en la fase de secado; los valores muestran una reducción del porcentaje de contracción a medida que se incrementaba el porcentaje de biosólido en la muestra, resultado que sigue la línea que sugiere el uso del biosólido como material desgrasante.

La contracción máxima durante el estudio fue de 7.1% y corresponde al elemento fabricado 100% arcilla, y 3.5% de contracción como valor mínimo para el ladrillo fabricado con un 15% de biosólido seco.



Con los datos recolectados para la construcción de las curvas de Bigot, es posible establecer un valor para la humedad crítica, que corresponde al punto en donde se alcanza el valor máximo de contracción en la pieza cerámica. Esta información permitió conocer el tiempo necesario para realizar un cambio en la temperatura de secado sin que las piezas sufrieran algún efecto negativo por el incremento un incremento de temperatura.

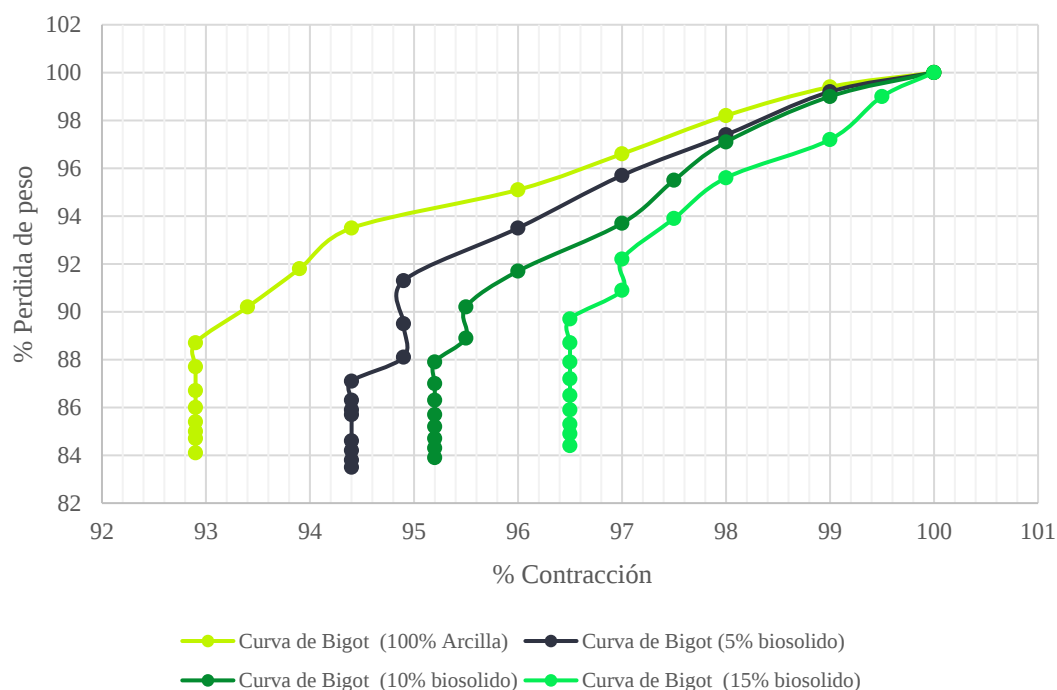


Figura 10-10 Curvas de Bigot

Se pudo determinar entonces que el tiempo mínimo para alcanzar el punto de humedad crítica es aproximadamente 180 minutos (3 horas), 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:

Fase 1: secado a temperatura ambiente durante 12 horas

Fase 2: secado en horno a 60 °C durante 12 horas

Fase 3: secado en horno a 60 °C durante 12 horas

Con esto el ciclo de secado tuvo un tiempo de duración de 36 horas.

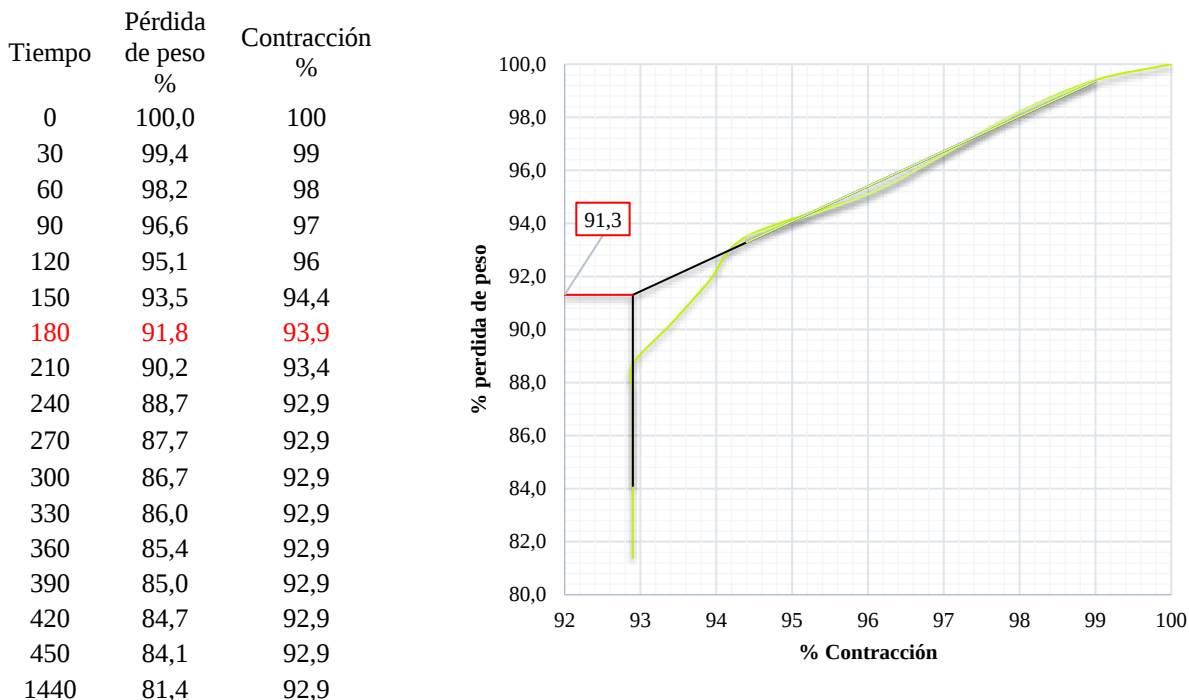
**Curva de Bigot Pieza 1 (100% Arcilla)**

Figura 10-11 Punto de humedad crítica

10.6 Curva De Cocción

Para determinar la curva de cocción más adecuada para la fabricación de los ladrillos se realizó una prueba con dos elementos de iguales características, aplicando las dos rampas de temperatura Figura 8-9 y Figura 8-10.

El aspecto físico de los elementos cocidos se puede ver en la Figura 10-12 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. La curva 1 se descartó debido a la menor 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. (Morales Güeto, 2012).

Finalmente, se selecciona la opción 2 como curva para el proceso de cocción, la consta de 3 rampas de temperatura con una tasa de incremento de 5°C/min. 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. Para terminar con el enfriamiento progresivo natural de la mufla hasta lograr la temperatura ambiente Figura 10-13.



Figura 10-12 Aspecto físico elementos cocidos curva 1 - curva 2

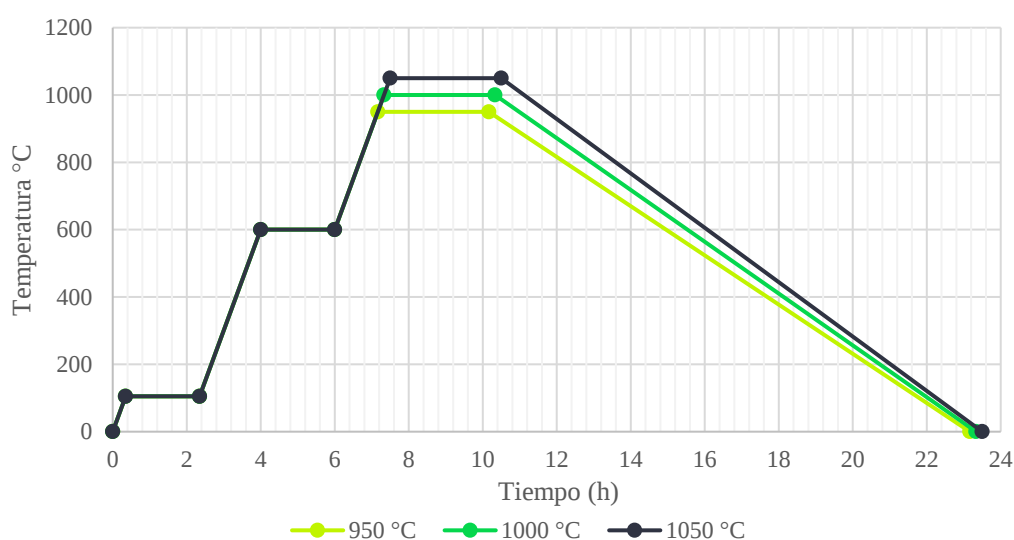


Figura 10-13 Curva de cocción seleccionada

Densidad Aparente De Los Ladrillos Cocidos Fase I Respecto a la forma de inclusión de biosólido (B, Bs, Bc) se puede ver que los ladrillos fabricados con Bc alcanzan los valores más altos de densidad en las diferentes temperaturas de cocción, con valores como 1.92 g/cm^3 para los elementos fabricados con 5% Bc y cocidos a 1050°C ; este valor supera la densidad promedio de los ladrillos de referencia fabricados a la misma temperatura (1.90 g/cm^3). Sin embargo, las demás combinaciones Bc y temperatura de cocción permiten fabricar ladrillos de menor densidad que los de referencia (100%Ar).

En la Tabla 10-9 y Figura 10-14 se presentan los valores promedio de la densidad de las 10 réplicas cocidas con los tratamientos propuestos para la fase 1: 3 niveles de temperatura propuestos (950°C - 1000°C - 1050°C), 3 porcentajes de incorporación (5% - 10% - 15%) y 3 formas de inclusión; biosólido sin tratamiento (B), biosólido seco (Bs) y ceniza de biosólido (Bc). En los resultados se evidencia que el incremento de la temperatura de cocción se traduce en un aumento de la densidad de los ladrillos, resultado que se presenta en la totalidad de las mezclas



evaluadas. Este proceso se atribuye a las transformaciones mineralógicas 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 de un vidrio que fluye hacia los poros y en parte llena su volumen, esta depende del grado de temperatura de cocción y el tiempo” (Callister, 2010). Los elementos de mayor y menor densidad corresponden a 15% Bc con temperatura de cocción de 1050°C y 15% B con 950°C de cocción.

Tabla 10-9 Densidad de ladrillos (g/cm³) Fase 1

FASE 1			
TEMPERATURA DE COCCIÓN			
Nomenclatura	T 950°C	T1000°C	T 1050°C
	Densidad (g/cm ³)	Densidad (g/cm ³)	Densidad (g/cm ³)
100% Ar	1,83	1,87	1,90
5% B	1,70	1,76	1,83
10% B	1,63	1,64	1,68
15% B	1,48	1,56	1,60
5% Bs	1,74	1,78	1,80
10% Bs	1,62	1,65	1,70
15% Bs	1,54	1,58	1,66
5% Bc	1,81	1,79	1,92
10% Bc	1,75	1,79	1,81
15% Bc	1,71	1,67	1,77

Respecto a la forma de inclusión de biosólido (B, Bs, Bc) se puede ver que los ladrillos fabricados con Bc alcanzan los valores más altos de densidad en las diferentes temperaturas de cocción, con valores como 1.92 g/cm³ para los elementos fabricados con 5% Bc y cocidos a 1050°C; este valor supera la densidad promedio de los ladrillos de referencia fabricados a la misma temperatura (1.90 g/cm³). Sin embargo, las demás combinaciones Bc y temperatura de cocción permiten fabricar ladrillos de menor densidad que los de referencia (100%Ar).

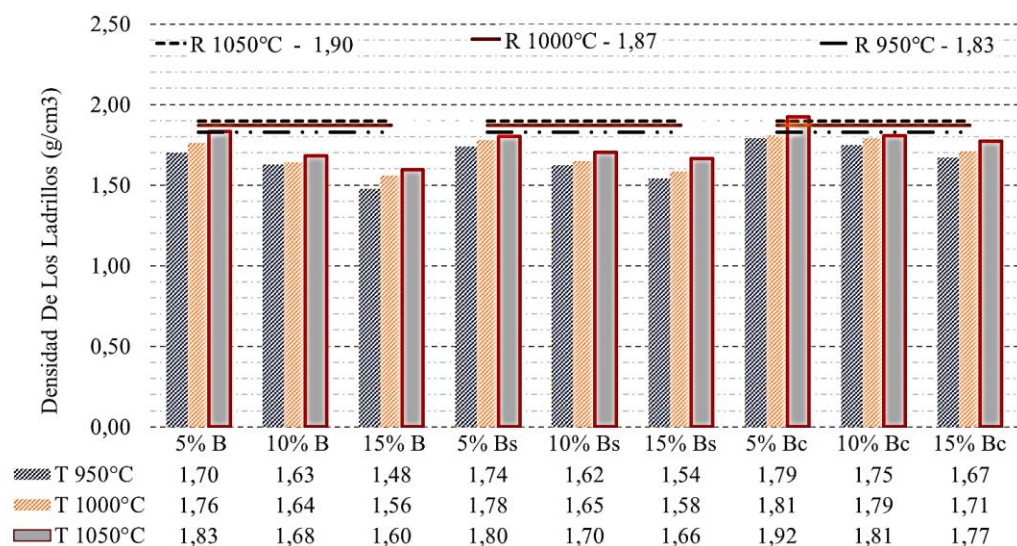


Figura 10-14 Densidad Aparente Ladrillos Fase I

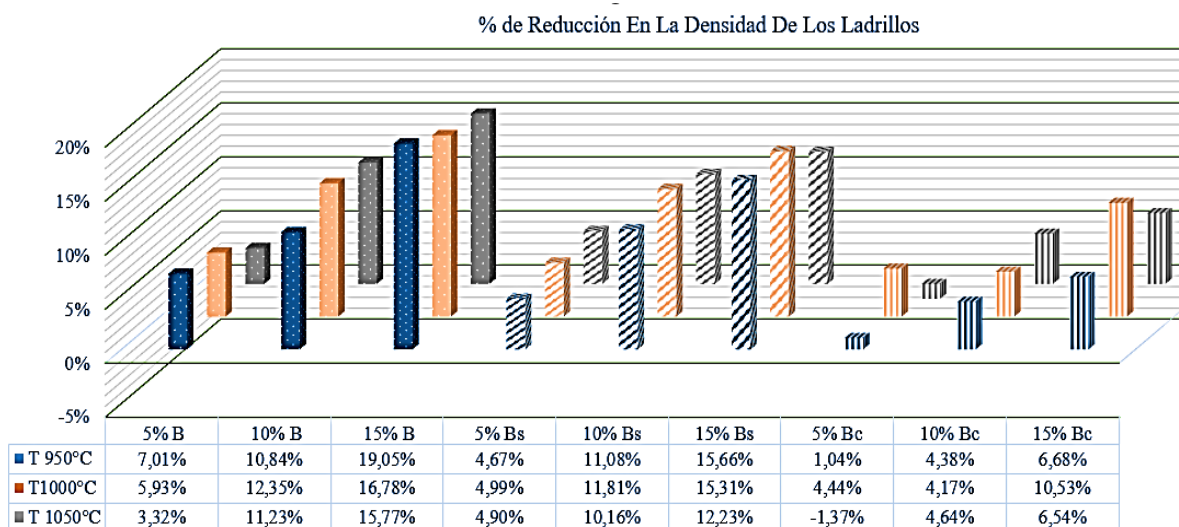


Figura 10-15 Reducción de la Densidad Fase 1

En la Figura 10-15 se muestran los porcentajes de reducción de la densidad en ladrillos fabricados con inclusión de biosólido (B, Bs, Bc) respecto a la densidad de los ladrillos fabricados 100% arcilla. Los mayores porcentajes se presentan en los elementos elaborados con (B), seguidos de (Bs) y (Bc); lo anterior tiene explicación en el contenido de materia orgánica presente en el biosólido sin tratamiento o seco, la cual se quema a temperaturas superiores a los 500°C, generando poros en la matriz cerámica y la consecuente reducción de densidad y peso. Con la inclusión de biosólido (B, Bs, Bc) como materia prima para la fabricación de ladrillos, se logra disminuir la densidad de los elementos en porcentajes que van desde 1% hasta 19%, dependiendo de la temperatura de cocción seleccionada.



Finalmente, se concluye que reemplazar arcilla por biosólido (B, Bs, Bc) permite obtener elementos de menor densidad y peso que el ladrillo común, en las diferentes combinaciones propuestas, lo que se traduce en estructuras más livianas.

10.7 Densidad Aparente De Los Ladrillos Cocidos Fase II

Con base en los resultados obtenidos de la fase I de la investigación, se propuso incluir vidrio en la mezcla para fabricar los ladrillos; con el objetivo de disminuir la absorción de agua y tasa inicial de absorción de agua reportada en los ladrillos fabricados en la fase I. Los resultados de las combinaciones propuestas para la mezcla (Ar – Bc – V) en cuanto a densidad aparente se presentan en la Tabla 10-10.

Como se puede ver en la Figura 10-16 existe una tendencia al incremento de la densidad con el aumento de la temperatura en las combinaciones (100%Ar, 10% Bc, 20% Bc, 10% V, 20% V). Para las combinaciones (10% Bc 10% V, 10% Bc 20% V, 20% Bc 10% V, 20% Bc 20% V) se presenta un comportamiento variable a la temperatura de 1050 °C, el cual se puede presentar por el fenómeno físico de exudación del vidrio (Figura 10-17); en esos elementos la densidad disminuye porque parte del vidrio que se exponía en la superficie se eliminaba o dejaba de hacer parte de la matriz cerámica.

Tabla 10-10 Densidad Ladrillos Mezcla Ar - Bc - V

FASE 2 INCLUSIÓN VIDRIO			
TEMPERATURA DE COCCIÓN			
Nomenclatura	T 950°C	T1000°C	T 1050°C
	Densidad (g/cm3)	Densidad (g/cm3)	Densidad (g/cm3)
100% Ar	1,87	1,91	1,94
10% Bc	1,83	1,89	1,91
20% Bc	1,81	1,88	1,90
10% V	1,86	1,89	1,93
20% V	1,89	1,93	1,96
10% Bc 10% V	1,83	1,86	1,90
10% Bc 20% V	1,88	1,95	1,90
20% Bc 10% V	1,84	1,97	1,88
20% Bc 20% V	1,89	1,92	1,84

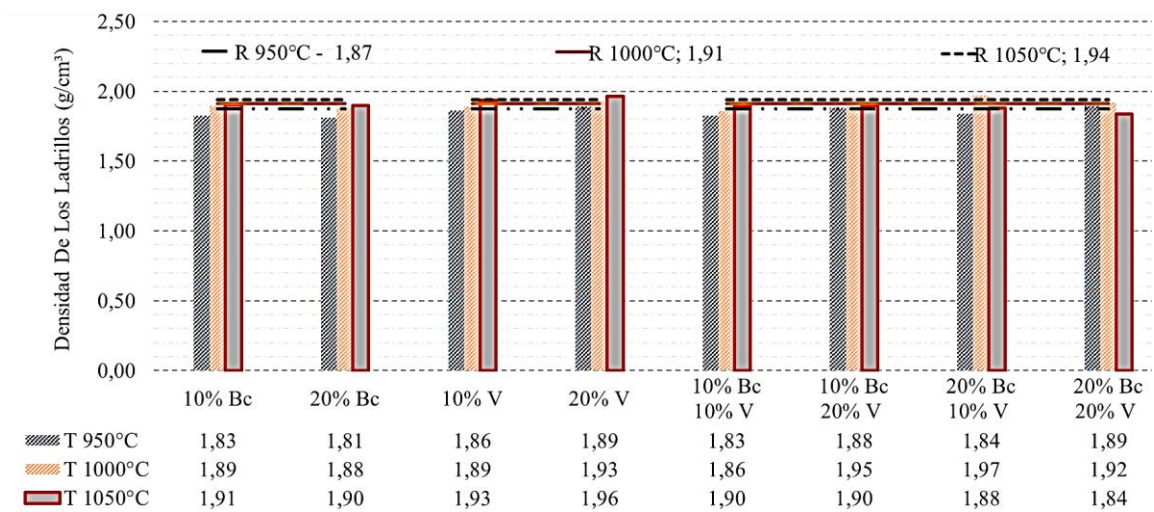


Figura 10-16 Densidad De Ladrillos Fase II

Exudación del vidrio para 20% T 1050°C



Exudación del vidrio para 10% T 950°C



Figura 10-17 Exudación del vidrio

10.8 Pérdida De Peso Durante La Cocción

En la Figura 10-18 se puede ver que el incremento en la proporción de biosólido resulta en un aumento en la pérdida de peso por ignición del ladrillo, lo anterior se atribuye al contenido de materia orgánica presente en el biosólido. Vale la pena aclarar que la pérdida de peso durante la etapa de cocción depende también de las sustancias inorgánicas que están siendo quemadas durante la cocción en ambas materias primas: arcilla y biosólido en sus diferentes formas.

En la Figura 10-19 se presentan los resultados para la fase II en donde se incluye el vidrio, en esta etapa, las materias primas usadas para el remplazo de arcilla han sufrido una transformación o están libres de contenido orgánico, como sucede con el vidrio y la ceniza de biosólido. Por esto, los valores de pérdida de peso en la cocción son inferiores a los reportados en la fase I, inclusive menores que los elementos de referencia (10% Ar). 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 % (Weng et al., 2003). Los elementos obtenidos en esta investigación están por debajo.

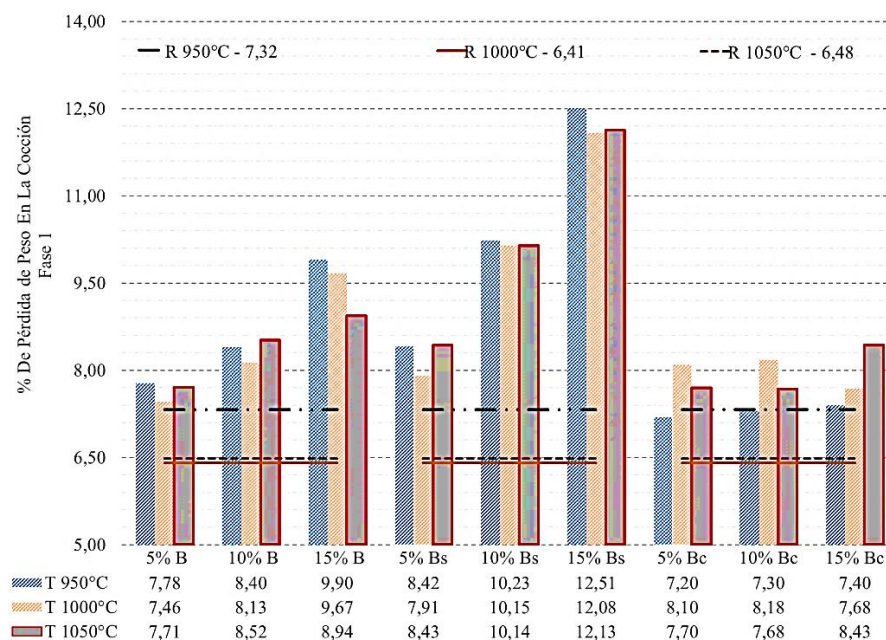


Figura 10-18 Pérdida De Peso En La Cocción Fase I



Figura 10-19 Pérdida de peso en la cocción Fase II



10.9 Contracción Lineal En Los Elementos Fabricados

En la Tabla 10-11 y Tabla 10-12 se presentan los valores de contracción lineal medidos en la etapa de cocción, para las fases I y II en las diferentes combinaciones de temperatura, biosólido (B, Bs, Bc), vidrio (V) y porcentajes de remplazo (5%, 10%, 15%, 20% según corresponda).

Para la fase 1, los resultados demuestran que el incremento en la proporción de biosólido (B, Bs, Bc) resulta en una mayor contracción en la cocción, presentándose los menores valores en los elementos fabricados con biosólido sin tratamiento (B), seguidos de (Bs) y con los resultados más altos los ladrillos fabricados con (Bc).

Respecto al porcentaje de inclusión de (5% - 10% - 15%), en cada grupo experimental, se puede evidenciar una relación directa incremental; a mayor porcentaje de remplazo, mayor contracción en la cocción. Para las diferentes temperaturas de cocción se evidencia el mismo comportamiento, un incremento en la temperatura de cocción se traduce en una mayor contracción lineal.

Tabla 10-11 Contracción lineal Fase 1

FASE 1			
CONTRACCIÓN EN LA COCCIÓN			
NOMENCLATURA	T 950°C	T 1000°C	T 1050°C
	% Cc	% Cc	% Cc
100% Ar	1,04	0,90	2,04
5% B	1,01	0,94	2,76
10% B	1,23	1,03	3,09
15% B	1,32	1,29	3,26
5% Bs	1,21	1,61	2,81
10% Bs	1,31	1,81	2,95
15% Bs	1,68	2,66	4,20
5% Bc	1,38	2,06	4,07
10% Bc	1,22	2,69	3,00
15% Bc	1,96	2,70	3,66

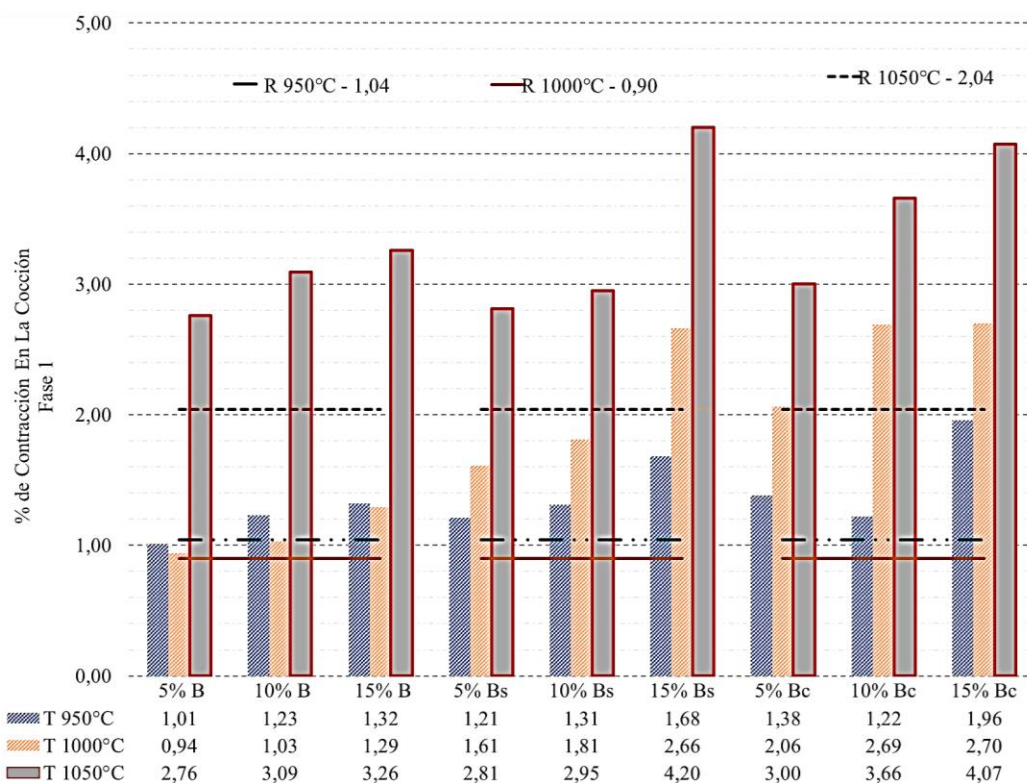


Figura 10-20 Contracción lineal Fase I

La contracción lineal medida en la fase II es menor en comparación con la fase I y los valores entre porcentajes de adición de Bc y V no presentan diferencias significativas, del orden del 0.3 % aproximadamente. Para las diferentes temperaturas de cocción propuestas, se puede evidenciar el mismo comportamiento que en la fase I, en donde la contracción lineal aumenta con el incremento de la temperatura. En esta segunda fase experimental, los valores de contracción lineal están entre el 1% y el 2% máximo.

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 % (Weng et al., 2003). Los elementos obtenidos en esta investigación están por debajo de ese umbral; por lo que se puede decir que de algún modo eso asegura la calidad de los elementos fabricados.



Tabla 10-12 Contracción lineal Fase 2

FASE 2 INCLUSIÓN VIDRIO			
CONTRACCIÓN EN LA COCCIÓN			
NOMENCLATURA	T 950°C	T 1000°C	T 1050°C
	% Cc	% Cc	% Cc
100% Ar	1,07	1,08	1,62
10% Bc	1,06	1,06	1,08
20% Bc	1,05	1,06	1,33
10% V	1,08	1,08	1,62
20% V	1,06	1,07	1,60
10% Bc 10% V	1,06	1,07	1,92
10% Bc 20% V	1,05	1,08	1,28
20% Bc 10% V	1,04	1,08	1,28
20% Bc 20% V	1,06	1,32	1,41

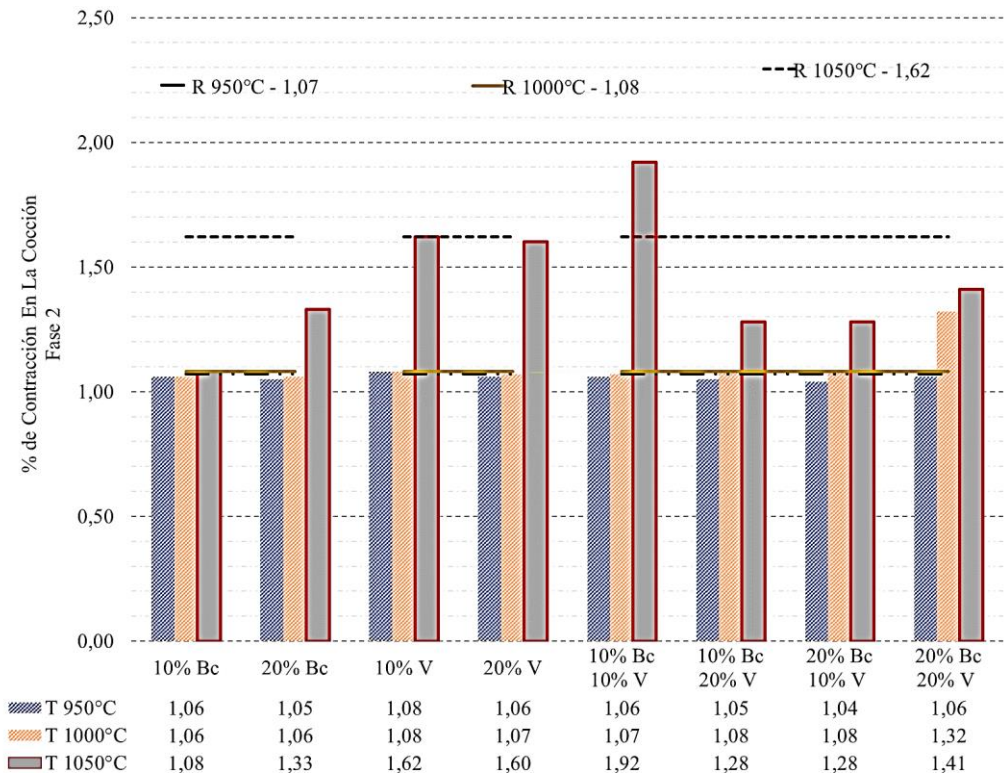


Figura 10-21 Contracción lineal en la cocción



10.10 Evaluación Técnica De La Calidad De Los Ladrillos

10.10.1 Tasa inicial de absorción

En la Tabla 10-13 se presentan los valores promedio de tasa inicial de absorción de agua de 5 unidades elaboradas con los diferentes porcentajes de inclusión de biosólido, los tipos de biosólido (B, Bs, Bc) y las diferentes temperaturas de cocción propuestas. Los ensayos se realizaron con base en lo exigido por la NTC 4017.

Los resultados representados en la Figura 10-22 demuestran que un incremento en el porcentaje de material de remplazo en cada grupo experimental se traduce en un aumento de la tasa inicial de absorción de agua. El mismo comportamiento se puede observar en elementos del mismo porcentaje (5%, 10%,15%) y tipo (B, Bs, Bc) de remplazo cocidos a diferentes temperaturas (mayor temperatura mayor tasa inicial de absorción de agua).

Tabla 10-13 Tasa inicial de absorción Fase 1

FASE 1			
Nomenclatura	TASA INICIAL DE ABSORCIÓN (g/cm ² /min)		
	PROMEDIO 5 UNIDADES		
	T 950°C	T 1000°C	T 1050°C
100% Ar	0,10	0,10	0,10
5% B	0,15	0,18	0,20
10% B	0,26	0,24	0,26
15% B	0,31	0,33	0,35
5% Bs	0,11	0,13	0,13
10% Bs	0,16	0,18	0,20
15% Bs	0,28	0,31	0,32
5% Bc	0,16	0,18	0,21
10% Bc	0,18	0,23	0,24
15% Bc	0,35	0,38	0,43

En la Figura 10-22 se presentan los elementos de la Fase I que cumplen con los requerimientos establecidos por la norma NTC 4205, la cual establece una tasa máxima de absorción inicial de agua de (0,25 g/cm²/min). En esta tabla además se recomiendan los tiempos de pre - humedecimiento adecuados para los ladrillos fabricados.

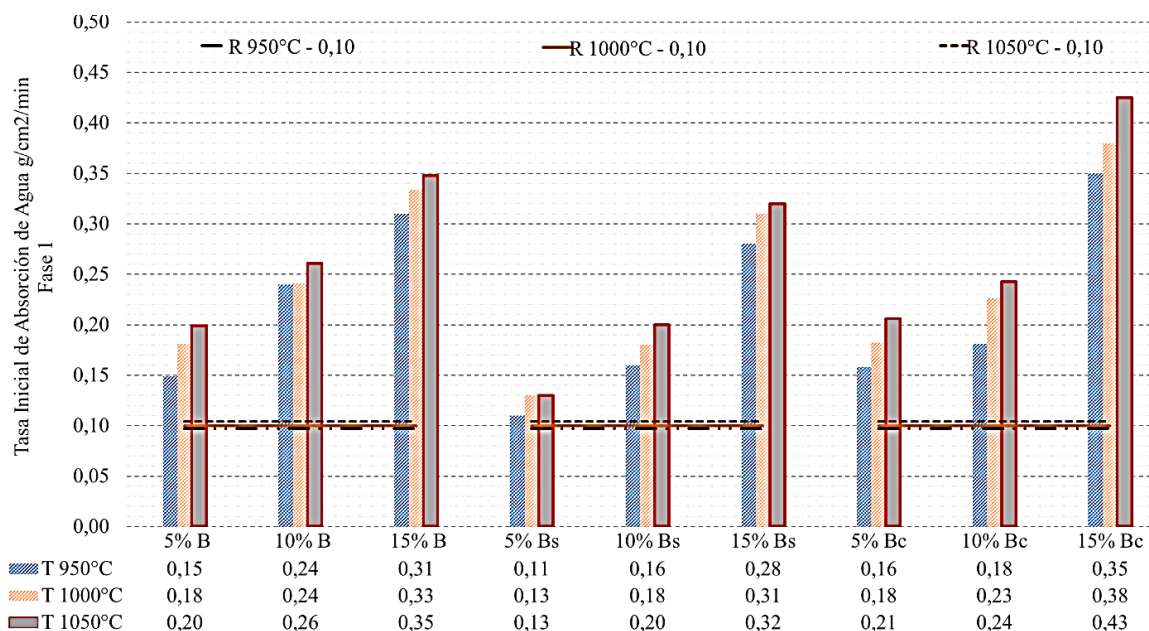


Figura 10-22 Tasa inicial de absorción de agua

Tabla 10-14 Tiempo recomendado de pre-humedecimiento

FASE 1			
TASA INICIAL DE ABSORCIÓN (g/cm²/min)			
Nomenclatura	PROMEDIO 5 UNIDADES		
	T 950°C	T 1000°C	T 1050°C
100% Ar	5 min	1 h	1 h
5% B	1 h	24 h	24 h
10% B	24 h	24 h	Revisar norma
15% B	Revisar norma	Revisar norma	Revisar norma
5% Bs	1 h	1 h	1 h
10% Bs	24 h	24 h	24 h
15% Bs	Revisar norma	Revisar norma	Revisar norma
5% Bc	24 h	24 h	24 h
10% Bc	24 h	24 h	24 h
15% Bc	Revisar norma	Revisar norma	Revisar norma

El no cumplir con lo establecido por la norma (en referencia a la tasa inicial de absorción de agua), obliga a vigilar el cumplimiento de los requisitos de absorción y resistencia a la compresión. Además, diseñar los morteros de pega y tiempos de pre - humedecimiento apropiados. La



consecuencia de un valor no controlado de tasa inicial de absorción de agua es la afectación en el fraguado normal del mortero y su posterior pérdida de resistencia.

Como se puede ver en la Tabla 10-15, los valores de tasa de absorción inicial (T.I.A) para la fase II del desarrollo experimental son menores que los encontrados en la fase I y cumplen con los requisitos exigidos en la NTC 4205, con tiempos recomendados de pre – humedecimiento de máximo 1 hora como se puede ver en la Tabla 10-16.

Si se comparan los elementos elaborados con ceniza de biosólido para las dos fases ensayadas en el estudio, se encuentra una diferencia; la cual debe ser estudiada y puede estar relacionada con la cantidad de agua usada en la mezcla para la elaboración de los elementos cerámicos de la fase II, la cual se estableció en 17%, es decir un 2% menos que la cantidad usada en la fase I.

Tabla 10-15 Tasa inicial de absorción Fase 2

FASE 2 INCLUSIÓN VIDRIO			
Nomenclatura	TASA INICIAL DE ABSORCIÓN (g/cm ² /min)		
	PROMEDIO 5 UNIDADES		
	T 950°C	T 1000°C	T 1050°C
100% Ar	0,14	0,12	0,14
10% Bc	0,08	0,14	0,11
20% Bc	0,11	0,10	0,14
10% V	0,08	0,12	0,11
20% V	0,07	0,09	0,06
10% Bc 10% V	0,11	0,11	0,10
10% Bc 20% V	0,08	0,10	0,09
20% Bc 10% V	0,12	0,12	0,11
20% Bc 20% V	0,12	0,12	0,15

En esta segunda fase experimental, no se establece un patrón de comportamiento para la T.I.A en los elementos cerámicos elaborados. Sin embargo, es visible que los cambios realizados en la mezcla y la adición de vidrio dentro de las materias primas, favorece la propiedad y permite obtener elementos que cumplen las exigencias de la norma técnica NTC 4205. Con valores que van desde 0.08 % para elementos con 15%Bc cocidos a 950°C hasta 0.15% en ladrillos de 20%Bc – 20%V y una temperatura de cocción de 1050°C.

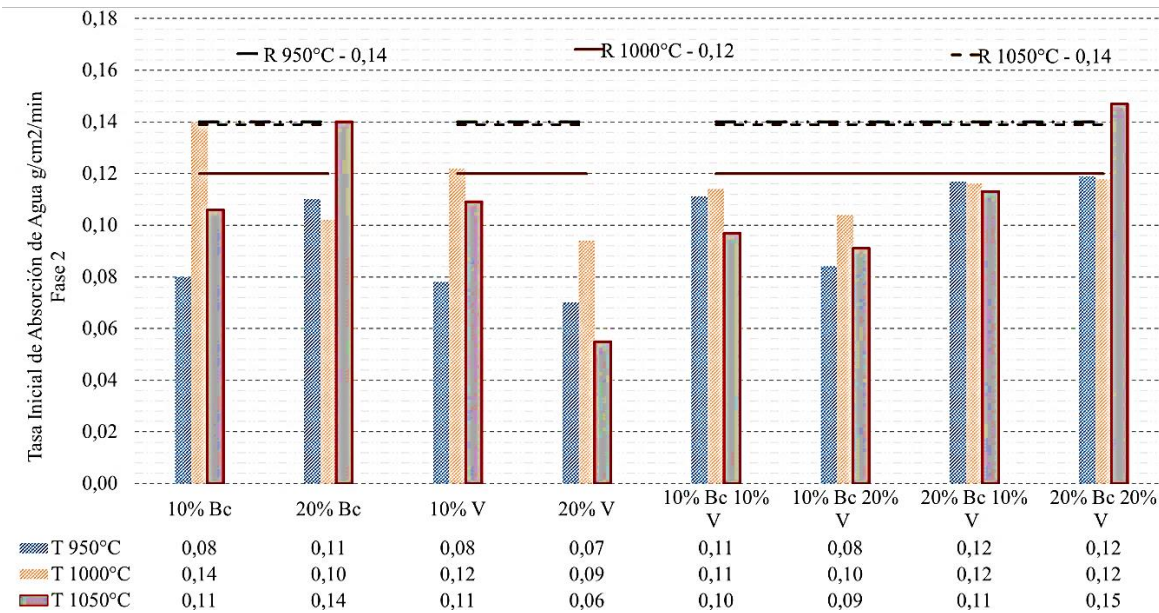


Figura 10-23 Tasa Inicial de Absorción de Agua Fase 2

La reducción de la T.I.A en los elementos fabricados con inclusión de vidrio y la variabilidad de los resultados obtenidos, se atribuye a la exudación de un material como el vidrio, que puede quedar expuesto en las caras superficiales de los ladrillos, impidiendo en algunos casos la absorción inicial de agua.

Tabla 10-16 Tiempos recomendados de pre-humedecimiento

FASE 2 INCLUSIÓN VIDRIO			
Nomenclatura	TASA INICIAL DE ABSORCIÓN (g/cm2/min)		
	PROMEDIO 5 UNIDADES		
	T 950°C	T 1000°C	T 1050°C
100% Ar	1 h	1 h	1 h
10% Bc	5 min	1 h	1 h
20% Bc	1 h	1 h	1 h
10% V	5 min	1 h	1 h
20% V	5 min	5 min	5 min
10% Bc 10% V	1 h	1 h	5 min
10% Bc 20% V	5 min	1 h	5 min
20% Bc 10% V	1 h	1 h	1 h
20% Bc 20% V	1 h	1 h	1 h



10.10.2 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 Figura 10-24 se pueden ver los valores y la relación entre las diferentes variables ensayadas en la fase experimental I.

En cuanto al porcentaje de remplazo, se evidencia una disminución de la resistencia a la compresión a medida que se incrementaba la proporción de biosólido en los diferentes grupos (B, Bs, Bc).

Para la temperatura de cocción, se concluye que se logran elementos de mayor resistencia con el incremento de la temperatura, los mayores valores promedio de resistencia se obtuvieron a 1050°C.

La norma NTC 4205 exige resistencias de 14 MPa para las unidades de mampostería no estructural y de 20 MPa para unidades de mampostería estructural. Teniendo en cuenta lo anterior, se pueden elaborar unidades de mampostería bajo las siguientes condiciones:

Para mampostería no estructural, es posible fabricar ladrillos con las combinaciones:

(5%) B de remplazo a temperaturas de 950°C, 1000°C y 1050°C

(5% - 10% - 15%) Bs de remplazo a temperaturas de 950°C, 1000°C y 1050°C

(5% - 10% - 15%) Bc de remplazo a temperaturas de 950°C, 1000°C y 1050°C

Para mampostería estructural, es posible fabricar ladrillos con las combinaciones:

5%B de remplazo a 1050°C de temperatura de cocción

(5% - 10% - 15%) de Bs de remplazo a temperaturas de 1000°C y 1050°C

(5% - 10% - 15%) de Bc de remplazo a temperaturas de 950 °C, 1000°C y 1050°C

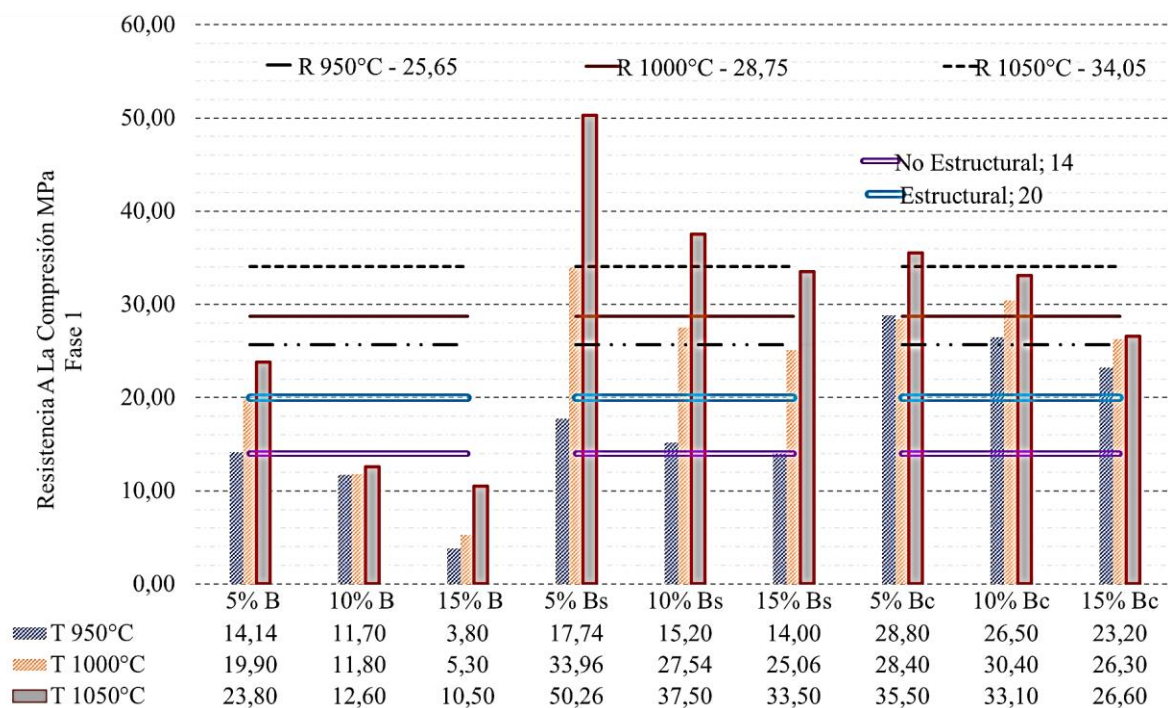


Figura 10-24 Resistencia A La Compresión Fase I

En la segunda fase de la investigación se optó por usar ceniza de biosólido a pesar de no haber generado los valores más altos de resistencia a la compresión en la fase 1; la decisión se fundamenta en el cumplimiento del valor mínimo de resistencia a la compresión establecido por la NTC 4205 para elementos de uso estructural en los 3 niveles de temperatura de cocción. El anterior es un aspecto relevante que puede llegar a disminuir la temperatura necesaria para elaborar elementos que cumplan con las exigencias de la norma y hacer el proceso más óptimo desde el punto de vista de consumo de energía en el proceso.

En la Figura 10-25 se muestran los resultados de resistencia a la compresión en la segunda fase experimental del proyecto; cómo se puede ver, todos elementos fabricados bajo las condiciones experimentales propuestas pueden ser usados como mampostería estructural y no estructural.

La inclusión del vidrio tenía como objetivo disminuir las T.I.A y absorción de agua, sin embargo, se encontró que mejora las propiedades de resistencia a la compresión de los ladrillos. En la Figura 10-25 se puede ver que aumentar el porcentaje de vidrio en la mezcla produce un incremento en la resistencia a la compresión, en cualquiera de los tres niveles de temperatura propuestos para la cocción.



El incremento en la resistencia por la presencia del vidrio puede deberse a la composición de este, principalmente por el calcio, el sodio y la sílice; elementos que proporcionan una mayor resistencia al material.

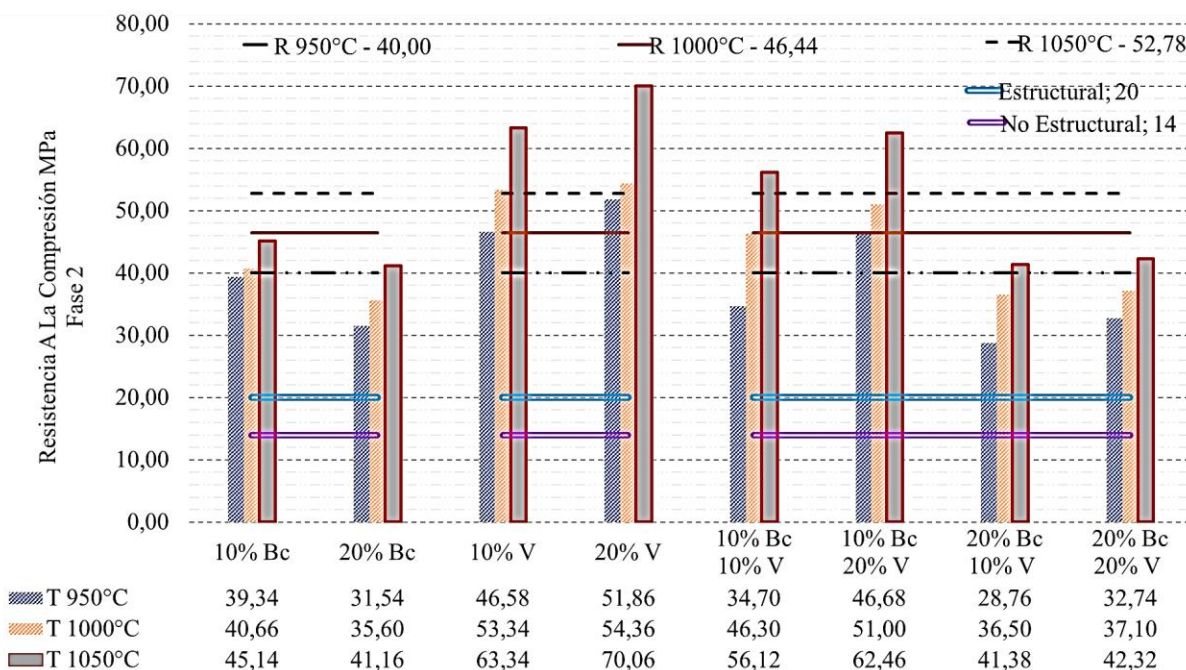


Figura 10-25 Resistencia A La Compresión Fase II

Los resultados obtenidos permiten concluir que se pueden fabricar elementos que cumplen con las exigencias de la norma técnica en cuanto a resistencia a la compresión con remplazos hasta de un 40% de la materia prima básica (Ar) y cocidos a 950°C o inclusive un menor valor. Se puede entonces lograr una reducción de explotación del mineral (arcilla) hasta de un 40%.

10.10.3 Absorción de agua

La norma técnica colombiana NTC 4205 establece los requisitos que deben cumplir las unidades de mampostería para uso interior y exterior en cuanto a la absorción de agua; los cuales dependen del uso como mampostería estructural (las cuales están fabricadas para soportar su propio peso como de otras cargas horizontales o verticales) o mampostería no estructural (utilizadas para muros divisorios o de cierre que únicamente atienden las cargas debidas a su propio peso).

Para uso interior se fijaron como valores máximos de absorción 13 % para mampostería estructural y 17 % para no estructural. En el caso de mampostería para uso exterior el límite de absorción de agua establecido en la norma es 13.5% para mampostería estructural y no estructural.



En la fase I de la investigación se evidenció el mayor problema de incumplimiento de los requisitos técnicos establecidos en la NTC 4205. En la Figura 10-26 se puede ver como la mayoría de los ladrillos fabricados con las diferentes combinaciones, no cumplen las exigencias para ser usados como elementos exteriores o interiores de tipo estructural.

De la fase 1, solamente los elementos fabricados a 1050°C y con sustitución en un 5% de biosólido sin tratamiento pueden ser usados como mampostería de uso exterior en aplicaciones estructurales y no estructurales.

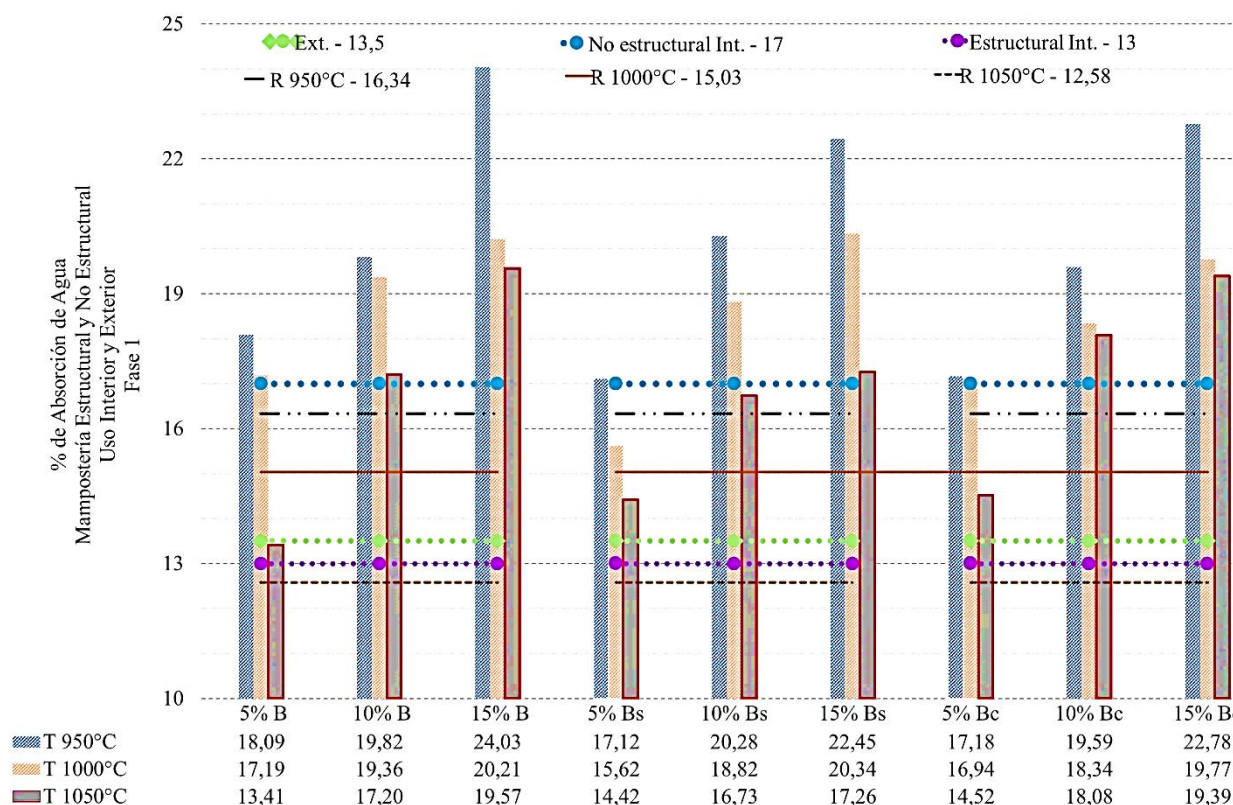


Figura 10-26 % de Absorción de Agua Fase - 1

El porcentaje de absorción de agua es un indicio de la porosidad y por ende densidad de los ladrillos. Los datos registrados en la Tabla 10-9 y Tabla 10-10 dan cuenta de esta afirmación, pues se logran elementos de mayor densidad en la fase II y de menor absorción de agua; esto probablemente por las transformaciones mineralógicas del vidrio a las temperaturas de cocción establecidas en el experimento.

Se abren entonces nuevas líneas de investigación relacionadas con la optimización de parámetros dentro del proceso de la fabricación de ladrillos incorporando biosólido y vidrio como remplazo de la materia prima básica para su fabricación.



En cuanto al efecto de las diferentes variables manipuladas sobre la absorción de agua es posible concluir que:

- El incremento de la temperatura de cocción se traduce en una disminución de la absorción de agua
- Aumentar el porcentaje de remplazo en cualquiera de los tipos de biosólido se traduce en un incremento de la absorción de agua
- La absorción de agua está relacionada con la porosidad presente en el elemento, por esto aumentar la temperatura de cocción disminuye la absorción, debido a la vitrificación y transformaciones mineralógicas que se producen a temperaturas superiores a los 1000°C.

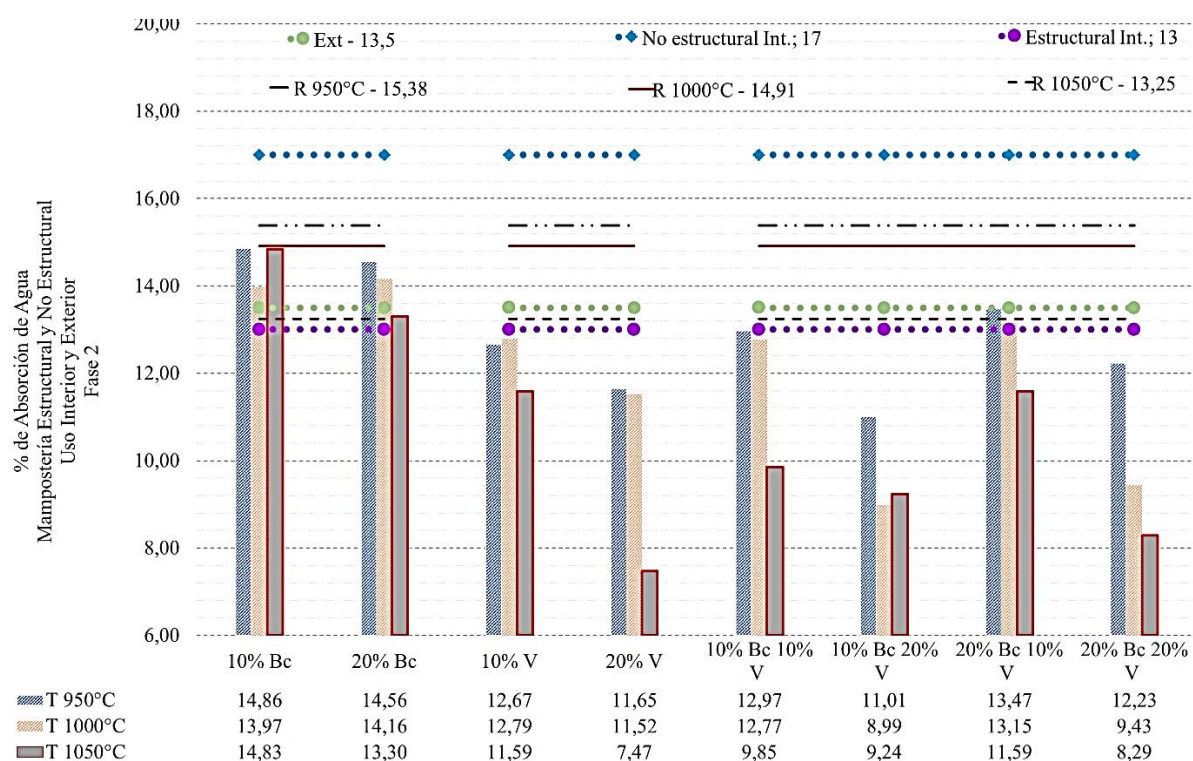


Figura 10-27 Porcentaje de Absorción de Agua Fase II

Una vez se determinaron las propiedades técnicas de los elementos fabricados en la fase I de la investigación, se evidenciaron falencias en las propiedades de T.I.A y absorción de agua debido al incumplimiento de los requisitos establecidos en la NTC 4205 para ladrillos y bloques cerámicos. La razón anterior motivo el desarrollo de la segunda fase experimental, en la que se incluye el vidrio como material para disminuir la absorción de agua; los resultados para la fase II se presentan en la Figura 10-27.



La absorción de agua disminuye con la inclusión de vidrio en la mezcla y se logra el propósito de optimización de los elementos fabricados en la fase 1. En la Figura 10-27 se puede ver como todos elementos en los que se incluye vidrio, pueden ser usados como mampostería estructural y no estructural en exteriores, inclusive en interiores (absorción de agua menor a 13%).

Respecto al efecto de la temperatura de cocción se evidencia una menor absorción de agua con su incremento; los elementos elaborados a 1050° C con 20% de remplazo de arcilla por vidrio presentan el menor valor de absorción de agua con un 7.47%, el mayor porcentaje de absorción se da en los elementos fabricados con 10% Bc y cocidos a 950°C.

10.11 Evaluación Ambiental De Los Ladrillos

10.11.1 Prueba TCLP para los ladrillos

Para desarrollar una evaluación ambiental referente al elemento elaborado, se propuso determinar la lixiviación de metales pesados en un ladrillo fabricados con biosólido seco, fabricado con 15% de Bs a 1050 °C. La prueba TCLP se llevó a cabo en el laboratorio ambiental de la Universidad de Los Andes, certificado para el desarrollo de este ensayo. Los resultados de la prueba TCLP se muestran en la Tabla 10-17.

Tabla 10-17. Resultados de la prueba TCLP para los ladrillos

Metales	Decreto 4741 de 2005 ²	Ladrillo 15 % Bs 1050 °C (mg/l)	Taiwan-EPA Regulated TCLP limit (mg/l) (Weng et al., 2003)
Arsénico (As)	5	< 0.012	5
Bario (Ba)	100	0.056	100
Cadmio (Cd)	1	0.034	1
Cromo Total (Cr)	5	< 0.012	5
Mercurio (Hg)	0.2	< 0.083	0.2
Plata (Au)	5	0.144	5
Plomo (Pb)	5	< 0.015	5
Selenio (Se)	25	< 0.036	25

Como se puede ver las concentraciones de metales lixiviados son mucho menores que los límites establecidos en el Decreto 4741 de 2005; el cual establece como residuo peligroso o

² MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto Número 4741 de 2005. “Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral”. 30 Dic 2005.



desecho tóxico aquel que: “al realizársele una prueba de lixiviación (TCLP), contiene una concentración superior a los niveles máximos permisibles en el lixiviado”

Los resultados encontrados demuestran que los ladrillos fabricados con porcentajes de incorporación de biosólido no son considerados residuos peligrosos o desechos tóxicos. Con esto se puede decir que, desde el punto de vista de concentración de metales pesados y su lixiviación, la alternativa de valorización del subproducto como materia prima para la fabricación de los ladrillos es viable.



Conclusiones

Se demuestra desde el punto de vista técnico y ambiental, que lo que en esta investigación se propone puede ser una alternativa fiable y meritoria de aplicación del concepto de economía circular dentro de la industria de los materiales de construcción y el tratamiento de las aguas residuales, pues permitirá desarrollar un nuevo modelo en ambas, basado en una cultura altamente sustentable y respetuosa del medio ambiente; pudiéndose decir que los “desechos” de una industria (en este caso los biosólidos y el vidrio) se convertirán en el “alimento” de la otra.

Los resultados obtenidos permitirán cambiar el sistema de producción vigente de bienes, que se basa principalmente en un proceso lineal de consumo y agotamiento de recursos, basado en el paradigma (extraer, fabricar, consumir, eliminar). Además se promueve el desarrollo de un nuevo modelo sostenible en la industria de la fabricación de ladrillos y la gestión más eficiente del tratamiento que se realizan a las aguas residuales.

Con el remplazo de un 40% de materia prima para la fabricación de los ladrillos se cumplirá de manera directa con premisas de la economía circular tales como:

- La gestión de los recursos naturales, ya que se alarga la vida útil de los yacimientos de arcilla y por ende se conserva el recurso y se disminuyen los impactos ambientales generados por la explotación.
- Reducción de emisiones de carbono, ya que se disminuirán los trabajos de explotación, el uso de maquinaria y equipos para el proceso de fabricación, con una ventaja adicional en un menor consumo de combustibles fósiles.

De la caracterización que realiza la PTAR EL SALITRE para el biosólido se puede concluir que es un material que mantiene las concentraciones promedio de elementos potencialmente tóxicos por debajo de los límites permitidos por la norma internacional EPA (Environment Protection Agency) título 40 parte 503. Es importante aclarar que los valores que allí se emiten, van encaminados a la posible utilización del biosólido en el suelo (uso que tiene algunas restricciones ya mencionadas en este texto). A pesar de lo anterior, el biosólido sigue siendo un residuo sólido generado en gran cantidad (volumen) potencialmente contaminante, por lo que deben buscarse alternativas adicionales a su aplicación en el suelo.



Los resultados de la caracterización química, física (granulometría, contenido de materia orgánica, contenido de sólidos, límites de Atterberg), mineralógica y el efecto observado en el proceso de secado de los elementos en verde producto de la adición de biosólido en sus tres formas (B, Bs, Bc) como materia prima en las pastas cerámicas, permiten concluir que es una materia prima que posee propiedades de un material desgrasante y puede ser usado como sustituto de estos.

Respecto a la fase I de la Investigación es posible concluir que reemplazar arcilla por biosólido (B, Bs, Bc) tienen efectos como:

- Es posible obtener elementos de menor densidad y peso que el ladrillo común, lo que se traduce en estructuras más livianas.
- Disminuir la densidad de los elementos en porcentajes que van desde 1% hasta 19%, dependiendo de la temperatura de cocción seleccionada y el porcentaje de remplazo en la mezcla.
- Incrementa la contracción en la cocción en función del porcentaje de remplazo, mayor porcentaje, mayor contracción. A pesar de esto, se obtienen elementos de calidad con porcentajes menores al 8% que es la máxima recomendada.
- Incremento de la tasa inicial de absorción de agua, lo que genera mayores tiempos de pre – humedecimiento (superiores a 24 horas); esta es una de las propiedades que limitan el uso de estos ladrillos, pero no determina la calidad de estos. Sin embargo, obliga a vigilar el cumplimiento de los requisitos de absorción y resistencia a la compresión. Además, diseñar los morteros de pega y tiempos de pre - humedecimiento apropiados.
- La resistencia a la compresión disminuye con el incremento de porcentaje de (B, Bs, Bc). A pesar de esto con las combinaciones adecuados de temperatura de cocción y porcentaje de remplazo, es posible obtener elementos que cumplan con los requisitos exigidos en la NTC 4205.
- Se obtienen elementos de menor densidad que los referentes (100% Ar), pero se incrementa la absorción de agua a valores superiores a los establecidos en la norma, esta característica limita el uso de los ladrillos.

La incorporación de vidrio en la pasta cerámica (Ar – Bc) tiene efectos como:

Disminuye la cantidad de agua necesaria para el conformado de los ladrillos, se pasa de un 19% a un 17%. Lo que se traduce en una reducción de la plasticidad y una menor cantidad de agua a eliminar en las fases de secado y cocción, por lo que la contracción lineal en la cocción disminuye comparada con la encontrada en la fase I del proyecto.

El vidrio disminuye la tasa inicial de absorción de agua a valores dentro de los límites establecidos en la NTC 4205, reduciendo los tiempos de pre – humedecimiento a máximo 1 hora en cualquiera de las combinaciones propuestas.



Mejora las propiedades de resistencia a la compresión de los ladrillos debido a la composición del vidrio: calcio, sodio y sílice; elementos que proporcionan una mayor resistencia al elemento.

La absorción de agua disminuye con la inclusión de vidrio en la mezcla y se logra el propósito de optimización de los elementos fabricados en la fase I. Todos elementos en los que se incluye vidrio pueden ser usados como mampostería estructural y no estructural en exteriores e interiores (absorción de agua menor a 13%).

El incremento en la **temperatura de cocción** de los ladrillos tiene efectos positivos en propiedades como:

- *Resistencia a la compresión.* Propiedad que mejora con el incremento de temperatura.
- *Absorción de agua.* Un incremento en la temperatura de cocción se traduce en un menor porcentaje de absorción de agua.

Los resultados encontrados pueden tener explicación en las transformaciones que experimenta la matriz cerámica al alcanzar las temperaturas máximas de cocción establecidas (950 °C/1000 °C/1050 °C); posiblemente la formación de nuevas fases mineralógicas (corindón o mullita).

La unidad de mampostería compuesta por una mezcla de 20% Bc, 20%V, 60% Ar, cocida a una temperatura de 950 ° C; se considera la más eficiente desde el punto de vista técnico y ambiental, pues cumple con los requisitos de tasa inicial de absorción de agua, absorción de agua y resistencia a la compresión, para ser usada como mampostería estructural o no estructural de uso interior y exterior, además de ser elaborada con la menor temperatura de cocción propuesta e incorporar la mayor cantidad de residuos en la pasta cerámica.

Los resultados obtenidos permiten entonces concluir que se pueden fabricar elementos que cumplan con las exigencias de la norma técnica colombiana NTC 4205 con remplazos hasta de un 40% de la materia prima básica (Ar) y cocidos a 950°C o inclusive un menor valor.

En cuanto a la parte ambiental evaluada (lixiviación de elementos tóxicos) se puede concluir que los ladrillos fabricados con porcentajes de incorporación de biosólido no son considerados residuos peligrosos o desechos tóxicos y que los metales pesados presentes en el residuo pueden ser inhibidos dentro de la matriz cerámica.

Con el desarrollo de investigación se espera brindar una alternativa a la PTAR para la gestión de su subproducto, así como reducir los riesgos de generación de impactos negativos en diferentes escenarios de un ecosistema (agua, suelo, aire) y además, optimizar el uso de los recursos naturales no renovables. Se abre entonces el camino para el desarrollo de productos y



servicios verdes combinando los estudios de los dos sectores (tratamiento aguas residuales – industria de los materiales de construcción).



Bibliografía

- Abbas, S., Saleem, M. A., Kazmi, S. M. S., & Munir, M. J. (2017). Production of sustainable clay bricks using waste fly ash: Mechanical and durability properties. *Journal of Building Engineering*, 14, 7–14. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.09.008>
- ACUEDUCTO AGUA Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ. (n.d.). *Biosólido*.
- Alarcón, J. (n.d.). *Química de Materiales Cerámicos-Notas del TEMA 3*.
- 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. *Ceramics International*, 42(12), 13333–13338. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2016.05.205>
- Aouba, L., Bories, C., Coutand, M., Perrin, B., & Lemercier, H. (2016). Properties of fired clay bricks with incorporated biomasses: Cases of Olive Stone Flour and Wheat Straw residues. *Construction and Building Materials*, 102, 7–13. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.040>
- ASHBY, Michael F y JONES, D. (1998). *Engineering Materials 2* (BH Elsevier (Ed.); 3 ed).
- Benlalla, A., Elmoussaouiti, M., Dahhou, M., & Assafi, M. (2015a). Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics bricks. *Applied Clay Science*, 118, 171–177. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.09.012>
- Benlalla, A., Elmoussaouiti, M., Dahhou, M., & Assafi, M. (2015b). Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics bricks. *Applied Clay Science*, 118, 171–177. <https://doi.org/10.1016/J.CLAY.2015.09.012>
- Blanco Álvarez, F. (n.d.). *fblanco/Leccion7.COCCION*. <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion7.COCCION.pdf>
- Blanco Álvarez, F. (2007a). *Fblanco/Leccion2.MateriasPrimas.Ceramicas*. <http://www.etsimo.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion2.MateriasPrimas.Ceramicas.2007.pdf>
- Blanco Álvarez, F. (2007b). *Fblanco/Leccion6.SECADO*. <http://www.etsimo.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion6.SECADO.pdf>
- Burton, F. L., & Tchobanoglous, G. (1995). *Ingeniería de aguas residuales. tratamiento, vertido y reutilización*. (3a ed.). <http://crai->



ustadigital.usantotomas.edu.co/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat06937a&AN=tom.000003455&lang=es&site=eds-live

Callister, W. D. (2010). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. (Primera ed). Reverté.

<http://crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat06937a&AN=tom.000155428&lang=es&site=eds-live>

CASELLES POMARES, M. J., GÓMEZ ANTÓN, M. R., MOLERO MENESES, M., & SARDÁ HOYO, J. (2010). *QUÍMICA APLICADA A LA INGENIERÍA* (UNED (Ed.)).

Castro Franco, H. E. (1998). *Fundamentos para el Conocimiento y Manejo de Suelos Agrícolas: Manual Técnico* / . Instituto Universitario Juan de Castellanos , .

Cerdeño del Castillo, F. J., & Agripino Pérez, L. (n.d.). Viabilidad técnica de uso de lodos de Estaciones de Tratamiento de Aguas Potables (ETAP) en la fabricación de materiales cerámicos para la construcción. *Conarquitectura*. Retrieved July 11, 2020, from <http://conarquitectura.com/articulos tecnicos pdf/30.pdf>

Cheeseman, C. ., Sollars, C. ., & McEntee, S. (2003). Properties, microstructure and leaching of sintered sewage sludge ash. *Resources, Conservation and Recycling*, 40(1), 13–25. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(03\)00022-3](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(03)00022-3)

Chiang, K.-Y., Chien, K.-L., & Hwang, S.-J. (2008). Study on the characteristics of building bricks produced from reservoir sediment. *Journal of Hazardous Materials*, 159(2–3), 499—504. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.02.046>

Chiang, K.-Y., Chou, P.-H., Hua, C.-R., Chien, K.-L., & Cheeseman, C. (2009). Lightweight bricks manufactured from water treatment sludge and rice husks. *Journal of Hazardous Materials*, 171(1–3), 76–82. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2009.05.144>

Cota, T. G., Reis, E. L., Lima, R. M. F., & Cipriano, R. A. S. (2018). Incorporation of waste from ferromanganese alloy manufacture and soapstone powder in red ceramic production. In *Applied Clay Science* (Vol. 161, pp. 274–281). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.04.034>

Cultrone, G., Sebastia´n, E. S., Elert, K., José de La Torre, M. J., Cazalla, O., & Rodríguez-Navarro, C. (2004a). Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks. *Journal of the European Ceramic Society*, 547–564. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(03\)00249-8](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(03)00249-8)

Cultrone, G., Sebastia´n, E. S., Elert, K., José de La Torre, M. J., Cazalla, O., & Rodríguez-Navarro, C. (2004b). *Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks*. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(03\)00249-8](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(03)00249-8)

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



<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.07.001>

Das, B. M. (1999). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. (THOMSON (Ed.)). <http://crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat06937a&AN=tom.000028184&lang=es&site=eds-live>

Demir, I. (2008). Effect of organic residues addition on the technological properties of clay bricks. *Waste Management*, 28(3), 622–627. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.03.019>

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

Elías, X. (2001). *Optimización de procesos cerámicos industriales*. 2, 35.

Eliche-Quesada, D., & Leite-Costa, J. (2016). Use of bottom ash from olive pomace combustion in the production of eco-friendly fired clay bricks. *Waste Management*, 48. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.042>

Eliche-Quesada, D., Martínez-García, C., Martínez-Cartas, M. L., Cotes-Palomino, M. T., Pérez-Villarejo, L., Cruz-Pérez, N., & Corpas-Iglesias, F. A. (2011). The use of different forms of waste in the manufacture of ceramic bricks. *Applied Clay Science*, 52(3), 270–276. <https://doi.org/10.1016/J.CLAY.2011.03.003>

Empresa de Acueducto de Bogotá. (n.d.). Retrieved June 14, 2020, from <https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB/Home/Ambiental/Inicio!/ut/p/z1/tVNdT8IwFP0tPuwRevfFmG9DDEgQDSqyvpi2lDHd2tGVTF31VjAmJHzEIE2TftxzTk9u70UYTR EWpEoTolMpSGbOMW69hGE3sh1wRr1-6EI0GTs30eMVwL2HJggjXLB0hmJmUxawNnju3AGfkdD2AkoZpbbfZgGxv5FM6EIvU MwJoVXLgpKw>

Espitia, C. J., Quintero, J., Rodriguez, A., Bernal, F. I., Freddy, R., Mojica, J., Cabezas, H., Hernández, M., Pachón, M., Múnera, M. H., Ramirez, J., & Duitama, L. M. (2003). *CATÁLOGO DE PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y MINERALÓGICAS DE LAS ARCILLAS PARA CERÁMICA ROJA EN LOS CENTROS URBANOS DE MEDELLÍN, IBAGUÉ Y SABANA DE BOGOTÁ*.

Facultad de ciencias Químicas Universidad Autónoma de Chihuahua. (n.d.). *MANEJO DE SÓLIDOS RESIDUALES O BIOSOLIDOS*. Retrieved June 9, 2020, from <http://www.oocities.org/edrochac/residuales/biosolidos9.pdf>

Fernández, J. . (2003). *El vidrio* (C. S. de I. Científicas (Ed.); Tercera ed).

Galán, E., & Aparicio, P. (n.d.). *Materias primas para la industria cerámica INTRODUCCIÓN*.

García-Pérez, O. D., Tapia-Salazar, M., Nieto-López, M. G., Villarreal-Cavazos, D., Cruz-Suárez, L. E., & Ricque-Marie, D. (2013). EFECTIVIDAD DE PRODUCTOS A BASE DE ALUMINOSILICATOS EN LA DETOXIFICACIÓN DE DIETAS CONTAMINADAS



- CON AFLATOXINAS PARA JUVENILES DE CAMARÓN BLANCO DEL PACÍFICO, LITOPENAEUS VANNAMEI. In *Ciencias marinas* (Vol. 39). scielomx. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-38802013000100001&nrm=iso
- Gippini Pérez, E. &, & Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento. (1979). Pastas cerámicas. In *TA - TT* -. Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y el Cemento.
- ICONTEC, I. C. de N. T. y C. (2015). *NTC 296 - INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA. DIMENSIONES MODULARES DE UNIDADES DE MAMPOSTERÍA DE ARCILLA COCIDA. LADRILLOS Y BLOQUES CERÁMICOS* (Vol. 53, Issue 9). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- INGEOMINAS, M. de minas y energía. I. colombiano de geología y minería. (2003). *Catálogo de propiedades físicas y químicas para cerámica roja en los centros urbanos de Medellín, Ibagué y sabana de Bogotá*.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. (1998). *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*.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC]. (2011). Norma Técnica Colombiana [NTC] 5167. *Icontec Internacional*, 571, 1–51. www.icontec.org
- Instituto Nacional de Vías (Invías). (n.d.). *DETERMINACION DEL CONTENIDO ORGANICO EN SUELOS MEDIANTE PERDIDA POR IGNICION I.N.V. E - 121 1*.
- Juel, M. A. I., Mizan, A., & Ahmed, T. (2017). Sustainable use of tannery sludge in brick manufacturing in Bangladesh. *Waste Management*, 60, 259–269. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.12.041>
- Kazmi, S. M. S., Munir, M. J., Patnaikuni, I., Wu, Y. F., & Fawad, U. (2018). Thermal performance enhancement of eco-friendly bricks incorporating agro-wastes. *Energy and Buildings*, 158, 1117–1129. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.056>
- Lagua, H., Estalin, D., Calderón, P., & Andrés, R. (2013). *Escuela politécnica nacional facultad de ingeniería mecánica obtención de adoquines fabricados con vidrio reciclado como agregado proyecto previo a la obtención del título de ingeniero mecánico*.
- Lin, D.-F., & Weng, C.-H. (2001). Use of Sewage Sludge Ash as Brick Material. *Journal of Environmental Engineering*, 127(10), 922–927. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2001\)127:10\(922\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2001)127:10(922))
- Loryuenyong, V., Panyachai, T., Kaewsimork, K., & Siritai, C. (2009). Effects of recycled glass substitution on the physical and mechanical properties of clay bricks. *Waste Management*, 29(10), 2717–2721. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2009.05.015>



- Lozano, M. A. G., & Peña, P. P. (2014). Uso de vidrio de desecho en la fabricación de ladrillos de arcilla / Use of waste glass in the manufacture of clay bricks. *CIBA Revista Iberoamericana de Las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 1(2), 43–56. <http://www.ciba.org.mx/index.php/CIBA/article/view/17>
- Mačiulaitis, R., Malaiškiene, J., & Kičaitė, A. (2008). The regulation of physical and mechanical parameters of ceramic bricks depending on the drying regime. *Journal of Civil Engineering and Management*, 14(4), 263–268. <https://doi.org/10.3846/1392-3730.2008.14.25>
- Mahamud, M., Gutiérrez, A., & Sastre, H. (1996). Biosólidos generados en la depuración del agua. In *Ingeniería del Agua* (Vol. 3, Issue 3).
- Mao, L., Wu, Y., Zhang, W., & Huang, Q. (2019). The reuse of waste glass for enhancement of heavy metals immobilization during the introduction of galvanized sludge in brick manufacturing. *Journal of Environmental Management*, 231, 780–787. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.120>
- Martínez Ana, L. T. (1995). *EL MUNDO MÁGICO DEL VIDRIO* (Fondo de Cultura Económica (Ed.); 1st ed.).
- MARTINEZ RAMIREZ, L. (n.d.). *EL RECICLAJE DEL VIDRIO*. <https://es.calameo.com/read/00123776784deee827ae4>
- DECRETO 1287 DE 2014 por el cual se establecen criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales., 18 (2014).
- Morales Güeto, J. (2012). *Tecnología de los materiales cerámicos*. <http://crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edselb&AN=edselb.3196548&lang=es&site=eds-live>
- Mozo, W., Gómez, A., Camargo, G., & Co, W. M. E. (2015). Efecto de la adición de biosólido (seco) a una pasta cerámica sobre la resistencia mecánica de ladrillos. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 14(27), 61–78.
- 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.
- NTC 4205. (2000). NTC 4205 Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos. *Norma Técnica Colombiana*, 571, 14.
- Organización de las naciones Unidas. (n.d.). *Agua y saneamiento – Desarrollo Sostenible*. Retrieved June 9, 2020, from <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>
- Orozco Barrenetxea, C., Pérez Serrano, A., González Delgado, M. N., & Rodríguez Vidal, F. J. (2003). *Contaminación ambiental: una visión desde la química*. <http://crai->



ustadigital.usantotomas.edu.co/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat06937a&AN=tom.000102893&lang=es&site=eds-live

Phonphuak, N., Kanyakam, S., & Chindaprasirt, P. (2016). Utilization of waste glass to enhance physical-mechanical properties of fired clay brick. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3057–3062. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2015.10.084>

PTAR SALITRE. (2011). *TRATAMIENTO DE AGUAS Y LODOS*.

Riaz, M. H., Khitab, A., & Ahmed, S. (2019). *Evaluation of sustainable clay bricks incorporating Brick Kiln Dust*. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.02.017>

Rincón, J. M. A. (n.d.). *Materias Primas para la Industria del Vidrio* (p. 26).

Romero, R. J. (2000). Tratamiento de Aguas Residuales. Teoría y Principios de Diseño. *Escuela Colombiana de Ingeniería*.

S.c.a.r.l., S. I. (2004). *Tecnología cerámica aplicada / SACMI* (A. E. de T. Cerámicos (Ed.); Castellón).

Salvato, J. A., Nemerow, N. L., & Agardy, F. J. (2003). *ENVIRONMENTAL ENGINEERING FIFTH EDITION*. www.wiley.com.

Schaffer, J. P. (2000). *Ciencia y diseño de ingeniería de los materiales*. <http://crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat06937a&AN=tom.000021455&lang=es&site=eds-live>

Smol, M., Kulczycka, J., Henclik, A., Gorazda, K., & Wzorek, Z. (2015). The possible use of sewage sludge ash (SSA) in the construction industry as a way towards a circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 95, 45–54. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.051>

Sutcu, M., Erdogmus, E., Gencel, O., Gholampour, A., Atan, E., & Ozbakkaloglu, T. (2019a). *Recycling of bottom ash and fly ash wastes in eco-friendly clay brick production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.017>

Sutcu, M., Erdogmus, E., Gencel, O., Gholampour, A., Atan, E., & Ozbakkaloglu, T. (2019b). Recycling of bottom ash and fly ash wastes in eco-friendly clay brick production. *Journal of Cleaner Production*, 233, 753–764. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.017>

Teixeira, S. R., Santos, G. T. A., Souza, A. E., Alessio, P., Souza, S. A., & Souza, N. R. (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. <https://doi.org/10.1016/J.CLAY.2011.05.004>

Umaña P., Francy Yolima y Romero R., J. A. (2001). Fabricación de ladrillos a partir de lodos secos. *Revista Colombiana de Ingeniería*, no. 43.



Vidrio reciclado: un proceso fascinante y de usos múltiples. (n.d.). Retrieved June 9, 2020, from <https://www.segtecvidrio.com/vidrio-reciclado-proceso-usos/>

Vladimir, R., Sarmiento, A., & Avecillas, F. R. (2009). *Diseño de un horno-túnel para planta procesadora de arcilla “Bella Azhuquita.”* 38–39.

Weng, C.-H., Lin, D.-F., & Chiang, P.-C. (2003). Utilization of sludge as brick materials. *Advances in Environmental Research*, 7(3), 679–685. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(02\)00037-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1093-0191(02)00037-0)