

	<b>GESTIÓN DE RECURSOS Y SERVICIOS BIBLIOTECARIOS</b>	<b>Código</b>	FO-SB- 12/v0
	<b>ESQUEMA HOJA DE RESUMEN</b>	<b>Página</b>	1/1

RESUMEN TRABAJO DE GRADO

AUTOR(ES):

NOMBRE(S): MARTHA MILENA APELLIDOS: GUIZA GONZÁLEZ

NOMBRE(S): YESSICA CAROLINA APELLIDOS: VILLAMIZAR DELGADO

FACULTAD: INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA INDUSTRIAL

DIRECTOR:

NOMBRE(S): LEONARDO APELLIDOS: CELY ILLERA

CODIRECTOR:

NOMBRE(S): \_\_\_\_\_ APELLIDOS: \_\_\_\_\_

TÍTULO DEL TRABAJO (TESIS): BENEFICIOS DEL USO DE CENIZAS VOLANTES EN LAS PROPIEDADES FÍSICO MECÁNICAS DEL PRODUCTO CERÁMICO DE CONSTRUCCIÓN, FABRICADO MEDIANTE PROCESO DE EXTRUSIÓN

RESUMEN

Este proyecto trata de los beneficios del uso de cenizas volantes en las propiedades físico mecánicas del producto cerámico de construcción, fabricado mediante proceso de extrusión. Para ello, se realizó una investigación tipo empírica-analítica experimental, ya que requirió caracterizar la arcilla, con el fin de analizar los resultados en cada uno de los ensayos. La recolección de información se obtuvo mediante los ensayos de laboratorio los cuales aportaron información relevante para la caracterización y evaluación de las muestras. La población, corresponde a los ladrillos fabricados por proceso de extrusión, en el laboratorio de Formación Cerámica de la Universidad Francisco de Paula Santander. El muestreo, esta conformada la arcilla extraída de la ladrillera Margres, ubicada en el municipio de Villa del Rosario. Se logró, determinar los beneficios del uso de cenizas. Se llevó a cabo, la caracterización de la materia prima arcillosa y cenizas volantes para la obtención de los productos. Seguidamente, se fabricaron las muestras con diferentes porcentajes de arcilla y cenizas volantes. Posteriormente, se evaluaron las muestras estructural y mecánicamente comparando los resultados de acuerdo con las normas técnicas colombianas. Finalmente, se categorizaron los resultados obtenidos en las mejoras de las propiedades físicomecánicas.

PALABRAS CLAVE: cenizas volantes, propiedades físico mecánicas, extrusión, arcillas.

CARACTERÍSTICAS:

PÁGINAS: 106 PLANOS: \_\_\_\_\_ ILUSTRACIONES: \_\_\_\_\_ CD ROOM: 1

Elaboró		Revisó		Aprobó	
Equipo Operativo del Proceso		Comité de Calidad		Comité de Calidad	
<b>Fecha</b>	24/10/2014	<b>Fecha</b>	05/12/2014	<b>Fecha</b>	05/12/2014

COPIA NO CONTROLADA

BENEFICIOS DEL USO DE CENIZAS VOLANTES EN LAS PROPIEDADES FÍSICO  
MECÁNICAS DEL PRODUCTO CERÁMICO DE CONSTRUCCIÓN, FABRICADO  
MEDIANTE PROCESO DE EXTRUSIÓN

MARTHA MILENA GUIZA GONZÁLEZ  
YESSICA CAROLINA VILLAMIZAR DELGADO

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA INDUSTRIAL  
SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2020

BENEFICIOS DEL USO DE CENIZAS VOLANTES EN LAS PROPIEDADES FÍSICO  
MECÁNICAS DEL PRODUCTO CERÁMICO DE CONSTRUCCIÓN, FABRICADO  
MEDIANTE PROCESO DE EXTRUSIÓN

MARTHA MILENA GUIZA GONZÁLEZ

YESSICA CAROLINA VILLAMIZAR DELGADO

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Ingeniero Industrial

Director

LEONARDO CELY ILLERA

Ingeniero Ambiental

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2020

## ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE GRADO

FECHA: 09 de marzo, 2020

HORA: 10:00 a.m.

LUGAR: Sala de Cread, tercer piso

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERIA INDUSTRIAL


TÍTULO DE LA TESIS: "BENEFICIOS DEL USO DE CENIZAS VOLANTES EN LAS PROPIEDADES FÍSICO MECÁNICAS DEL PRODUCTO CERÁMICO DE CONSTRUCCIÓN, FABRICADO MEDIANTE PROCESO DE EXTRUSIÓN."

JURADOS: ALVARO FERNANDO GOMEZ VERGEL  
ZAYDEE GONZALEZ GARCIA  
ANA MILENA GÓMEZ SOTO

DIRECTOR: LEONARDO CELY ILLERA

NOMBRE DEL ESTUDIANTE	CÓDIGO	CALIFICACIÓN	NÚMERO LETRA
MARTHA MILENA GUIZA GONZALEZ	1191825	4,3	Cuatro, tres
YESSICA CAROLINA VILLAMIZAR DELGADO	1191828	4,3	Cuatro, tres

### APROBADA

  
ALVARO FERNANDO GOMEZ VERGEL

  
ZAYDEE GONZALEZ GARCIA

  
ANA MILENA GÓMEZ SOTO

  
V.66 GAUDY CAROLINA PRADA BOTÍA  
Director Plan de Estudios  
Ingeniería Industrial



**CARTA DE AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES PARA  
LA CONSULTA, LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y LA PUBLICACIÓN  
ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO**

Cúcuta,

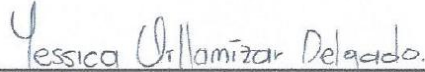
Señores  
BIBLIOTECA EDUARDO COTE LAMUS  
Ciudad

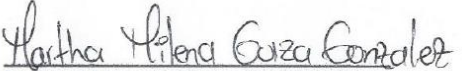
Cordial saludo:

Yo Yessica Carolina Villamizar Delgado identificada con la C.C. N° 1.090.484.163 de Cúcuta y Martha Milena Guiza Gonzalez identificada con la C.C. N° 1.090.472.277 de Cúcuta, autores de la tesis y/o trabajo de grado titulado **BENEFICIOS DEL USO DE CENIZAS VOLANTES EN LAS PROPIEDADES FÍSICO MECÁNICAS DEL PRODUCTO CERÁMICO DE CONSTRUCCIÓN, FABRICADO MEDIANTE PROCESO DE EXTRUSIÓN** presentado y aprobado en el año 2020 como requisito para optar al título de **Ingeniero Industrial**; autorizamos a la biblioteca de la Universidad Francisco de Paula Santander, Eduardo Cote Lamus, para que con fines académicos, muestre a la comunidad en general a la producción intelectual de esta institución educativa, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo de grado en la página web de la Biblioteca Eduardo Cote Lamus y en las redes de información del país y el exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad Francisco de Paula Santander.
- Permita la consulta, la reproducción, a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato CD-ROM o digital desde Internet, Intranet etc.; y en general para cualquier formato conocido o por conocer.

Lo anterior, de conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la ley 1982 y el artículo 11 de la decisión andina 351 de 1993, que establece que "**los derechos morales del trabajo son propiedad de los autores**", los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

  
Yessica Carolina Villamizar Delgado  
C.C 1.090.484.163

  
Martha Milena Guiza Gonzalez  
C.C 1.090.472.277

## Contenido

	<b>pág.</b>
Introducción	14
1. Problema	16
1.1 Título	16
1.2 Planteamiento del Problema	16
1.3 Formulación del Problema	17
1.4 Justificación	17
1.5 Objetivos	18
1.5.1 Objetivo general	18
1.5.2 Objetivos específicos	18
1.6 Alcances y Limitaciones	18
1.6.1 Alcance	18
1.6.2 Limitaciones	19
2. Marco Referencial	20
2.1 Antecedentes	20
2.1.1 A nivel internacional	20
2.1.2 A nivel nacional	21
2.1.3 A nivel local	22
2.2 Marco Contextual	23
2.3 Marco Teórico	25
2.4 Marco Conceptual	29
2.5 Marco Legal	33
3. Diseño Metodológico	35

3.1 Tipo de Investigación	35
3.2 Población y Muestra	35
3.2.1 Población	35
3.2.2 Muestra	35
3.3 Instrumentos para la Recolección de la Información	36
3.3.1 Fuentes primaria	36
3.3.2 Fuentes secundarias	36
3.4 Análisis de la Información	36
4. Resultados y Discusión	37
4.1 Preparación de las Materias Primas	37
4.2 Caracterización de la Materia prima Arcillosa y Cenizas Volantes	43
4.2.1 Caracterización mineralógica y química de la arcilla	43
4.2.2 Caracterización mineralógica y química de las cenizas volantes	45
4.3 Fabricación y Conformado de las Muestras con diferentes Porcentajes de Arcilla y Cenizas Volantes	49
4.3.1 Modelo de diseño experimental de dos factores	49
4.3.2 Conformado de los especímenes.	53
4.4 Evaluación de las Propiedades Estructurales y Mecánicas de las Muestras	57
4.4.1 Aspectos tecnológicos	57
4.4.1.1 Condición seca	58
4.4.1.2 Condición cocida	63
4.5 Comparativo de los Resultados Obtenidos en las formulaciones con la Norma Internacional NTC 919	74
5. Conclusiones	77

6. Recomendaciones	80
Referencias Bibliográficas	81
Anexos	89



## Lista de Figuras

	<b>pág.</b>
Figura 1. Extrusora sin vacío	24
Figura 2. Triangulo de aptitudes de Winkler	41
Figura 3. Pronóstico de extrusión (método de Casagrande)	42
Figura 4. Difractogramas de rayos X de la materia prima arcillosa	43
Figura 5. Difractograma de rayos X de las cenizas volantes	48
Figura 6. Proceso de conformado de los especímenes	54
Figura 7. Formulaciones de arcilla y cenizas volantes	55
Figura 8. Densificación húmeda de los especímenes	58
Figura 9. Densificación seca de los especímenes	61
Figura 10. Contracción seca de los especímenes	62
Figura 11. Pérdidas de masa seca de los especímenes	63
Figura 12. Densificación cocida en atmósfera oxidante	65
Figura 13. Densificación cocida en atmósfera reductora	66
Figura 14. Propiedad estructural en atmósfera oxidante	70
Figura 15. Propiedad estructural en atmósfera reductora	70
Figura 16. Propiedad mecánica (resistencia a la flexión) en atmósfera oxidante	72
Figura 17. Propiedad mecánica (resistencia a la flexión) en atmósfera reductora	72

## Lista de Tablas

	<b>pág.</b>
Tabla 1. Formulaciones, porcentaje en masa y caracterización física	39
Tabla 2. Composición química de la materia prima arcillosa (FRX)	45
Tabla 3. Composición química de las cenizas volantes	46
Tabla 4. Concentración de fases en las cenizas volantes	49
Tabla 5. Número de réplicas necesario para un diseño experimental	51
Tabla 6. Coeficiente de ruptura (kgf/cm <sup>2</sup> ), tipos de mezcla y atmósferas	52
Tabla 7. ANOVA	53
Tabla 8. Contracción lineal cocida	67
Tabla 9. Pérdida por calcinación	68

## Lista de Anexos

	<b>pág.</b>
Anexo 1. Distribución normal estándar; los elementos $P(Z \leq z) = a$	90
Anexo 2. Curva de cocción	91
Anexo 3. Aspectos tecnológicos en húmedo y seco	92
Anexo 4. Aspectos y caracterización tecnológica cocidos	95
Anexo 5. Propiedad estructural evaluada según la NTC 919	105
Anexo 6. Propiedad Mecánica evaluada según la NTC 919	106

## Resumen

Este proyecto trata de los beneficios del uso de cenizas volantes en las propiedades físico mecánicas del producto cerámico de construcción, fabricado mediante proceso de extrusión. Para ello, se realizó una investigación tipo empírica-analítica experimental, ya que requirió caracterizar la arcilla, con el fin de analizar los resultados en cada uno de los ensayos. La recolección de información se obtuvo mediante los ensayos de laboratorio los cuales aportaron información relevante para la caracterización y evaluación de las muestras. También se apoyó en la información encontrada en fuentes como artículos publicados en la base de datos de Science direct y Scielo. La población, corresponde a los ladrillos fabricados por proceso de extrusión, en el laboratorio de Formación Cerámica de la Universidad Francisco de Paula Santander. El muestreo, esta conformada la arcilla extraída de la ladrillera Margres, ubicada en el municipio de Villa del Rosario, y las cenizas volantes pertenecieron a la planta 2 de la termoeléctrica Termotasajero Dos, ubicada en el municipio de El Zulia, Norte de Santander. Se logró, determinar los beneficios del uso de cenizas volantes en las propiedades físico mecánicas del producto cerámico de construcción, fabricado mediante proceso de extrusión. Se llevó a cabo, la caracterización de la materia prima arcillosa y cenizas volantes para la obtención de los productos. Seguidamente, se fabricaron las muestras con diferentes porcentajes de arcilla y cenizas volantes. Posteriormente, se evaluaron las muestras estructural y mecánicamente comparando los resultados de acuerdo con las normas técnicas colombianas. Finalmente, se categorizaron los resultados obtenidos en las mejoras de las propiedades físicomecánicas en relación a los porcentajes de mezcla de arcilla y cenizas volantes de acuerdo a la norma técnica aplicada para el producto.

## **Abstrac**

This project deals with the benefits of the use of fly ash on the physical-mechanical properties of the ceramic construction product, manufactured using an extrusion process. For this, an empirical-analytical experimental research was carried out, since it required characterizing the clay, in order to analyze the results in each of the trials. The collection of information was obtained through laboratory tests which provided relevant information for the characterization and evaluation of the samples. It also relied on information found in sources such as articles published in the Science direct and Scielo databases. The population corresponds to the bricks manufactured by extrusion process, in the Ceramic Training laboratory of the Francisco de Paula Santander University. The sampling consists of the clay extracted from the Margres brickyard, located in the municipality of Villa del Rosario, and the fly ash belonged to plant 2 of the Termotasajero Dos thermoelectric plant, located in the municipality of El Zulia, Norte de Santander. It was possible to determine the benefits of the use of fly ash on the physical-mechanical properties of the ceramic construction product, manufactured using an extrusion process. The characterization of the clay raw material and fly ash was carried out to obtain the products. Next, the samples were made with different percentages of clay and fly ash. Subsequently, the samples were structurally and mechanically evaluated, comparing the results according to Colombian technical standards. Finally, the results obtained in the improvements of the physical-mechanical properties in relation to the percentages of clay and fly ash mixture were categorized according to the technical standard applied for the product.

## Introducción

La cantidad de materiales cerámicos de construcción, que se fabrican en la ciudad de Cúcuta para satisfacer la demanda, ha ido en aumento durante los últimos años. En Colombia, se producen 376.947 toneladas mensuales de ladrillo. Investigaciones reflejan que las ventas totales de la industria ladrillera nacional ascienden cada año, siendo Norte de Santander el segundo departamento con un alto porcentaje de participación en esta industria (Pacheco & Severiche, 2015).

Uno de los problemas en la fabricación de productos cerámicos por extrusión, en la ciudad de Cúcuta, es la cantidad de defectos que se presentan, debido al uso inadecuado de la materia prima; defectos como corazón negro, deformidades de los calibres, entre otros, generan piezas irregulares, con propiedades que no cumplen con las normas nacionales como la NTC 919 y la NTC 4321, sin dejar de mencionar el alto grado de contaminación generado a partir de su fabricación (Rozo, Sánchez & Álvarez, 2014).

Con base en ello, se buscó mejorar las propiedades de los productos cerámicos, utilizando las cenizas volantes; este es un residuo industrial que se genera en las termoeléctricas, a partir de la combustión del carbón que, debido a sus componentes, se convierte en un residuo contaminante (Fuentes, Fragozo & Vizcaino, 2015). La investigación buscó formular pastas, con el objetivo de evaluar su comportamiento físico mecánico y observar la influencia que estos agregados generan en las propiedades de las pastas tradicionales, para fabricar productos cerámicos.

Por esta razón, en la investigación se desarrolló el estudio de la influencia que genera las cenizas volantes al ser incorporadas en el proceso de fabricación de productos de revestimiento, tipo fachaleta, por proceso de extrusión, y de esta manera, se evaluó si se incrementan o no las

propiedades mecánicas y estructurales, además de minimizar los efectos contaminantes al medio ambiente, generados por las cenizas volantes.

## **1. Problema**

### **1.1 Título**

BENEFICIOS DEL USO DE CENIZAS VOLANTES EN LAS PROPIEDADES FISICO MECÁNICAS DEL PRODUCTO CERÁMICO DE CONSTRUCCIÓN, FABRICADO MEDIANTE PROCESO DE EXTRUSIÓN

### **1.2 Planteamiento del Problema**

Debido a la irregularidad en la utilización de las materias primas, los materiales de construcción en la ciudad de Cúcuta se han visto afectados en su calidad, presentando como consecuencia defectos de corazón negro, deformidades de los calibres, entre otros, en el producto terminado. Estos defectos se ven reflejados en la deficiencia de sus propiedades y la dificultad para su uso (Rozo, Sánchez & Álvarez, 2014).

Para el mejoramiento en las propiedades de los productos cerámicos, se han utilizado residuos sólidos como agregados, en las materias primas para fabricar nuevos materiales ingenieriles, siendo una vía eficaz para alcanzar el objetivo antes mencionado; estos se incorporaron a las pastas tradicionales durante el proceso de fabricación, por esta razón, este tipo de investigaciones se han convertido en un tema muy estudiado, pues en la mayoría de los casos proporcionan resultados favorables en las propiedades de estos productos (Liu, y otros, 2016).

Con base en lo anterior, este proyecto buscó evaluar el efecto que genera, agregar cenizas volantes en la fabricación de productos de revestimiento tipo fachaleta por proceso de extrusión, y así, se logró observar si los resultados obtenidos son los mejores en el producto terminado y de esta manera, incrementar la calidad, previendo los impactos al medio ambiente que generan las



cenizas volantes, aprovechando que este residuo industrial se produce en grandes cantidades en la región.

### **1.3 Formulación del Problema**

¿De qué manera beneficio el uso de cenizas volantes las propiedades físico mecánicas del producto cerámico de construcción, fabricado mediante proceso de extrusión?

### **1.4 Justificación**

Con el fin de aprovechar los recursos técnicos, tecnológicos y las materias primas presentes en la industria cerámica de Norte de Santander, y en el laboratorio de Formación Cerámica de la Universidad Francisco de Paula Santander, se desarrolló esta investigación, donde se buscó evaluar la incorporación de cenizas volantes y su influencia en las propiedades estructurales y mecánicas de productos de revestimiento tipo fachaleta, fabricados mediante el proceso de extrusión a nivel de laboratorio y, posterior proceso de quema en el horno colmena a nivel industrial.

Con los resultados de este proyecto, se logra tener un efecto positivo en las empresas cerámicas de la región, para la mejora de sus productos y dándoles valor agregado. Las empresas pueden aprovechar los aportes realizados por este proyecto, tomándolos como referencia para el mejoramiento en la calidad de los productos cerámicos.

De la misma manera, el desarrollo de esta investigación, permitió consolidar los conocimientos y competencias del Ingeniero Industrial, adquiridos durante su proceso de formación académica, para contribuir en la optimización de procesos productivos de los materiales de construcción.

## 1.5 Objetivos

**1.5.1 Objetivo general.** Determinar los beneficios del uso de cenizas volantes en las propiedades físico mecánicas del producto cerámico de construcción, fabricado mediante proceso de extrusión.

**1.5.2 Objetivos específicos.** Caracterizar la materia prima arcillosa y cenizas volantes para la obtención de los productos.

Fabricar las muestras con diferentes porcentajes de arcilla y cenizas volantes.

Evaluar las muestras estructural y mecánicamente comparando los resultados de acuerdo con las normas técnicas colombianas.

Categorizar los resultados obtenidos en las mejoras de las propiedades físicomecánicas en relación a los porcentajes de mezcla de arcilla y cenizas volantes de acuerdo a la norma técnica aplicada para el producto.

## 1.6 Alcances y Limitaciones

**1.6.1 Alcance.** El proyecto de investigación, analizó los resultados estructurales y mecánicos del producto cerámico de construcción conformado mediante el proceso de extrusión el cual fue evaluado mediante la NTC 4321.

**1.6.2 Limitaciones.** En el desarrollo del proyecto, se presentaron limitantes tales como, la realización del análisis mineralógico y químico de DRX y FRX, y el análisis Termogravimétrico (ATG), los cuales no se lograron adelantar en el Laboratorio de Formación Cerámica de la Universidad Francisco de Paula Santander, debido a que este no cuenta con los equipos técnicos y tecnológicos para el desarrollo de estos análisis.

## 2. Marco Referencial

### 2.1 Antecedentes

**2.1.1 A nivel internacional.** Castellanos, Mawson, Burke & Prabhakar (2017). Compuestos de cenosfera y arcilla mezclados con cenizas volantes para baldosas resistentes al impacto. Construcción y materiales de construcción.

En este estudio, se investigaron cuatro tipos de compuestos para la fabricación de azulejos, las cuales contenían arcilla 100% (muestra 1), 84% arcilla y 16% cenizas volantes (muestra 2), 84% arcilla y 16% material de carga (muestra 3) y la muestra 4 con arcilla al 84%, carga al 16% y cenizas volantes al 16%. Cada lote se colocó en un recipiente separado y luego se aplanó individualmente bajo un rodillo losa, para obtener un espesor de cada muestra de aproximadamente 15 mm; con estas muestras se fabricaron azulejos a una temperatura de 1063 °C, las cuales fueron sometidas a pruebas de impacto (carga de impacto de 1J), para evaluar su integridad estructural y durabilidad.

Un total de veinte muestras se ensayaron, con cinco muestras para cada tipo de compuesto. Los resultados evidenciaron que la adición de cenizas volantes aumenta la fuerza máxima y la rigidez de las muestras. El estudio mostró una reducción en el grado de daño de hasta 26,44% en la muestra 4 y 21,84% en muestra 2. Es evidente que las muestras de arcilla + cenizas volantes, obtuvieron el mejor resultado con bajo grado de daño, y baja densidad normalizada. Por ello, se puede concluir que este tipo de mezcla es apropiado para ser utilizado en tejas con características únicas de densidad reducida y una mejor resistencia a daños por impacto.

Con base en lo anterior, se pudo demostrar que la utilización de desechos industriales como las cenizas volantes, para la fabricación de productos cerámicos, arroja mejores resultados al producto final; este estudio, aportó al proyecto, datos sobre los porcentajes de arcilla y cenizas volantes ideales, utilizados para obtener resultados favorables.

**2.1.2 A nivel nacional.** Roa, Paredes & Lara (2017). Aplicación de  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  y cenizas volantes como refuerzo en la matriz de unidades cerámicas macizas. Revista de Ingeniería Universidad de Medellín. Medellín, Colombia:

En este artículo se reportaron las composiciones químicas obtenidas por FRX de arcilla y cenizas volantes producto de la combustión de carbón, en un horno tipo colmena. Se seleccionaron las cantidades de arcilla, cenizas volantes y sulfato de magnesio ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), en función de su composición química para lograr una eflorescencia total en la superficie del ladrillo (unidad cerámica maciza). Una vez se conformaron por prensado las unidades de mampostería, se sometieron a tratamiento a  $400\text{ }^\circ\text{C}$  durante dos horas, con el fin de eliminar la humedad; una vez alcanzaron  $950\text{ }^\circ\text{C}$ , se cocinaron en esta temperatura durante tres horas. Se estableció la composición química de las eflorescencias en la superficie de las probetas, por medio de FRX; se analizó morfológicamente el corte transversal de un ladrillo y, por último, las probetas se sometieron a ensayos de compresión para determinar su resistencia y de absorción máxima de agua, teniendo en cuenta la norma técnica colombiana NTC 4205.

En el artículo anterior, se evidenció la ejecución de ensayos con resultados favorables en las diferentes muestras de estudio compuestas por aditivos de cenizas volantes, demostrando que estos especímenes mantuvieron una resistencia mínima a la compresión exigida por la norma NTC 4205, a pesar de contener un alto grado de adición de sulfato de magnesio. Es decir, el

comportamiento de un espécimen que contiene en su composición física cenizas volantes cumple con el requerimiento de la norma en cuanto a propiedades mecánicas se refiere (Compresión y absorción de agua), estos ensayos fueron objeto de estudio en el avance de este proyecto, por el cual este artículo aporta a la ejecución de esta investigación.

**2.1.3 A nivel local.** Sánchez., Corpas & Rojas (2019). Cenizas Volantes de Termoeléctrica como materia prima para la fabricación de materiales cerámicos de construcción: efecto de la temperatura de cocción sobre el material. Se emplearon cenizas volantes de una central termoeléctrica, como sustituto parcial de material arcilloso, para la elaboración de cerámicos de construcción. Las probetas se realizaron con sustituciones del 5, 10, 15 y 20% (peso), mediante conformado por extrusión; se emplearon varias temperaturas de cocción (900 a 1200°C). Esto, para establecer correlaciones entre la microestructura, la topografía y las propiedades tecnológicas del cerámico, tales como la resistencia mecánica a la flexión, la resistencia a la abrasión profunda, el porcentaje de absorción de agua, la conductividad térmica y la contracción lineal de secado/cocción. El análisis microestructural y de topografía, dejó en evidencia que las cenizas volantes son ricas en fase amorfa y con presencia de elementos de carácter fundente (K y Fe). Los fenómenos de recristalización de sílice presente y el aumento de porosidad, parecen explicar el comportamiento obtenido. Sustituciones hasta del 10% de CV, permiten obtener cerámicos con aplicabilidad en el sector de la construcción.

Este artículo generó un gran aporte en el avance de este proyecto, ya que en él se llevó a cabo la ejecución del análisis de varios ensayos como: Resistencia Mecánica a la Flexión, Resistencia a la Abrasión Profunda, Porcentaje de Absorción de Agua, y Caracterización Química de DRX Y FRX, dando resultados favorables en las probetas donde se incorporaron diferentes porcentajes en peso de Cenizas Volantes. Estos ensayos se realizaron en el desarrollo

práctico de este proyecto, de manera que, los resultados pudieron llegar hacer comparados, debido a que se utilizaron diferentes porcentajes de cenizas volantes y otro tipo de arcilla para las mezclas.

Al realizar una revisión en la literatura en la búsqueda de trabajos en los que se incorporaron cenizas volantes, como material sustituto en las pastas cerámicas, se tomaron como referente los resultados obtenidos de dichos trabajos, en donde la incorporación de cenizas hasta del 10% permitía obtener productos cerámicos aceptables; se planteó, para el desarrollo del proyecto, mezclas con cenizas volantes a partir del 10% en peso, teniendo en cuenta factores diferenciales como el tipo de arcilla utilizado, las temperaturas de cocción, entre otros.

## **2.2 Marco Contextual**

**Laboratorio de Formación Cerámica.** El laboratorio de Formación Cerámica de la Universidad Francisco de Paula Santander, fue empleado para la fabricación de productos de revestimiento para piso tipo fachaleta por extrusión, con el objetivo de llevar a cabo el desarrollo práctico del proyecto.

**Áreas del Laboratorio.** El laboratorio de Formación Cerámica, cuenta con ocho áreas de actuación, distribuidas de la siguiente manera: sala de diseño, sala de preparación de pastas, sala de conformado industrial, sala de conformado artesanal, sala de secado y cocción, sala de decoración, sala de control y calidad y almacén (Universidad Francisco de Paula Santander).

**Análisis que se pueden realizar en el Laboratorio.** El Laboratorio de Formación Cerámica, está dotado de equipos con el fin de ofrecer servicios de análisis y control de proceso, asegurando así productos de buena calidad, y para el desarrollo de investigaciones y/o prácticas industriales,

entre otras (Universidad Francisco de Paula Santander).

Los análisis y ensayos que se realizaron en el laboratorio, para el desarrollo del proyecto son los siguientes: Retenido sobre tamiz, Absorción de agua, índice de plasticidad, Contracción, Resistencia a la Flexión, Conformado Industrial por Extrusión y Proceso de secado.

Para el conformado de las muestras tipo fachaleta por proceso de extrusión se empleó la extrusora sin vacío del Laboratorio de Formación Cerámica (ver figura 1), con molde rectangular de dimensiones de 250 mm de largo, 80 mm de ancho y 10 mm de espesor.



**Figura 1. Extrusora sin vacío**

Fuente: Universidad Francisco de Paula Santander, 2010.

El proceso de cocción de las fachaletas se realizó en un horno Colmena (llama invertida), en dos atmósferas (Oxidante y Reductora) y a temperaturas finales de 950 °C, 975 °C, 1000 °C, 1025 °C, 1050 °C y 1100 °C.



## 2.3 Marco Teórico

**Arcilla.** Se define, como un material natural, terroso, de grano fino que es plástico cuando esta húmedo y duro cuando es sometido a procesos de cocción. La arcilla está formada por minerales finamente divididos, principalmente silicatos de aluminio, de estructura cristalizada laminar. La mayor parte de cualquier arcilla está formada por los siguientes materiales arcillosos: el grupo de la caolinita, el grupo de la montmorillonitas y la arcilla potásica o ilítas. La Fórmula molecular de la arcilla:  $Al_2O_3 - 2SiO_2 - H_2O$ . Esta fórmula no incluye las impurezas que siempre están presentes. Por tal motivo la fórmula anterior hace referencia a una arcilla pura que recibe el nombre de caolín. Las arcillas con un mayor grado de pureza son las que cuentan con un alto contenido de sílice y alúmina. El contenido de hierro y otras impurezas en este tipo de arcillas tiende a ser más bajo (Lozano & González, 2016).

**Cenizas Volantes.** Las cenizas volantes, son partículas muy finas, vitrificadas y esféricas, residuo de la combustión del carbón utilizado en centrales termoeléctricas. Este material está compuesto por tres elementos predominantes: silicio, aluminio y hierro, los cuales se presentan en forma de óxidos que representan del 75% al 95% del total del material. Análisis mineralógicos muestran que del 65% al 90 % de las cenizas volantes se encuentra en estado vítreo. Las cenizas volantes presentan diferentes propiedades físicas y químicas, dependiendo del tipo de carbón usado y el proceso de combustión de la central termoeléctrica (Chávez & Guerra, 2015).

Las cenizas volantes se clasifican en diferentes tipos, atendiendo principalmente su contenido en cal, y según la norma ASTM C 618-08a se define: Clase F: Producidas por la calcinación de carbón Bituminoso, contiene pequeñas cantidades de cal, generalmente inferiores al 15%. Se consideran clase F, cuando la suma de sílice, aluminio y hierro no es inferior al 70%. Estas

cenizas presentan propiedades puzolánicas. Clase C: Producidas por la calcinación del carbón Sub-bituminoso o Lignito, contiene una mayor cantidad de cal, generalmente entre el 15 y 30%. Se consideran clase C, cuando la suma de sílice, aluminio y hierro es Mayor del 50% (Chávez & Guerra, 2015).

**Conformado por Extrusión.** La palabra extrusión viene del latín "extrudere" que significa expulsar. Extrusión es, en general, la acción de dar forma o moldear una masa haciéndola salir por una abertura especialmente dispuesta. La extrusión es un procedimiento industrial, que permite obtener barras de diferentes formas, generalmente complejas (Lozano & González, 2016).

**Difracción de Rayos X (DRX).** Es una técnica de análisis versátil y no destructiva para la identificación y determinación cuantitativa de las fases cristalinas presentes en los compuestos en muestras sólidas o en forma de polvos. Un cristal está formado por un conjunto de átomos que se repiten en una red tridimensional periódica. Las propiedades de los materiales cristalinos dependen de su composición química (qué tipo de átomos forman el conjunto de átomos que se repite y cuántos son) y de su estructura (cómo están colocados esos átomos y cómo se repiten para formar el cristal). Los materiales cristalinos, se diferencian unos de otros, ya sea por su composición, o bien por su estructura. Un compuesto con una composición y estructura definidas, se conoce como fase cristalina. Así pues, la técnica de DRX permite distinguir una fase cristalina de otras y conocer su estructura. Tal identificación se alcanza comparando patrones de DRX obtenidos a partir de una muestra desconocida con relación a una base de datos internacional que contiene patrones de referencia de un gran número de materiales (Flores, 2014).

**Ensayo de Límite Plástico e Índice de Plasticidad.** Según la norma ASTM D 4318-05, el ensayo determina el contenido de humedad de la muestra y nos dice si se comporta como un material plástico o no (Cometa & Méndez, 2016).

**Ensayo de Tensión.** En física e ingeniería, se denomina tensión mecánica a la fuerza por unidad de área en el entorno de un punto material sobre una superficie real o imaginaria de un medio continuo. La definición anterior se aplica tanto a fuerzas localizadas como fuerzas distribuidas, uniformemente o no, que actúan sobre una superficie. En este ensayo, como se describe en la norma ASTM E8 o la NTC 4321- 4 es posible la determinación de algunos parámetros como el punto de cedencia y la resistencia a la tensión. En esta prueba la muestra se somete a una carga uniaxial de tensión continuamente creciente hasta que el material llega a la falla. Durante todo el ensayo se registran tanto la carga como el alargamiento producido en determinados puntos de carga. En la norma ASTM E8 se encuentran los estándares necesarios para las máquinas de ensayo, los tipos de muestras, la velocidad de los ensayos y la determinación de los valores de las propiedades del material. Este es el ensayo mecánico más importante, ya que proporciona la información más completa de la conducta mecánica que cabe esperar de un material sometido a un estado de tensión uniaxial. El ensayo de tensión puede ser utilizado para determinar varias propiedades de los materiales que son importantes para el diseño. Este ensayo es utilizado para medir la resistencia de un material a una fuerza estática o aplicada lentamente. Esta prueba consiste en alargar una probeta de ensayo por fuerza de tensión, ejercida gradualmente, con el fin de conocer ciertas propiedades mecánicas de materiales en general: su resistencia, rigidez y ductilidad. Sabiendo que los resultados del ensayo para un material dado son aplicables a todo tamaño y formas de muestra, se ha establecido una prueba en la cual se aplica una fuerza de tensión sobre una probeta de forma cilíndrica y tamaño normalizado, que se

maneja universalmente entre los ingenieros. Este ensayo se lleva a cabo a temperatura ambiente entre 10°C y 35°C (Flores, 2014).

**Fachaleta.** Son los materiales que comúnmente se utilizan para revestir las paredes hechas de concreto, yeso o fibrocemento y en algunas ocasiones se utilizan para revestimiento de pisos. Dan aspecto de que la fachada del edificio fue construida con el material del cual está hecha la fachaleta. Los materiales a veces son imitación o son únicamente una fracción del elemento natural. La fachaleta puede estar hecha de ladrillo, mármol, piedra natural, cemento, adobe, cerámica, granito, fibra de vidrio, plástico, dependiendo del tipo de acabado que le quiere dar a la fachada del edificio, ya sea para definir un estilo arquitectónico, mediterráneo, colonial, oriental, etc. o solo para eliminar la monotonía en el diseño del proyecto. Su uso puede ser para interiores y exteriores (Zavala, 2015).

**Fluorescencia de Rayos X.** La fluorescencia de rayos X (FRX) es una técnica espectroscópica que utiliza la emisión secundaria o fluorescente de radiación X, generada al excitar una muestra con una fuente de radiación X. La radiación X incidente o primaria, expulsa electrones de capas interiores del átomo. Los electrones de capas más externas ocupan los lugares vacantes, y el exceso energético resultante de esta transición se disipa en forma de fotones, radiación X fluorescente o secundaria, con una longitud de onda característica que depende del gradiente energético entre los orbitales electrónicos implicados, y una intensidad directamente relacionada con la concentración del elemento en la muestra. La FRX, tiene como finalidad principal el análisis químico elemental, tanto cualitativo como cuantitativo, de los elementos comprendidos entre el flúor (F) y el uranio (U) de muestras sólidas (filtros, metales, rocas, muestras en polvo, tejidos, etc.) y líquidas, porque permite hacerlos sin preparación de la muestra. El único requisito es que ésta tenga un tamaño inferior a la porta muestras (Cerquera,

Rodríguez & Ruano, 2017).

**Resistencia Mecánica a la Flexión.** La resistencia a la flexión de un material es la capacidad para soportar esfuerzos aplicados en su eje longitudinal entre dos puntos de apoyo, podría considerarse una medida indirecta de la resistencia a la tracción. La resistencia a la flexión es un factor determinante de la calidad de las piezas a evaluar, se expresa como módulo de Rotura (MR) en Mpa y es determinada mediante los métodos de ensayo de la norma NTC 4321-4 (determinación de la resistencia a la flexión y carga de rotura) (Masías, 2018).

## 2.4 Marco Conceptual

**Amasado.** Una vez que se han alcanzado los niveles de granulometría requeridos en la materia prima se introduce la arcilla en la amasadora, donde se producirá la primera adición de agua, para obtener una masa plástica moldeable por extrusión. La cantidad de agua que se introduce depende de la humedad con la que venga la arcilla de la cantera y de las condiciones climáticas a las que esté expuesta durante la fase de almacenamiento.

**Atmósfera Oxidante.** Medio atmosférico con una gran cantidad de oxígeno que actúa libremente permitiendo la combustión y oxidación de los minerales y demás materiales de la cerámica. De este tipo de cocción se obtienen los colores rojizos, cremas y cafés.

**Atmósfera Reductora.** Predominio del monóxido de carbono por la restricción de la entrada de oxígeno, ahogándose el fuego, no permitiendo la combustión completa y por lo tanto, su oxidación, obteniéndose colores blancos, grises y negros.

**Caracterización de los Materiales.** Descripción cualitativa y cuantitativa de la composición y estructura de un material, así como la evaluación de sus propiedades y usos.

**Cocción.** El proceso de cocción consiste en someter los ladrillos previamente secados a condiciones de alta temperatura por tiempos prolongados en hornos, con el fin de que adquieran sus propiedades mecánicas y físicas, ya que la arcilla sin cocer tiene propiedades muy bajas. Con este proceso no sólo consiguen las propiedades físicas y mecánicas sino también la apariencia final. Las fases de cochura en el horno son tres: precalentamiento, cocción y enfriamiento. En la primera fase se elimina paulatinamente el agua impregnada en la arcilla. En la etapa de enfriamiento la temperatura desciende desde la de cocción hasta la normal, esto debe realizarse paulatinamente (de 500° C a 600° C), especialmente en los hornos cerrados, para garantizar dureza, tenacidad y colorado de la piezas vitrificadas. El enfriamiento de las piezas está definido por su tamaño, cuanto mayor es el tamaño de los ladrillos, la temperatura normal se alcanza más lentamente.

**Contracción.** Durante el secado, y debido a la pérdida de humedad, las piezas de arcilla sin quemar sufren un encogimiento que puede llegar hasta el 20% de su tamaño original. Posteriormente, en la quema, se reducirán todavía algo más. A veces, es sorprendente ese cambio de tamaño.

**Cortado y Apilado.** Tras su paso por la extrusora, la barra conformada se hace pasar a través del cortador donde se fijarán las dimensiones finales del producto. El material cerámico se apila en estanterías o vagonetas antes de introducirlo en el secadero.

**Densidad.** Es el peso de una unidad de mampostería de concreto o de una unidad relacionada dividida por su volumen.

**Horno Colmena.** El horno abovedado es un horno de ciclo intermitente en albañilería y sin aislamiento térmico, usado para la cocción de ladrillos y tejas. Presenta una sección horizontal

circular, diámetro de unos 7 m, altura de 2,5 m y techo en forma de bóveda, con un tiro de gases calientes en flujo descendente, también llamado “tiro invertido”. La quema se realiza en hornillas, de cuatro a seis, dispuestas de forma equidistante en su perímetro lateral. La quema del combustible establece un flujo ascendente de gases calientes en dirección a la bóveda circular, de ahí descienden a través de la carga, intercambia calor con la misma, yendo en dirección a la solera del horno, donde se encuentra la criba de paso de los gases calientes hacia los canales en la parte inferior del horno.

La capacidad de un horno abovedado puede variar, en general, de 30 a 50 millares de ladrillos 9 cm x 19 cm x 19 cm (valor equivalente a una masa procesada de 44 a 90 toneladas por quema) o hasta 100 millares, como en el caso de la producción de 80% a 90% de tejas coloniales (1,1 kg/pieza). El ciclo de operación comprende 12 horas de carga del horno, más un precalentamiento de 20 horas, cocción de 18 a 40 horas, enfriamiento de por lo menos 24 horas y descarga de otras 12 horas, haciendo un ciclo de prácticamente 4 días.

**Moldeado.** Posteriormente se hace pasar la arcilla por la extrusora o galletera, donde, mediante bomba de vacío, se extrae el aire que pudiera contener la masa y se presiona contra un molde, obteniendo una barra conformada con la forma del producto. Con este sistema, se reduce el consumo de agua en la industria y se puede trabajar con pastas cerámicas más secas.

**Porosidad.** Según la norma NTC 4321-3, la porosidad se entiende como la capacidad de un material para absorber gases o líquidos a través de huecos o espacios entre sus partículas conocidos como poros.

**Propiedades Mecánicas de los Materiales.** Las propiedades mecánicas de un material describen el modo en que este responde a la aplicación de una fuerza o carga. Solamente se

pueden ejercer tres tipos de fuerzas mecánicas que afecten a los materiales: compresión, tensión y cizalladura.

**Resistencia Mecánica.** La resistencia mecánica es la capacidad de los cuerpos para resistir las fuerzas aplicadas sin romperse. La resistencia mecánica de un cuerpo depende de su material y de su geometría. El parámetro empleado habitualmente para valorar la resistencia mecánica de un cuerpo es el coeficiente de seguridad, el ensayo se realiza según la NTC 4321-4.

**Retenido Sobre Tamiz.** Es el proceso por el cual se conoce la cantidad de arena contenida en 100 g de arcilla (ver formula 1). En este proceso se realiza un lavado de arcilla sobre un tamiz maya 210.

$$\%RT = \frac{mr}{mm} \times 100\%$$

Mr: Masa retenida

Mm: masa de la muestra

*Fórmula 1.* Retenido sobre tamiz

**Secado.** El secado es una de las fases más delicadas del proceso de producción. De esta etapa depende, en gran parte, el buen resultado y calidad del material, más que nada en lo que respecta a la ausencia de fisuras. El secado tiene la finalidad de eliminar el agua agregada en la fase de moldeado y de esta manera poder pasar a la fase de cocción.



## 2.5 Marco Legal

**Estatuto Estudiantil de la Universidad Francisco de Paula Santander:** Acuerdo 065 del 26 de agosto de 1996, en el cual se reglamenta en el artículo 140 el trabajo de grado, considerando lo siguiente.

Artículo 140. El estudiante podrá optar por una de las siguientes modalidades del trabajo de grado:

a. Proyecto de Investigación: Monografía, Trabajo de Investigación: Generación o aplicación de conocimientos y Sistematización del conocimiento.

b. Proyecto de Extensión: Trabajo social, Labor de consultoría en aquellos proyectos en los cuales participe la Universidad, Pasantía y Trabajo dirigido.

Parágrafo 1. El estudiante podrá optar como componente alterna al proyecto de grado, créditos especiales como cursos de profundización académica o exámenes preparatorios.

Parágrafo 2°. Para algunos Planes de Estudio y de acuerdo a sus características el Consejo Académico podrá obviar la presentación del trabajo de grado.

Teniendo en cuenta lo estipulado en el Estatuto Estudiantil se elige el desarrollo de un trabajo de investigación presentado como requisito para optar el título de Ingeniero Industrial.

**Normas técnicas para el desarrollo práctico del proyecto.** Las normas que se utilizaron en el laboratorio para la fabricación y evaluación de las muestras cerámicas fueron las siguientes:

**NTC 2401.** Arcillas grasas para la industria de la cerámica (NTC 2401, 2004).

**ASTM D422.** Método de prueba estándar para análisis de tamaño de partículas de suelos (ASTM D422, 2007)

**NTC 4321-3.** Baldosa Cerámica. Parte 3. Método de ensayo para determinar la absorción de agua, de la porosidad abierta, de la densidad relativa aparente y de la densidad aparente (NTC 4321-3, 1998).

**NTC 4321-4.** Determinación de la resistencia a la flexión y carga de rotura (NTC 4321-4, 2015).

**NTC 919.** Baldosas cerámicas. Definiciones, clasificación, características y rotulado (NTC 919, 2015).

**NTC 3493.** Ingeniería civil y arquitectura. Cenizas volantes y puzolanas naturales, calcinadas o crudas, utilizadas para el concreto (NTC 3493, 2017).

**ASTM C618.** Especificación estándar para Cenizas volantes de carbón y puzolana natural cruda o calcinada para su uso en hormigón (ASTM C618, 2019).

**ASTM D 4318-05.** Los métodos estándar de ensayo para límite líquido, límite de plástico, y el índice de plasticidad de los suelos (ASTM D 4318-05, 2017).

### 3. Diseño Metodológico

#### 3.1 Tipo de Investigación

Behar (2008), en el libro de Metodología de la investigación, define que el método experimental involucra la manipulación intencional de una acción, para analizar sus posibles efectos. Se refiere a la manipulación deliberada de una o más variables independientes, para analizar las consecuencias de esa manipulación sobre una o más variables dependientes, dentro de una situación de control para el investigador. Con base en lo anterior, se pudo definir que el tipo de investigación para este proyecto tuvo una orientación empírico-analítico experimental, ya que requirió caracterizar la arcilla, con el fin de analizar los resultados en cada uno de los ensayos. De igual manera, es teórico, por los pasos a seguir, que se dejaron descritos en el presente trabajo, y práctico, por la identificación y evaluación de las características que arrojará cada uno de los ensayos a realizarse. Se planteó para el desarrollo práctico del proyecto, un diseño totalmente aleatorizado de dos factores (Kuenl, 2001).

#### 3.2 Población y Muestra

**3.2.1 Población.** Los ladrillos fabricados por proceso de extrusión, en el laboratorio de Formación Cerámica de la Universidad Francisco de Paula Santander, fueron elaborados a base de arcilla de la formación Guayabo del municipio de Villa del Rosario de tonalidad rojiza y cenizas volantes las cuales son residuos de la termoeléctrica Termotasajero Dos, ubicada en el municipio de El Zulia, Norte de Santander.

**3.2.2 Muestra.** La arcilla fue extraída de la ladrillera Margres, ubicada en el municipio de Villa del Rosario, y las cenizas volantes pertenecieron a la planta 2 de la termoeléctrica

Termotasajero Dos, ubicada en el municipio de El Zulia, Norte de Santander.

### **3.3 Instrumentos para la Recolección de la Información**

**3.3.1 Fuentes primaria.** Para la recopilación de la información se utilizó la siguiente herramienta.

**Ensayos de laboratorio.** Se realizaron análisis y ensayos de laboratorio los cuales aportaron información relevante para la caracterización y evaluación de las muestras.

**3.3.2 Fuentes secundarias.** El desarrollo de esta investigación se apoyó en la información encontrada en fuentes como artículos publicados en la base de datos de Science direct y Scielo.

**Proyectos.** Se utilizó información registrada en proyectos de grado, con el fin de extraer información relevante sobre el tema de estudio.

**Apuntes.** Se empleó la información suministrada en la asignatura de cerámicos III, la cual es fundamental para el desarrollo práctico del proyecto.

**Libros.** Se extrajo información de algunos libros para el fortalecimiento de conceptos importantes dentro del ámbito de estudio.

### **3.4 Análisis de la Información**

Los datos obtenidos en la investigación, fueron agrupados y organizados en tablas; para un mayor análisis, se realizaron figuras en las cuales se condensó toda la información, de tal manera que permitió analizar los resultados obtenidos, de forma cuantitativa y cualitativa. Se empleó como herramienta principal, Microsoft Office Excel.

## **4. Resultados y Discusión**

### **4.1 Preparación de las Materias Primas**

Durante el desarrollo experimental del proyecto de investigación, en el cual se mezcló una materia prima natural arcillosa y cenizas volantes, para evaluar la influencia que estas últimas generaban en la estructura arcillosa y, su efecto en la fabricación de productos de revestimiento, se desarrollaron diferentes tipos de procedimientos, con el fin de dar cumplimiento a los objetivos que evidenciaron el efecto que las cenizas volantes generaban sobre el material arcilloso.

La obtención de la arcilla se realizó en la empresa Ladrillera Margres; esta se ubica en el municipio de Villa del Rosario. Una vez seleccionado el terreno para la recolección de la arcilla, se aplicó el método de muestreo en forma de zigzag, por ser este el método más adecuado y sencillo de utilizar (Guía de muestreo), el cual consiste en líneas cruzadas de manera ascendente, caminando unos 25 a 30 pasos desde cada punto, considerando que el tamaño y el fraccionamiento de estos se realizaron de forma arbitraria; cabe señalar que se tomaron 15 submuestras a lo largo y ancho del terreno, utilizando para ello una pala, procurando tomar una cantidad aproximada de 10 kg de arcilla en cada punto y a la misma profundidad; luego se mezclaron en un balde, y posteriormente, se recogieron en lonas. El material arcilloso recolectado pertenece a la formación Guayabo, de tonalidad rojiza, de tipología Illítico-Caolinítica, y con una plasticidad media.

Las cenizas volantes son materiales residuos de la combustión del carbón, el cual se incineran, para obtener energía eléctrica, razón por la cual, hay partículas que no se aglomeran, generando el no arrastre de las mismas durante el intercambio térmico (Sumer, 2012); por este

motivo, el muestreo de estas se realizó desde el lugar de almacenamiento situado en la planta dos de la termoeléctrica. La recolección se realizó de forma manual, a través de una pala, que permite remover las cenizas volantes, amontonándolas para meterlas en sacos. Estas se obtuvieron de la empresa termoeléctrica Termotasajero Dos, ubicada en el municipio de El Zulia, Norte de Santander. De cada materia prima se recolectó una cantidad suficiente para desarrollar los diferentes ensayos de caracterización, y el conformado de los especímenes para la parte experimental del producto terminado.

De la arcilla, se recolectaron 150 kg, los cuales fueron llevados al laboratorio de Formación Cerámica de la Universidad Francisco de Paula Santander, para dar inicio a la caracterización física del material (ver tabla 4). A esta, se le realizó un contenido de humedad, el cual arrojó el dato de humedad residual natural con la que venía de la mina; esto, para determinar el tiempo de secado y de esta manera, dejar el material con una humedad menor al 10%, necesaria para iniciar el proceso de preparación. Inicialmente, se le realizó una pre-trituración manual con el objetivo de tener un tamaño de grano homogéneo en toda la muestra, con este procedimiento el material se llevó a un tamaño de partícula pasante malla ASTM 5 (4.00 mm). Seguidamente, se le realizó una molienda en el molino de martillos, con el objetivo de reducir más el tamaño y dejarlo pasante malla ASTM 10 (2.00 mm); con esto se garantizó que el total de la muestra tenía un tamaño de partícula homogéneo y similar al tamaño que se maneja en la mayoría de las empresas regionales.

Para las cenizas volantes, el procedimiento de preparación que se siguió fue más cuidadoso, pues se quería no solo evitar la contaminación de estas, sino además, impedir la dispersión de las cenizas por todo el laboratorio, pues este es un material excesivamente volátil por el tamaño de partícula. Inicialmente se recolectaron 40 kg de cenizas volantes, y a pesar de que la muestra se recolectó del mismo sitio, a estas, se le realizó un mezclado manual, y de esta manera garantizar

la homogeneidad de la muestra. Seguidamente, se tomó un contenido de humedad para determinar si eran aptas para la mezcla con arcilla. Finalmente, se llevaron al secadero a una temperatura de  $60 \pm 5$  °C, por un tiempo de 24 h. Secas las cenizas volantes, se mezclaron con la arcilla, para formular las diferentes pastas con las que se trabajaron (ver tabla 1). A estas formulaciones se realizaron los análisis preliminares de caracterización física, para evaluar el comportamiento de cada una.

**Tabla 1. Formulaciones, porcentaje en masa y caracterización física**

FORMULACIÓN	PORCENTAJE EN MASA (%)		CARACTERIZACIÓN FÍSICA		
	ARCILLA	CENIZAS VOLANTES	CONTENIDO HUMEDAD (%)	RESIDUO EN MALLA ASTM 230 (%)	ÍNDICE DE PLASTICIDAD (%)
P100	100	0	3,56	10,72	22
P90-10	90	10	3,99	11,04	25
P80-20	80	20	4,34	11,67	29
P70-30	70	30	4,76	12,43	32
P60-40	60	40	4,98	13,01	34

El contenido de humedad se incrementó de 4,6% a 12,1%, con la adición de cenizas volantes. El retenido sobre tamiz, pasante malla ASTM 230, permitió la determinación de partículas gruesas el cual era indispensable para el correcto secado de los productos. Este ensayo es útil, porque al conocer la cantidad de estas partículas en la muestra, se puede inferir de manera rápida el comportamiento en las diferentes etapas del proceso de producción. A mayores valores, es necesario aumentar la temperatura durante la cocción con el fin de disminuir la porosidad

Cáceres, Sánchez & Chaparro (2017). El residuo en malla ASTM 230 incrementó de 2,9 % a 6,5 %, a medida que se agregaron mayores cantidades de ceniza a la pasta.

Para lograr un mejor desempeño en las pastas, se determinó el valor de índice de plasticidad que las pastas poseían, ya que este valor estableció que tan moldeable eran sin presentar agrietamientos una vez secas (Salinas, Ñurinda, & Ramírez, 2014). Los procedimientos para la determinación de esta propiedad tecnológica, están indicados en la norma ASTM D4318. Las formulaciones realizadas presentaron un índice de plasticidad de forma lineal, el cual fue incrementando en un promedio de 6,2% a 16.0 %, con el aumento de cenizas volantes en las pastas.

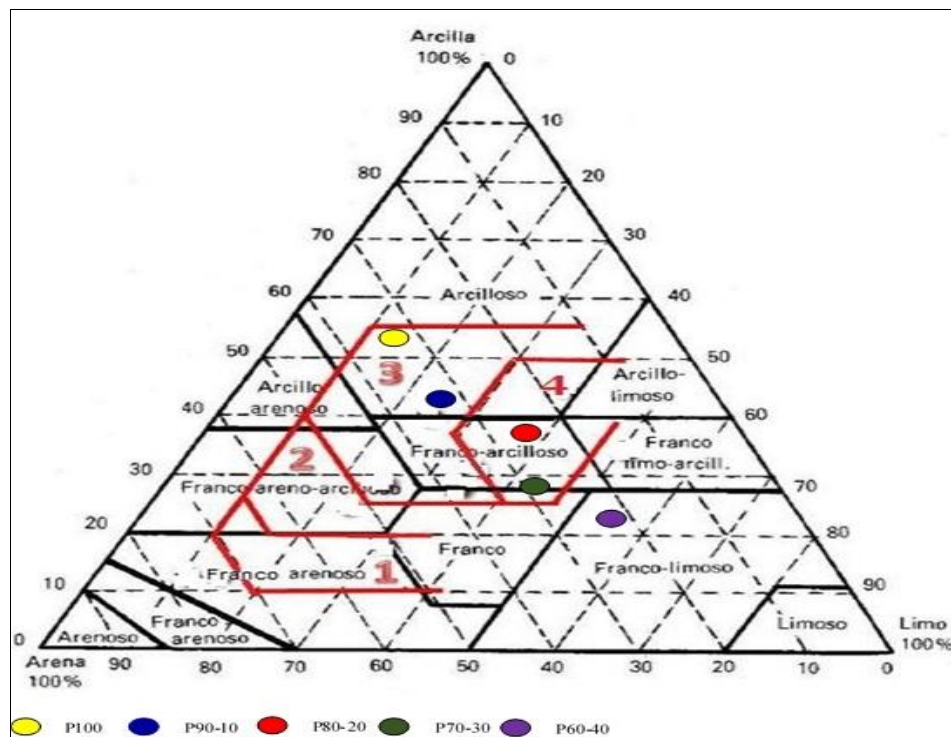
Por otra parte, como se observó, en la figura 2, el análisis granulométrico por hidrómetro 152 H (Triángulo de Winkler), análisis que define la aptitud cerámica de la materia prima y posteriormente puede inferir sobre la calidad y su posible uso (Abad & Villegas, 2016).

De acuerdo con las características físicas y de aptitud cerámica, las formulaciones P100 y P90-30 se ubican en la zona 3 del triángulo de Winkler, lo que indicó que el material es apto para fabricar tejas, ladrillos de perforación vertical, como ladrillo cara vista, y baldosas, productos muy comercializados por las empresas de Norte de Santander. Además, se puede inferir que es un material de textura arcillosa, textura con partículas muy finas de color rojizo y compacto (Moreno Quintero, Pabón Acevedo, Cely Illera, & Cely Niño, 2018). Las formulaciones P80-20 y P70-30 se ubican en la zona 4 del triángulo de Winkler, lo que mostró que el material es apto para la fabricación de ladrillos de alta calidad, productos de gres resistentes a las heladas, tubos, pisos, adoquines y tejas, de textura franco arcillosa; es decir, son muy firmes y duros, resistentes a dejarse romper con la mano (Ciancaglini). La formulación P60-40 no se ubicó en ninguna zona estipulada, ya que presentó un alto contenido de partículas gruesas, según la tabla 1, por lo cual, no es apto para la fabricación de productos cerámicos según el triángulo de Winkler, sin embargo, se puede deducir que es de textura franco limoso, en otras palabras, son muy firmes



pero se pueden romper bajo presión moderada (Ciancaglini).

De acuerdo con la literatura, los porcentajes de arena idóneos para la fabricación de productos cerámicos extruidos oscilan entre 16 % y un máximo de 35% ( Cáceres, Sánchez Molina, & Chaparro García, 2017), lo cual es consecuente con la fracción arenosa hallada en las formulaciones.

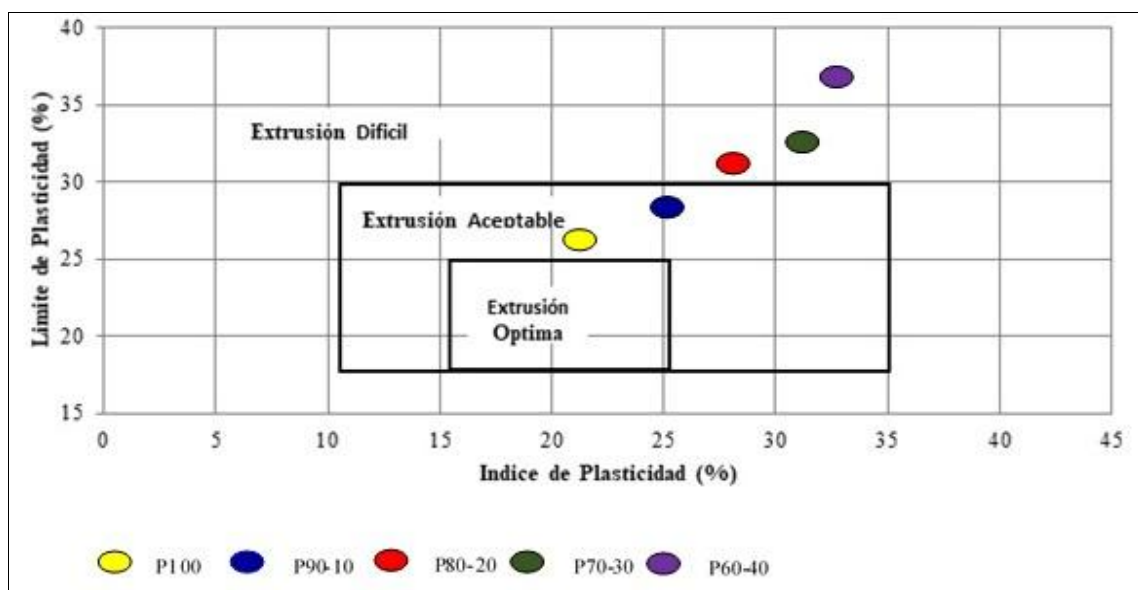


**Figura 2. Triángulo de aptitudes de Winkler**

Teniendo en cuenta la aptitud cerámica del material, se procedió a preparar la muestra para el proceso de extrusión; para esto se realizó el análisis por el método de Casagrande para cada formulación, con el objetivo de humectar la masa plástica. Según los resultados obtenidos, el material posee una plasticidad media-alta, generando un incremento del 6,2% a 16.0 %, lo que indicó que las formulaciones que presentan una plasticidad elevada originan una mayor dificultad

de secado, y un aumento de la tendencia a la formación de grietas, debido a una mayor retención de agua y a una escasa permeabilidad (Doménech, Sánchez, Sanz, García & Ginés, 2015).

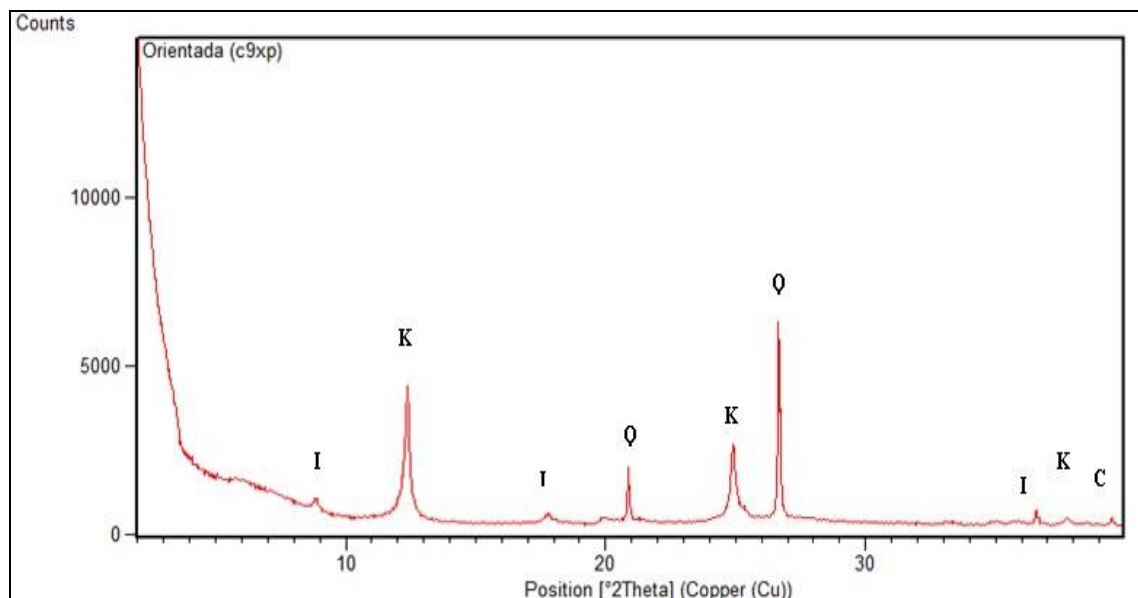
Según el pronóstico de extrusión de Casagrande (ver figura 3), las muestras P100 Y P90-10 a pesar de su plasticidad van a tener una extrusión aceptable a diferencia de las muestras P80-20, P70-30 y P60-40, las cuales tendrán una extrusión difícil. Las muestras con mayor contenido de cenizas volantes requieren un mayor porcentaje de agua para su moldeo (ver tabla 1) por su capacidad de absorción; sin embargo, durante el proceso de extrusión se pueden producir deformaciones del producto en verde con facilidad (Doménech, Sánchez, Sanz, García, & Ginés, 2015).



**Figura 3. Pronóstico de extrusión (método de Casagrande)**

## 4.2 Caracterización de la Materia prima Arcillosa y Cenizas Volantes

### 4.2.1 Caracterización mineralógica y química de la arcilla.



**Figura 4. Difractogramas de rayos X de la materia prima arcillosa**

De acuerdo con el diagrama de rayos X correspondiente al material arcilloso (ver figura 4), se determinó la presencia de cuarzo (Q), calcita (C), caolinita (K) e illita (I), siendo estos dos últimos los minerales arcillosos que confieren propiedades plásticas a las pastas (Santos Amado, Malagón Villafrades, & Córdoba Tuta, 2011). La ubicación de los picos principales, corresponde con el cuarzo (Q) y la caolinita (K), común en arcillas de Norte de Santander, principalmente en arcillas de la formación Guayabo (Moreno Quintero, Pabón Acevedo, Cely Illera, & Cely Niño, 2018). El cuarzo, es un mineral predominante en los materiales arcillosos de la zona metropolitana de Cúcuta (Rozo Rincón, Sánchez Molina, & Gelves Díaz, 2014); este contribuye a disminuir la plasticidad de la mezcla de materia prima, aumentar la permeabilidad de la pieza cruda y el coeficiente de dilatación de la pieza cocida (Sánchez Molina, Sarabia Guarín, &

Alvarez Rozo, 2016). Se podría decir, que la alta distancia planar en el pico del cuarzo, puede llegar a afectar las reacciones que ocurren durante el precalentamiento de la arcilla. De la misma manera, se puede analizar que existe una presencia significativa de sílice libre, siendo esto confirmado por la relación molar de ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) cuyo valor representa 7,20%, lo que indicó que es un material con propiedades medianamente arcillosas y una menor pérdida por ignición (LOI), es decir, que posee un bajo contenido de material inorgánico (Moreno Quintero, Pabón Acevedo, Cely Illera, & Cely Niño, 2018), como se muestra en la tabla 2.

La caolinita (k), es uno de los principales minerales de arcilla, utilizado en la fabricación de productos cerámicos; influye en el proceso cerámico favoreciendo la homogeneización de la humedad, baja contracción y absorción de agua, baja moldeabilidad, secado fácil y cocción a altas temperaturas (Sánchez Molina, Sarabia Guarín, & Alvarez Rozo, 2016). La arcilla utilizada es de tipología Illítico- Caolinítica, como se mencionó anteriormente.

Según la tabla 2, se destacan los elevados contenidos de Sílice y Alúmina, asociándose en mayor cantidad a la presencia de caolinita e igualmente, en una menor proporción, a la Calcita; el porcentaje de Hierro, justifica el color rojo característico de las arcillas del área metropolitana de Cúcuta, y de igual manera le va a conferir un color más claro después de la cocción (Moreno Quintero, Pabón Acevedo, Cely Illera, & Cely Niño, 2018). El valor correspondiente a la pérdida por ignición de 5,73% de la arcilla perteneciente a la formación Guayabo, reflejó un bajo contenido de material inorgánico y esto es favorable, ya que a menor cantidad de materia inorgánica, se evita que en el proceso de la cocción queden espacios vacíos ( Cáceres, Sánchez & Chaparro, 2017).

En arcillas para ladrillos, el contenido de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  suele estar comprendido entre el 10 y 20% y para las arcillas refractarias pueden presentar contenidos en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  superiores al 20%; la composición química de la arcilla utilizada para este proyecto presenta un 16,46 % de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (ver tabla 2), lo cual indicó, que no es una arcilla refractaria y puede fundirse a temperaturas bajas, como las utilizadas en el proceso de extrusión, presentando un comportamiento aceptable para el conformado (Moreno, Pabón, Cely & Cely, 2018).

Por otra parte, el comportamiento de la arcilla al calor depende de su contenido de fundente, en este caso la arcilla presentó bajos porcentajes de  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$  y  $\text{CaO}$ , lo cual indicó que es una arcilla pobre en fundentes, lo que generará una temprana formación de fase líquida vítrea durante la sinterización producida en la cocción (Eliche, Sandalio, Martínez, Pérez & Sánchez, 2017).

**Tabla 2. Composición química de la materia prima arcillosa (FRX)**

OXIDO	DENOMINACIÓN	PORCENTAJE EN MASA (%)
$\text{SiO}_2$	SÍLICE	69,80
$\text{Al}_2\text{O}_3$	ALÚMINA	16,46
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	HIERRO	4,60
$\text{K}_2\text{O}$	POTASIO	1,43
$\text{Na}_2\text{O}$	SODIO	0,13
$\text{MgO}$	MAGNESIO	0,51
$\text{CaO}$	CALCIO	0,27
$\text{TiO}_2$	TITANIO	0,88
$\text{MnO}$	MANGANESO	0,04
$\text{SO}_3$	AZUFRE	0,04
$\text{P}_2\text{O}_5$	ANHIDRIDO FOSFÓRICO	0,11
L.O.I	LOSS OF IGNISION	5,73
	TOTAL	100,00

**4.2.2 Caracterización mineralógica y química de las cenizas volantes.** Las cenizas volantes utilizadas en esta investigación, se obtuvieron de la Central Termoeléctrica

Termotasajero Dos, ubicada en el municipio de El Zulia. En esta planta se utiliza carbón mineral pulverizado como combustible para la generación de energía; las cenizas volantes se obtiene mediante filtros de precipitación electrostática (Lizarazo, García & Higuera, 2015).

La Tabla 3, presenta la composición química de las cenizas volantes de Termotasajero, obtenida mediante Fluorescencia de Rayos X (FRX).

**Tabla 3. Composición química de las cenizas volantes**

OXIDO	DENOMINACIÓN	PORCENTAJE EN MASA (%)
SiO <sub>2</sub>	SÍLICE	54,09
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ALÚMINA	26,02
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ÓXIDO DE HIERRO	13,32
K <sub>2</sub> O	ÓXIDO DE POTASIO	1,19
Na <sub>2</sub> O	ÓXIDO DE SODIO	0,14
MgO	ÓXIDO DE MAGNESIO	0,65
CaO	ÓXIDO DE CALCIO	0,83
TiO <sub>2</sub>	ÓXIDO DE TITANIO	1,16
MnO	ÓXIDO DE MANGANESO	0,03
SO <sub>3</sub>	AZUFRE	0,08
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ANHÍDRIDO FOSFÓRICO	0,15
SrO	ÓXIDO DE ESTRONCIO	0,04
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ÓXIDO DE CROMO	0,03
ZnO	ÓXIDO DE ZINC	0,06
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ÓXIDO DE VANADIO	0,11
ZrO <sub>2</sub>	ÓXIDO DE CIRCONIO	0,04
CuO	ÓXIDO CÚPRICO	0,02
L.O.I.	PÉRDIDA DE IGNICIÓN	2,04
	TOTAL	100,00

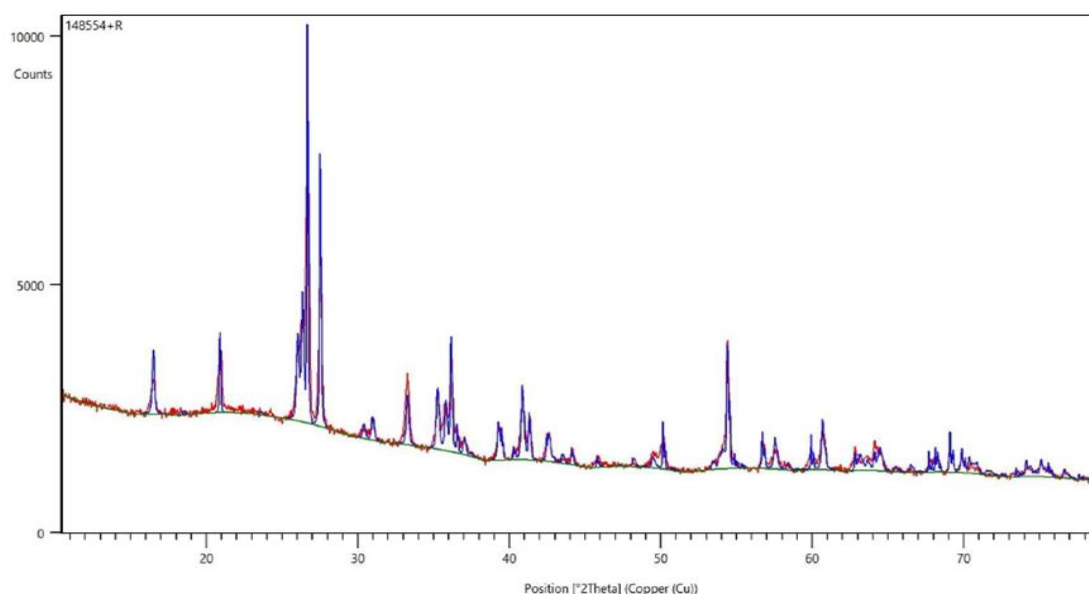
Según los resultados arrojados por FRX, la composición química de las cenizas volantes posee concentración de elementos mayoritarios de óxido de Silicio (SiO<sub>2</sub>), óxido de Aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y óxido de Hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Existen contenidos de otros metales, pero en fracciones menores. Los resultados indicaron que las cenizas volantes son silicoaluminosas, las cuales se producen por medio del carbón Bituminoso (Bautista Ruiz, Díaz Lagos, & Martínez Ovalle, 2017) y poseen propiedades puzolánicas por sus altos contenidos en SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y pérdidas por

ignición inferiores al 6% (Mejía, Rodríguez, & Mejía de Gutiérrez, 2014), por tanto, cuanto mayor es su actividad puzolánica mayor es la resistencia del material cerámico con aditivo de cenizas volantes (Itocarpio, 2015). Según la norma ASTM C618, este tipo de cenizas volantes se clasificó como clase F; por tener porcentajes en peso de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  mayores al 70% y de CaO menores al 10% (ver tabla 3), estos óxidos son los que durante el proceso de sinterización forman nuevas fases minerales para cerrar poros y dar mayor resistencia a los ladrillos (Eliche, Sandalio, Martínez, Pérez & Sánchez, 2017).

Se trabajó con esta clase de cenizas volantes, debido a que tiene un bajo contenido en calcio, por lo tanto, su reacción química con el agua de mezclado es poco significativa, lo cual reduce al mínimo los defectos estructurales, como corazón negro y fisuras durante la trabajabilidad de las mezclas, los cuales son causados por fraguado de estas; además, la esfericidad en sus partículas ayuda a mejorar la trabajabilidad de la mezcla en estado fresco, al reducir los efectos de fricción entre partículas (Maza, 2017).

La relación molar de  $(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$  en las cenizas volantes, representó un valor de 3,53%, lo que quiere decir, una elevada resistencia mecánica del producto cerámico (Kovalchuk, Fernández Jiménez, & Palomo, 2008) y una pérdida por ignición de 2,04%, lo que indicó un nivel bajo, es decir, al ser baja la pérdida de ignición mejor serán las cenizas volantes (Chávez Velásquez & Guerra Maestre, 2015) y son aceptables según la norma ASTM C618. De igual manera, un bajo valor de pérdida por ignición, generará una reducción en la decoloración de los productos, decoloración que normalmente es causada por aquellas cenizas que contengan un elevado valor de LOI, debido a las partículas de carbón que ascienden a la superficie en el momento de la fabricación de los productos (Itocarpio, 2015).

El patrón de difracción de rayos X (DRX) para las cenizas volantes, se presentó, en la figura 5. En el análisis de las fases mineralógicas presentes, se encontró que la fase con mayor porcentaje en peso de 30,5% es la Mullita que es un mineral de alta dureza, por lo cual puede ayudar a mejorar las propiedades mecánicas de los productos cerámicos (Maza Ignacio, 2017), la presencia de Mullita indicó que se trata de cenizas volantes con bajo contenido de cal (<5%), lo cual coincide con el análisis por FRX; de igual manera, le confiere estabilidad química, resistencia mecánica, baja dilatación a altas temperaturas, resistencia al choque térmico, a la abrasión, a la acción corrosiva de gases y al ataque de metales fundidos (Peña Rodríguez & Ortega Triana, 2014), seguida del Cuarzo con un 9,6% y en menor concentración, la Magnetita, con un 2,2%.



**Figura 5. Difractograma de rayos X de las cenizas volantes**

Hay que destacar, que la fase amorfa corresponde al 57,7% (ver tabla 4); la literatura lo referencia como un porcentaje alto, sin embargo, se encuentra dentro de los rangos reportados en la bibliografía para materiales de la misma clase. Se puede detallar que esta fase, en el diagrama



se representa mediante la discontinuidad lineal y la curvatura de la base del patrón de difracción (Peña Rodríguez & Ortega Triana, 2014). Esta alta concentración de fase amorfa, conlleva a que el mecanismo de formación de fases a altas temperaturas no favorezca el crecimiento de fase vítrea, la cual es responsable, en cierta medida, de mejorar las propiedades tecnológicas de un cerámico (Sánchez Molina, Corpas Iglesias & Rojas Suárez, 2019). Para esta investigación, la mezcla de cenizas volantes con arcilla, generó todo lo contrario, contradiciendo los datos reportado por la literatura y evidenciando que es factible el uso de cenizas volantes en procesos de fabricación cerámica.

**Tabla 4. Concentración de fases en las cenizas volantes**

<b>Compuesto</b>	<b>Unidades %</b>
Mullita	30,5
Cuarzo	9,6
Magnetita	2,2
Amorfos	57,7

#### **4.3 Fabricación y Conformado de las Muestras con diferentes Porcentajes de Arcilla y Cenizas Volantes**

**4.3.1 Modelo de diseño experimental de dos factores.** Para el posterior conformado de las muestras, se realizó, inicialmente, un diseño experimental, con el fin de determinar el número de probetas a fabricar (replicas) y comprobar la significancia de las variables determinadas a continuación.

El número de réplicas en un estudio de investigación, afecta la precisión de las estimaciones de las medias de los tratamientos y la potencia de las estadísticas para detectar las diferencias entre las medias de los grupos de tratamiento, como lo menciona Robert Kuehl, en su libro, *Diseño de Experimentos*. Por tanto, se debe establecer un número inicial de réplicas, con el fin de garantizar que los resultados arrojados por el análisis estadístico sean confiables; sin embargo, cabe resaltar, que el número de réplicas está determinado por las restricciones prácticas que se pueden encontrar en el problema; es decir, con la ejecución del modelo experimental, se busca medir la influencia de diferentes variables sobre las formulaciones de arcilla y cenizas volantes (García Vásquez, 2014). Las variables involucradas en el diseño experimental son: tipo de formulación y *atmósferas* de cocción. Con las variables establecidas, se planteó un modelo de diseño experimental factorial o de dos factores. A continuación, se utilizó un método para dos factores, donde el número de réplicas  $r$ , se estima utilizando la fórmula 2.

$$r \geq 2 \left[ \left( Z_{\frac{\alpha}{2}} + z_{\beta} \right) \right]^2 * \left( \frac{\alpha}{\delta} \right)^2$$

*Fórmula 2.* Estimación de réplicas ( $r$ )

Donde:

$Z_{\alpha/2}$  : Variable estándar con probabilidad.

$Z_{\beta}$  : Variable estándar con probabilidad  $\beta$ .

$\alpha$ : Desviación estándar.

$\delta$  : Diferencia esperada entre las medias.

Nota: Donde  $Z_{\alpha/2}$ , es una variable normal estándar excedida con probabilidad de  $\alpha/2$  y  $Z_{\beta}$

está excedida con probabilidad  $\beta$ . Las probabilidades para la variable normal estándar se encuentran en los anexos, tomado del libro Diseños Experimentales de Robert K (ver anexo 1).

Para hallar el número de réplicas, deben establecerse los parámetros de precisión que se requieren para dar validez al experimento, para ello se seleccionó los siguientes valores según la tabla 5, nivel de significación mínimo ( $\alpha=0,05$ ), coeficiente de variación (%CV=5), diferencia porcentual de la media global esperada del experimento (% $\delta=10$ ) y una potencia de la prueba ( $1-\beta=0,80$ ).

**Tabla 5. Número de réplicas necesario para un diseño experimental**

		$\alpha = .05$		$\alpha = .01$	
		% $\delta$		% $\delta$	
%CV	$1 - \beta$	10	20	10	20
5	.80	4	1	6	2
	.95	7	2	9	3
10	.80	16	4	24	6
	.95	26	7	36	9

Fuente: Kuehl, 2001.

Con estos valores se obtiene un resultado de cuatro réplicas.

$$r \geq 2 \left[ \left( Z_{\frac{\alpha}{2}} + z_{\beta} \right) \right]^2 * \left( \frac{\alpha}{\delta} \right)^2$$

$$r \geq 2 \left[ \left( Z_{\frac{0,05}{2}} + z_{0,80} \right) \right]^2 * \left( \frac{5}{10} \right)^2$$

$$r \geq 2[(1,96 + 0,84)]^2 * \left(\frac{5}{10}\right)^2$$

$r \geq 4$  réplicas.

Con el fin de determinar la significancia de las variables experimentales (factores), que son temperatura de cocción con 6 niveles y, tipo de formulación con 5 niveles. La variable respuesta, es el coeficiente de ruptura de las muestras. Se considera como tratamiento, cada una de las combinaciones de los factores.

En el diseño experimental, se utilizó un diseño factorial con cuatro réplicas, para un total de 30 combinaciones entre los factores. Las 120 muestras se prueban en orden aleatorio. Los resultados del experimento se presentan en la tabla 6.

**Tabla 6. Coeficiente de ruptura (kgf/cm<sup>2</sup>), tipos de mezcla y atmósferas**

Formulaciones	Atmósferas					
	Oxidante baja	Oxidante media	Oxidante alta	Reductora baja	Reductora media	Reductora alta
<b>P100</b>	118	138	142	100	132	108
	118	139	144	99	133	109
	117	139	143	101	131	107
	115	141	146	101	132	107
	129	140	152	148	189	120
<b>P90-10</b>	130	142	153	149	187	121
	128	141	151	147	190	120
	132	140	153	147	189	120
	78	53	167	111	125	87
<b>P80-20</b>	76	54	168	112	124	88
	77	52	168	110	127	86
	78	53	166	110	125	87
	78	80	105	93	107	85
<b>P70-30</b>	80	81	104	93	105	84
	79	82	106	92	107	86
	77	82	104	92	104	84
<b>P60-40</b>	69	85	89	75	83	63
	68	84	88	78	84	62
	71	87	89	74	84	64
	72	85	88	74	82	62

Para el análisis de los resultados, se llevó a cabo la ANOVA (ver tabla 7), en donde se condensa el conocimiento acerca de la variabilidad en las observaciones del experimento; esta fue realizada en el software R.

**Tabla 7. ANOVA**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Valor f	Valor de probabilidad <i>Pr&gt;F</i>
Atmosferas	393032	6	49335	2.2e-16
Formulaciones	70914	4	13352	2.2e-16
Atmosferas: Formulaciones	26741	20	1007	2.2e-16
Residual	119	90		

Como se observa en la tabla 7, los factores, atmósfera de cocción y tipo de formulación, son altamente significativos; de igual manera, la interacción entre estos dos. Por lo tanto, para elaborar un producto de revestimiento tipo fachaleta, con propiedades resistentes a la flexión, se deben considerar los dos factores; estos no son independientes.

**4.3.2 Conformado de los especímenes.** El conformado del material se realizó a través del proceso de extrusión (ver figura 6). Para el conformado de las formulaciones, se utilizó un total de 30 kg por cada formulación, teniendo en cuenta el porcentaje en masa de cada uno de los materiales. Para cada una de las formulaciones, el procedimiento de mezclado se realizó de manera manual, pesando las cantidades necesarias de arcilla y cenizas volantes, según la tabla 1. Realizado el mezclado, las formulaciones se humectaron con el índice de plasticidad arrojado en la formulación correspondiente. Seguidamente, se dejó en homogenización por 24 h para garantizar la humectación en toda la muestra. Después del tiempo de homogenización,

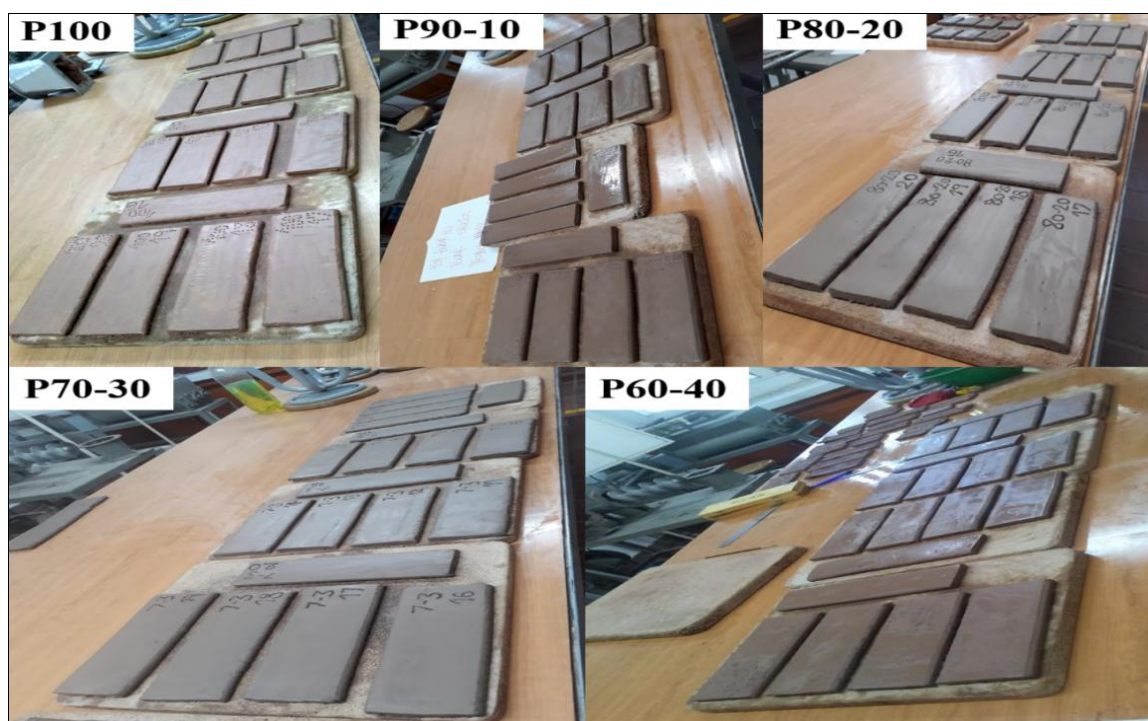
nuevamente se amasó la masa plástica, para garantizar la eliminación del aire ocluido durante este tiempo. Este amasado se realizó en la laminadora del laboratorio.



**Figura 6. Proceso de conformado de los especímenes**

Luego, se inició el proceso de conformado de cada una de las formulaciones (ver figura 7); se moldearon especímenes de revestimiento tipo fachaleta, con dimensiones de  $25\text{ cm} \times 8\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ . Con las probetas conformadas se midieron las dimensiones (longitud, ancho y espesor) y masa, se llevaron a un secado a temperatura ambiente durante 48 h; después se transportaron a la estufa de secado por un tiempo de 24 h, a una temperatura de  $60 \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$ . Finalmente, se incrementó gradualmente la temperatura en  $3\text{ }^\circ\text{C/h}$ , hasta alcanzar una temperatura de  $110 \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$ , manteniéndola durante 24 h en esa temperatura. Cabe aclarar, que la velocidad de calentamiento utilizada en el secado artificial hasta llegar a  $110 \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$ , fue lenta, para evitar

deformaciones en los especímenes, especialmente en las muestras P70-30 y P60-40. Secas las probetas, se midieron de nuevo dimensiones y masa, y luego se llevaron al proceso de cocción en un horno colmena, a dos atmósferas, una atmósfera oxidante con temperaturas finales de 950°C, 1000°C y 1050°C, y la otra, una atmósfera reductora a temperaturas finales de 975 °C, 1025 °C y 1100 °C, temperaturas promedio usadas en la mayoría de las empresas regionales. La rata de calentamiento utilizada en esta etapa del proceso fue la que normalmente se usa en la empresa donde se realizó la cocción. Luego de cocción, se midieron nuevamente dimensiones y masas y se realizaron los respectivos análisis para el desarrollo del proyecto.



**Figura 7. Formulaciones de arcilla y cenizas volantes**

El proceso de cocción, fue realizado por la ladrillera Margres, siguiendo los lineamientos que normalmente utilizan. Este proceso se llevó a cabo en un horno colmena en donde inicialmente se realizó un caldeo a una temperatura de 0 a 100°C agregando carbón y leña. Posteriormente se dio

inicio a la curva de cocción en donde se distribuyeron las temperaturas hasta alcanzar un tiempo de 40 horas (ver anexo 2); cada media hora se agrega una palada de carbón al horno. Cuando la temperatura se encontró entre 500 a 600°C, temperatura en la cual inicia la dilatación alotrópica del cuarzo, se redujo la carga de carbón, agregando media palada cada media hora. A la temperatura de 1000°C se sostiene el horno durante 6 horas para lograr una mejor sinterización del material.

Esta etapa de cocción, se realizó a dos atmosferas, una cocción en atmosfera oxidante con un tiempo de duración de 40 horas, se realizó con una curva de cocción en donde alcanzaron temperaturas finales de 950°C, 1000°C y 1050°C, manteniendo la temperatura final durante 4 horas. Cuando el horno alcanza la temperatura final, se ingresa aire a través de una turbina, esto permite que mejore la combustión al reaccionar el óxido de hierro del material, por esta misma razón se abren las brameras con el fin de ingresar oxígeno. Esto permite que el material adquiera un tono rojizo debido a la fase de oxidación del óxido de hierro.

La cocción en atmosfera reductora, tiene un tiempo de duración de 45 horas, hasta alcanzar temperaturas finales de 975°C, 1025°C y 1100°C, en esta quema el tiempo de reducción para cada temperatura fue de 8, 9 y 10 horas respectivamente, el proceso de calentamiento que se llevó para lograr esta atmosfera fue básicamente similar a la atmosfera oxidante hasta los 900°C, de ahí en adelante se empieza a trabajar con  $\frac{3}{4}$  del registro cerrado, con el fin de tapar el horno pero sin perder tiraje, así se mantiene hasta los 975°C, luego se reduce el suministro de aire hasta llegar a 1050°C, finalmente para la temperatura de 1100°C, se sigue el mismo procedimiento, pero después de pasar los 1050°C se deja de inyectar aire, alimentando la combustión solo con carbón, para ello se cierran las brameras y las hornillas impidiendo el ingreso de aire al horno. El humo que se produce dentro del horno es retenido utilizando cribas las cuales impiden que este salga



por la chimenea, ocasionando que el aire dentro del horno se reduzca y se produzca mucho humo, el cual se impregna en el material generando que este adquiera tonos oscuros.

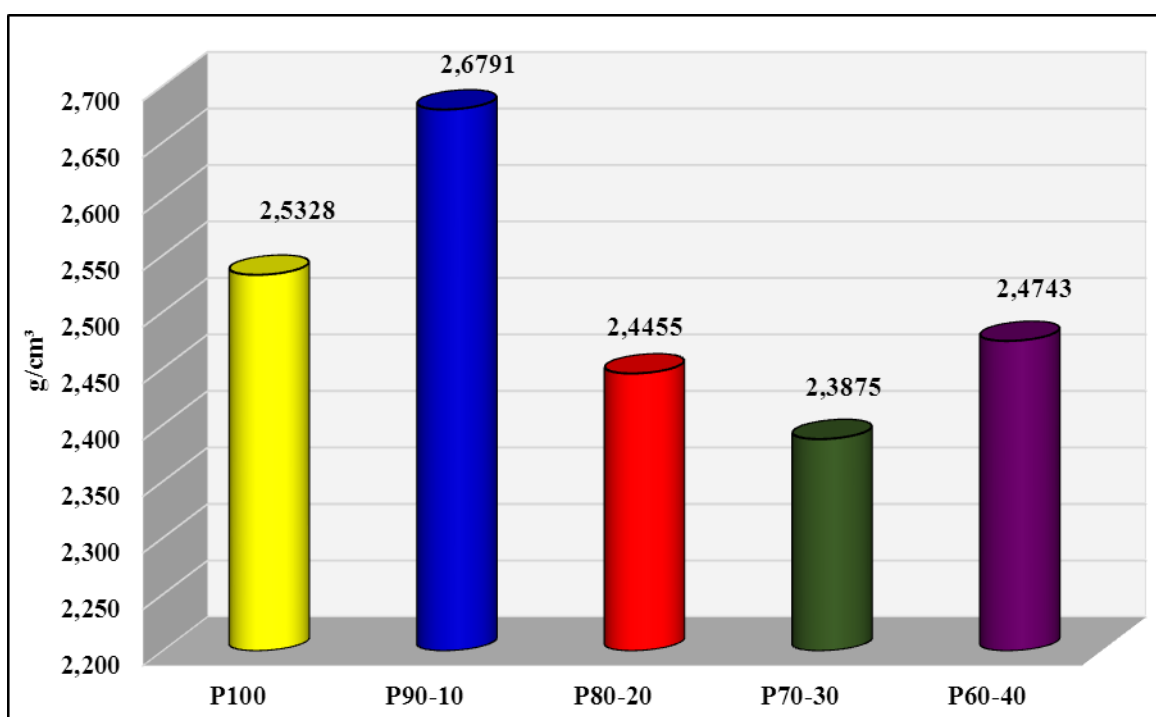
La ubicación del material dentro del horno, se realizó siguiendo los parámetros que normalmente utiliza la empresa Margres, en donde inicialmente se coloca una base de bloque en el horno y posteriormente se ubica el material de acuerdo a su temperatura de cocción (baja, media y alta) de manera ascendente.

El proceso de cocción en atmosfera oxidante y reductora es controlado por el supervisor de hornos, el cual lleva el informe de las temperaturas de acuerdo a la curva de cocción y la cantidad de carbón agregado al horno (paladas) por el quemador, finalmente esta información es revisada por el jefe de calidad.

#### **4.4 Evaluación de las Propiedades Estructurales y Mecánicas de las Muestras**

**4.4.1 Aspectos tecnológicos** Después del conformado de los especímenes, se procedió a evaluar inicialmente el comportamiento húmedo del material. Como se observó en la figura 8, la muestra P100 presentó una densidad de 2,5328 g/cm<sup>3</sup>; posteriormente con la adición de cenizas volantes en un 10%, la densidad se incrementó en 5,8%, sin embargo, esta decreció hasta 5,7%, a medida que se le adicionó mayores cantidades de cenizas volantes >10%, lo cual se apreció en todas las muestras con relación a la P100. Esto se debe, a la cantidad presente de cenosferas huecas o macizas en las cenizas. La morfología de las cenizas volantes de la central termoeléctrica de Termotasajero, está conformada por partículas suaves al tacto, de color grisáceo, principalmente de forma esférica, que pueden ser vítreas, sólidas, huecas, lisas o esponjosas (Peña Rodríguez & Ortega Triana, 2014). De este modo, las muestras que presentaron disminución en la densidad, son aquellas que poseen cenizas volantes con mayor proporción de

partículas huecas, como lo menciona Luz Elena Santaella Valencia, en su libro, Caracterización física química y mineralógica de las cenizas volantes (P. 56), es decir, al incrementar el porcentaje de cenizas volantes, la mezcla adquiere partículas de cenosferas huecas en mayor cantidad, por lo cual, la densidad disminuye. Además, Luz Elena Santaella Valencia, también menciona, que este efecto puede ser atribuido a la cantidad de agua absorbida por las muestras que poseen mayor porcentaje de cenizas volantes, lo que genera que esta agua sustituya el aire generado en el material por las cenizas, separando las partículas y disminuyendo la densidad (Santaella Valencia, 2001).



**Figura 8. Densificación húmeda de los especímenes**

**4.4.1.1 Condición seca.** Durante la etapa de secado se produjeron diversas transformaciones de las dimensiones y características físicas de las piezas, las que, de no transcurrir dentro de ciertas condiciones, producen defectos irreversibles tales como fisuras y deformaciones, razón

por la cual es necesario optimizar en lo posible la calidad de en esta etapa (Betancourt, Díaz, & Martirena, 2013), ya que es la operación más individualizada dentro del conjunto del proceso de fabricación de productos cerámicos; de igual manera, diversos aspectos, como la calidad del material y tiempo de secado, influirán en el resultado final de la pieza luego del horneado. Es fundamental resaltar, que el reto más importante del secado, es evitar que cualquier cambio brusco de temperatura en la contracción que sufre la pieza al paso del tiempo, con la pérdida de agua, origine agrietamientos, roturas o una deficiente densificación (Estrada & Espinosa, 2015) (Martínez, 2013).

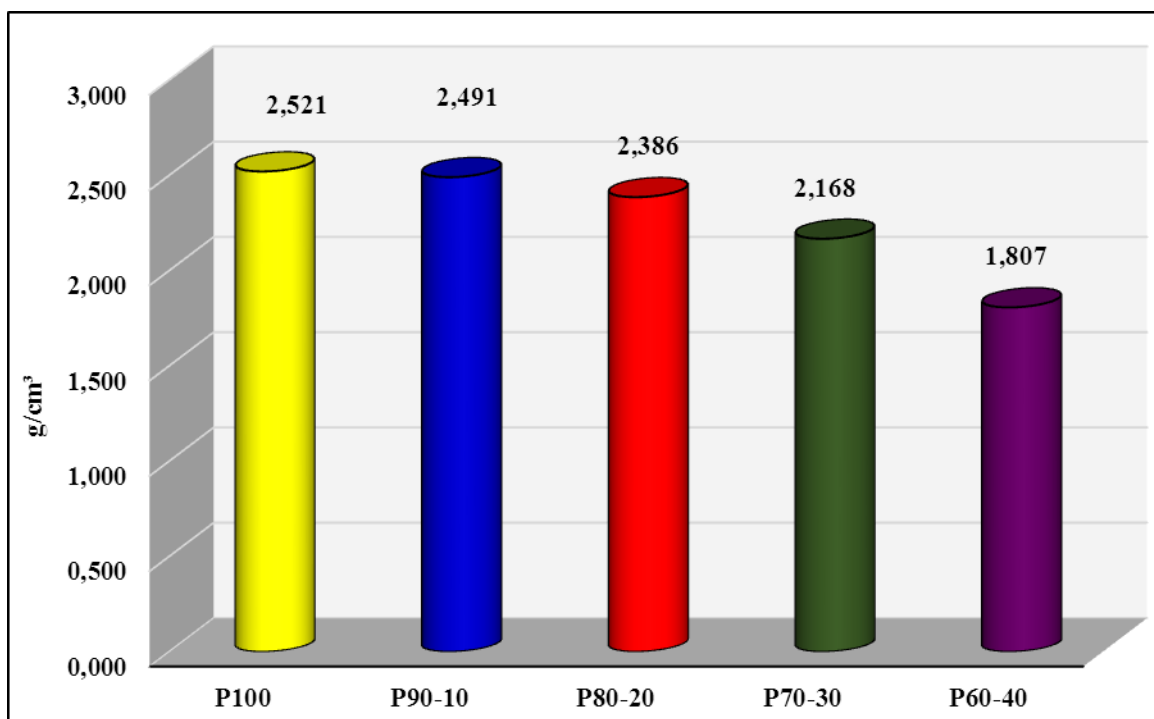
Existen en la industria, en general, diversos métodos de secado, pero el más usado es el de evaporación (Estrada & Espinosa De Los Monteros, 2015); para este fin, se necesita separar el cuerpo líquido, del cuerpo sólido, y así obtener la pieza en condiciones óptimas para la etapa de cocción, con una humedad menor al 1%, ya que el secado tiene la finalidad de eliminar el agua agregada en la fase de moldeado y de esta manera, pasar a la fase de cocción (Vega Mohalem & Diaz Cortes, 2014). El proceso de conformado por extrusión, se concentra en mayor parte en el sector industrial cerámico de Norte de Santander, llegando al 99% de empresas que transforman sus materias primas arcillosas mediante este conformado (Moreno Quintero, Pabón Acevedo, Cely Illera, & Cely Niño, 2018), utilizando el secado natural en sus procesos productivos en un 95,55%, no solo por el bajo costo del proceso, sino además, porque en la región, y especialmente en el Área Metropolitana de Cúcuta, se presta para este tipo de secado, ya que la temperatura promedio es de  $30 \pm 5$  °C, en días no tan calurosos (Sánchez, Gelves, Álvarez & Ramírez, 2013).

Durante este tipo de secado, el agua debe ser llevada desde el interior de la pieza, a través de dichos capilares hasta la superficie, donde podrá evaporarse libremente, por lo cual habrá que tener en consideración los dos factores siguientes: la velocidad de difusión y la velocidad de

evaporación. El delicado problema del secado en cerámica, se resuelve en gran parte cuando la velocidad de evaporación no supera a la velocidad de difusión del agua desde el interior a la superficie de la masa, y el agua puede difundirse y evaporarse a una velocidad tal, que no dañe el material que se está secando. El agua se moverá a través de los huecos que dejan las partículas laminares, es decir, en los canales capilares formados por éstas, con una velocidad de difusión. La difusión será posible mientras haya evaporación en la superficie de la pieza, y puesto que la evaporación depende de la relación entre la tensión de vapor del líquido y la presión de vapor de la atmósfera que rodea al sistema, es obvio que la velocidad de difusión depende también de dicha relación (Estrada & Espinosa, 2015).

Teniendo en cuenta lo anterior, se analizó el comportamiento de los especímenes en aspectos tecnológicos como la densidad, contracción y pérdidas de masa (ver anexo 3), y el efecto que generó las preparaciones en la estructura interna del material durante la etapa de secado. Como se observó en la figura 9, las muestras en estado seco presentaron un comportamiento con tendencia a la disminución de la densidad a medida que se incrementó la adición de cenizas volantes, esto puede estar asociado a la cantidad de carbón inquemado que se encuentra adherido en las partículas de cenizas volantes (Peña Rodríguez & Ortega Triana, 2014), el cual se puede determinar en la pérdida por ignición, y genera dificultad en la utilización tecnológica de dichas cenizas volantes (Morales, 2015).

Con el secado de las muestras la densidad disminuyó hasta un 26,7%, siendo la P60-40 la que más presentó dicho comportamiento.

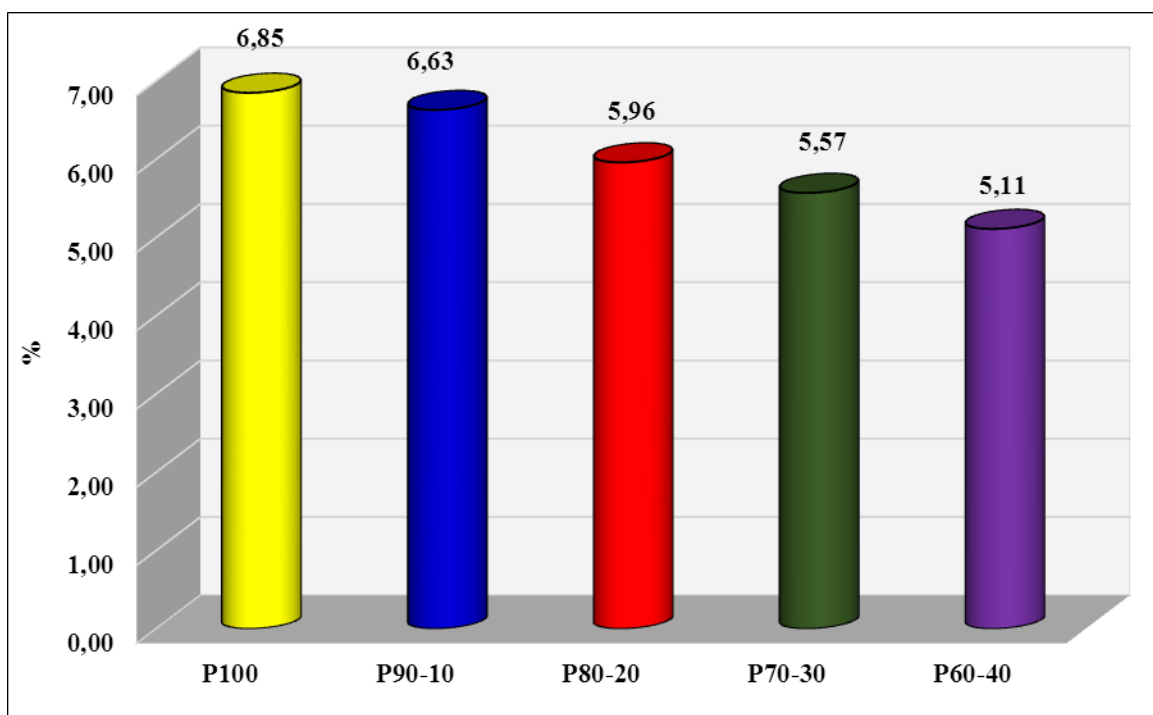


**Figura 9. Densificación seca de los especímenes**

En la contracción seca, es importante mencionar, que la muestra se sometió a una etapa de secado, en donde las partículas del material que están virtualmente rodeadas por una película muy fina de agua, pierden la misma a medida que avanza el proceso, ocasionando que la distancia entre partículas disminuya, generando contracciones en el material (Muñoz Chaves, Muñoz Menese, Mancill, & Rodríguez Páez, 2012). Teniendo en cuenta lo anterior, se observó un disminución del 25,4%, en la contracción de las muestras secas, principalmente en la P60-40.

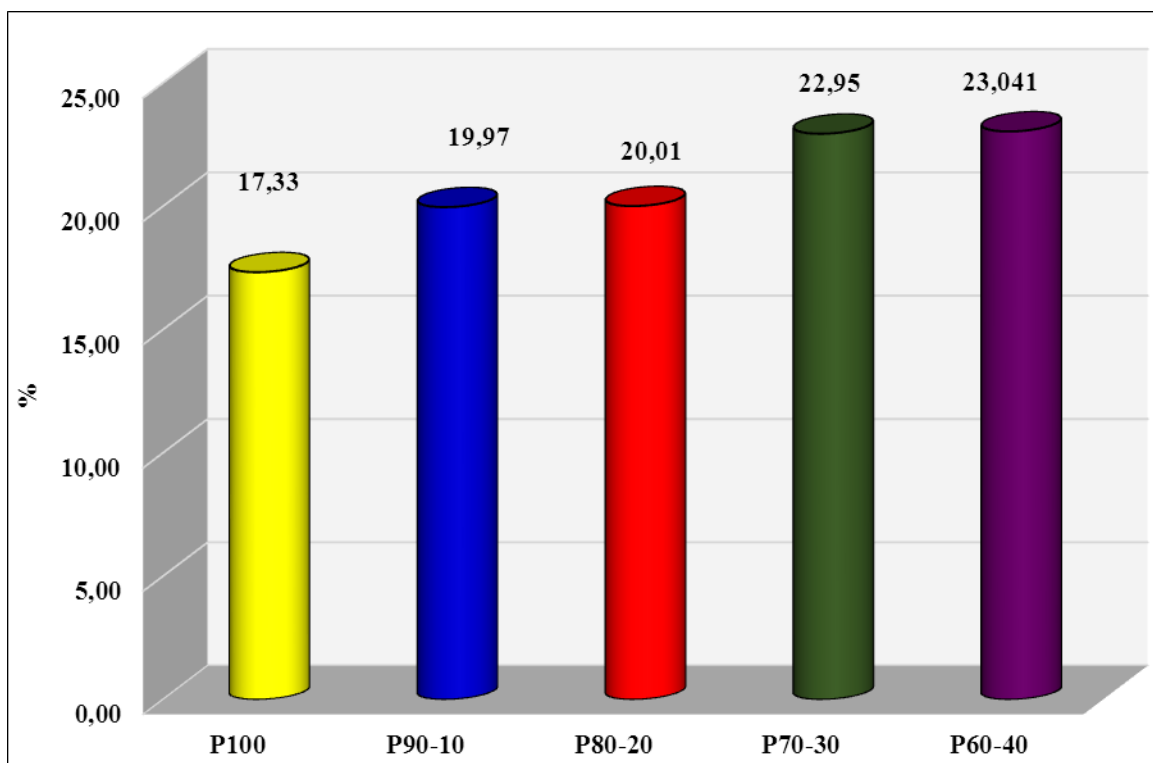
Se evidenció en la figura 10, que el uso de las cenizas volantes como material sustituto permitió reducir significativamente la contracción durante el proceso de secado, siendo favorable para lograr un mayor control dimensional del cerámico obtenido. Por lo tanto, se puede decir que existe una relación inversamente proporcional: a mayores cantidades de sustitución de cenizas volantes en la arcilla, la contracción lineal disminuye (Cruz Fabián, 2016), sin dejar de mencionar

que la arcilla utilizada de formación Guayabo, presenta una granulometría de mejor calidad presentando menores contracciones y fisuraciones en el producto terminado ( Cáceres, Sánchez Molina, & Chaparro García, 2017); además, la presencia de cuarzo y fase amorfa evidenciada en el DRX de las cenizas volantes, favorece el proceso de contracción, al actuar como desgrasante (Sánchez, Corpas & Rojas, 2019).



**Figura 10. Contracción seca de los especímenes**

Como se observa en la figura 11, las pérdidas de masa en estado seco, aumentaron con la adición de cenizas volantes en un 32,9%, principalmente en la P60-40. Las muestras con mayores porcentajes de cenizas volantes presentan una mayor pérdida de masa, debido a su alto contenido de materia inorgánica y por tanto, ocurre más desgasificación en el proceso de secado (Muñoz, Muñoz, Mancill, & Rodríguez, 2012).



**Figura 11. Pérdidas de masa seca de los especímenes**

**4.4.1.2 Condición cocida.** La cocción de los productos cerámicos es una de las etapas más importantes del proceso de fabricación, ya que de ella depende gran parte de las características del producto cerámico: resistencia mecánica, estabilidad dimensional entre otros. Las variables fundamentales a considerar en la etapa de cocción son, el ciclo térmico (temperatura-tiempo), y la atmósfera del horno, que deben adaptarse a cada composición y tecnología de fabricación, dependiendo del producto cerámico que se desee obtener (Campos, Quispe & Prias, 2015).

La operación de cocción consiste en someter a las piezas a un ciclo térmico, durante el cual tiene lugar una serie de reacciones en la pieza, que provocan cambios en su microestructura y les confieren las propiedades finales deseadas, al mismo tiempo que se muestra si las fases precedentes (amasado, moldeo y secado), se han llevado a cabo correctamente (Campos, Quispe

& Prias, 2015).

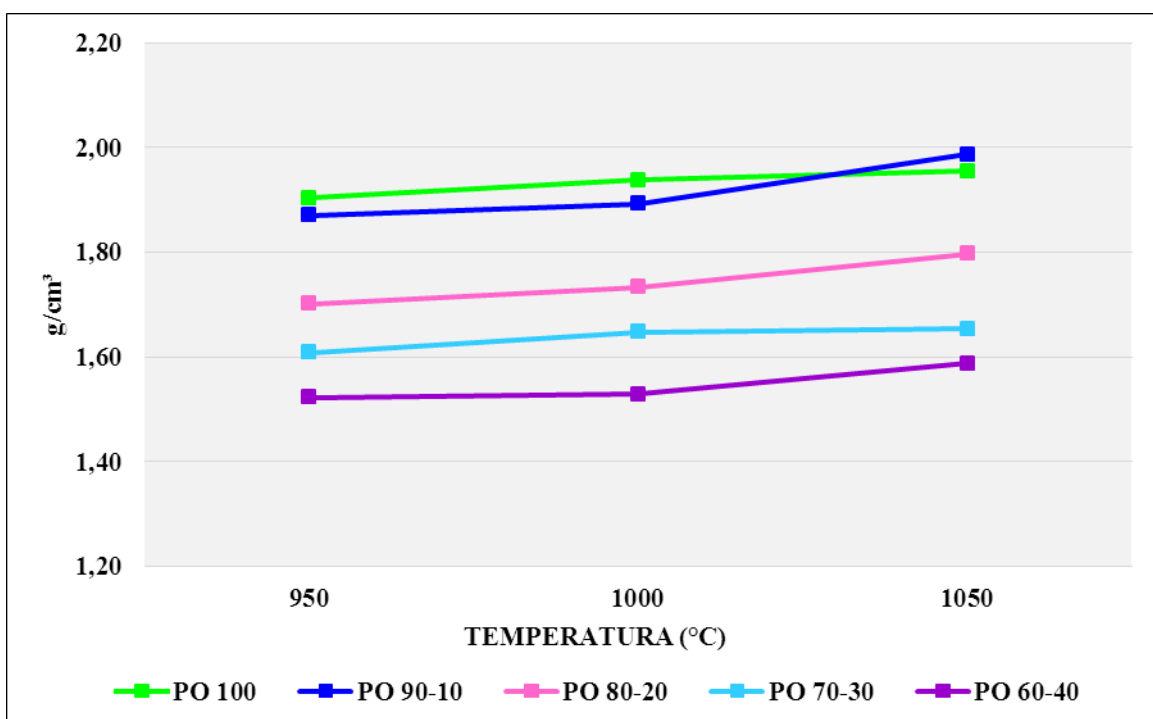
Finalmente, se evaluaron las propiedades tecnológicas del material después del proceso de cocción (ver anexo 4), entre las cuales se evaluó la densificación del material (ver figuras 12 y 13), las cuales determinaron, la cantidad de huecos internos que tiene el producto y de esta manera define la resistencia mecánica y la propiedad estructural. Se evaluó la contracción en cocido (ver tabla 8), para determinar el tamaño promedio de la pieza cerámica después de esta etapa y las pérdidas de masa por cocción (ver tabla 9) que determinan, la pureza del material y al final, con estos datos, generar controles en el proceso de producción, en cuanto a la cantidad a fabricar y los costos de transporte del material (Cely & Bolívar, 2015).

Como se observó en las figuras 12 y 13, los valores de densidad cocidos comparados con los presentados en estado húmedo y seco, disminuyeron considerablemente. En las dos atmosferas las muestras P100 y P90-10 se comportan de mejor manera, pues como se detalla, en todas las temperaturas existe un incremento significativo en la densidad comparadas con las demás, este comportamiento se puede explicar considerando la granulometría de las muestras, mientras que la P100 y P90-10 están constituidas por más partículas pequeñas (89,3% y 88,9% pasante en malla ASTM 230, respectivamente) y por lo tanto más reactivas, lo que favorece la densificación. Las demás muestras presentan un mayor contenido de partículas inorgánicas que afectan claramente la densidad de las mismas (Muñoz, Muñoz, Mancill & Rodríguez, 2012).

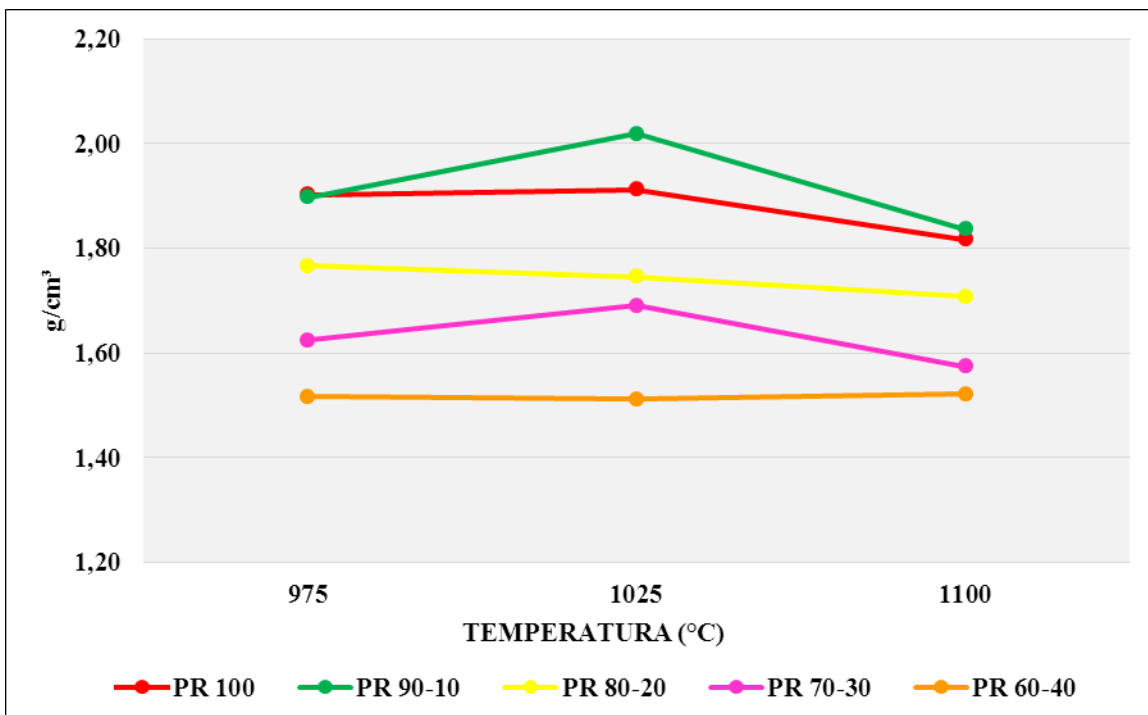
Las muestras en la atmosfera oxidante (ver figura 12), presentaron incrementos en la densidad hasta de 2,6% mayormente en la P100 y P70-30 al llegar a la temperatura media de cocción, y hasta de 5,3% a la temperatura final, siendo la P90-10 la muestra que presentó principalmente este incremento, por otra parte, las muestras en la atmosfera reductora (ver figura



13), alcanzaron un incremento hasta de 6,3% a la temperatura media y posteriormente, se observó un descenso hasta de 8,9% al incrementar la temperatura de cocción (1025°C a 1100°C), estos valores porcentuales se evidenciaron principalmente en la P90-10. Este efecto puede estar asociado a la pérdida de masa de las muestras, reacción de los carbonatos de calcio y desprendimiento de CO<sub>2</sub>, y al posible desarrollo del fenómeno denominado “Ostwald Ripening”, proceso donde los poros grandes crecen a expensas de los poros pequeños, produciéndose un proceso de desdensificación (Muñoz, Muñoz, Mancill & Rodríguez, 2012). Este es un aspecto importante a la hora de utilizar la inclusión de cuerpos no arcillosos contaminantes dentro de pastas cerámicas, pues este tipo de materiales presentan ciertos límites de uso para elaborar cerámica estructural.



**Figura 12. Densificación cocida en atmósfera oxidante**



**Figura 13. Densificación cocida en atmósfera reductora**

Se observó en la tabla 8, un incremento de la contracción cocida en la atmósfera oxidante hasta de 40,3%, evidenciado principalmente en la muestra P100, en todas las temperaturas; por otra parte, la atmósfera reductora presentó un aumento hasta del 163,9% a la temperatura de 1025°C, y una disminución hasta de 69,1% a los 1100°C, en la misma muestra.

La contracción cocida, tiene una relación inversamente proporcional con la cantidad de materiales desgrasantes que componen la arcilla, principalmente arena, en donde, a menor contenido de éstos, la contracción en el material cerámico es mayor, esto se puede evidenciar en el triángulo de Winkler, en donde las formulaciones que contienen bajo contenido de arena como la P60-40 con un 22%; a su vez presentan mayores valores de contracciones, cabe mencionar que el porcentaje de contracción en cocido, indicó la reducción en tamaño dimensional que va a sufrir la pieza cerámica después de la cocción (Flórez Vargas, Sánchez Molina, & Blanco Meneses,

2018).

El aumento de la contracción en la atmosfera oxidante, es posible gracias al exceso de oxígeno presente en esta que rompe los enlaces silico-aluminoso, caso contrario en la atmosfera reductora, donde no se presenta una contracción lineal de forma uniforme (Uchima Quintero, 2015).

**Tabla 8. Contracción lineal cocida**

ATMÓSFERA	TEMPERATURA °C	FORMULACIONES				
		P100	P90-10	P80-20	P70-30	P60-40
CONTRACCIÓN LINEAL COCIDA (%)						
OXIDANTE	950	1,29	1,44	2,28	2,30	2,40
	1000	1,81	1,96	2,41	2,46	2,59
	1050	2,54	2,63	2,89	3,09	3,10
REDUCTORA	975	1,36	2,59	2,17	2,23	2,17
	1025	3,59	3,77	2,62	3,03	2,61
	1100	1,11	1,82	2,10	2,50	2,65

El porcentaje de pérdida por calcinación, consta de la eliminación de impurezas a través de la cocción de la pasta, en su mayoría material inorgánico que se encuentra ligado a la arcilla, por lo que existe una disminución en el volumen y peso de la misma, una vez haya salido del horno (Flórez, Sánchez & Blanco, 2018).

Como se observó en la tabla 9, en las dos atmosferas (Oxidante y Reductora) las formulaciones mantuvieron una pérdida por calcinación entre un rango del 5,12% al 7,52%, lo que indicó que es una materia prima propia para procesos de extrusión (Payares Pérez, 2014). Al encontrarse en las muestras un bajo contenido de material orgánico, es decir, un bajo porcentaje de LOI, es favorable, ya que a menor cantidad de materia orgánica, se evita que en el proceso de cocción queden espacios vacíos por el consumo de este material (Cáceres, Sánchez & Chaparro,

2017).

Varios autores señalan un límite de 0,3% de carbón presente en la materia inorgánica, en el que es de esperarse que el porcentaje de pérdida por calcinación sea proporcional a la cantidad de carbón orgánico; sin embargo, no se ha encontrado una ecuación que modele dicha proporción ya que ésta puede variar acorde a los ambientes de formación de las arcillas, no obstante, en un estudio de la materia orgánica en 10 tipologías de arcillas, se observó que, un aumento a partir de 7,50% en pérdidas por calcinación, mostraba un contenido en carbón superior al 0,3% (Flórez Vargas, Sánchez Molina, & Blanco Meneses, 2018), lo cual confirma lo descrito en el segmento de la densificación seca.

Es importante mencionar, que no existe un valor específico para clasificar una arcilla como buena o mala de acuerdo a las pérdidas por calcinación, ya que también influyen las condiciones de fabricación de los materiales y el tipo de cocción, siendo más sensibles aquellos de monococción (Flórez Vargas, Sánchez Molina, & Blanco Meneses, 2018), sin embargo, como ya se había mencionado, las pérdidas por calcinación de todas las muestras están dentro de rangos normales para materias primas usadas en la fabricación de productos.

**Tabla 9. Pérdida por calcinación**

ATMÓSFERA	TEMPERATURA °C	FORMULACIONES				
		P100	P90-10	P80-20	P70-30	P60-40
OXIDANTE	950	5,12	5,96	6,46	6,90	7,41
	1000	5,37	6,16	5,90	7,48	7,31
	1050	5,47	6,30	6,64	7,45	7,19
	975	5,41	6,30	6,27	6,64	7,48
REDUCTORA	1025	5,50	6,57	6,45	6,76	7,52
	1100	5,34	6,25	6,73	6,15	7,14

Para productos de revestimiento y pavimentos cerámicos, la propiedad estructural (ver figuras 14 y 15) se llevó a cabo mediante el ensayo de absorción de agua por el método de ebullición, dejando las probetas impregnadas en agua destilada, hirviendo por un tiempo de 2 h, de acuerdo al procedimiento de la norma NTC 4321-3 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - ICONTEC-, 1998). La caracterización mecánica (ver figuras 16 y 17), se llevó a cabo mediante el ensayo de resistencia a la flexión en tres puntos, utilizando una prensa de presión, mediante la aplicación de una velocidad de carga de  $1 \pm 0,2$  N/mm<sup>2</sup> por segundo, siguiendo el procedimiento de la norma NTC 4321-4 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - ICONTEC-, 1997). Estas dos propiedades son de suma importancia para determinar la calidad de los productos cerámicos, por esta razón, los resultados obtenidos fueron comparados más adelante mediante la norma NTC 919.

El porcentaje de absorción de agua, reveló el grado de porosidad que el material puede presentar al retener agua en sus poros, de igual manera afecta la resistencia mecánica, comportándose de manera inversamente proporcional a la porosidad (Flórez Vargas, Sánchez Molina, & Blanco Meneses, 2018).

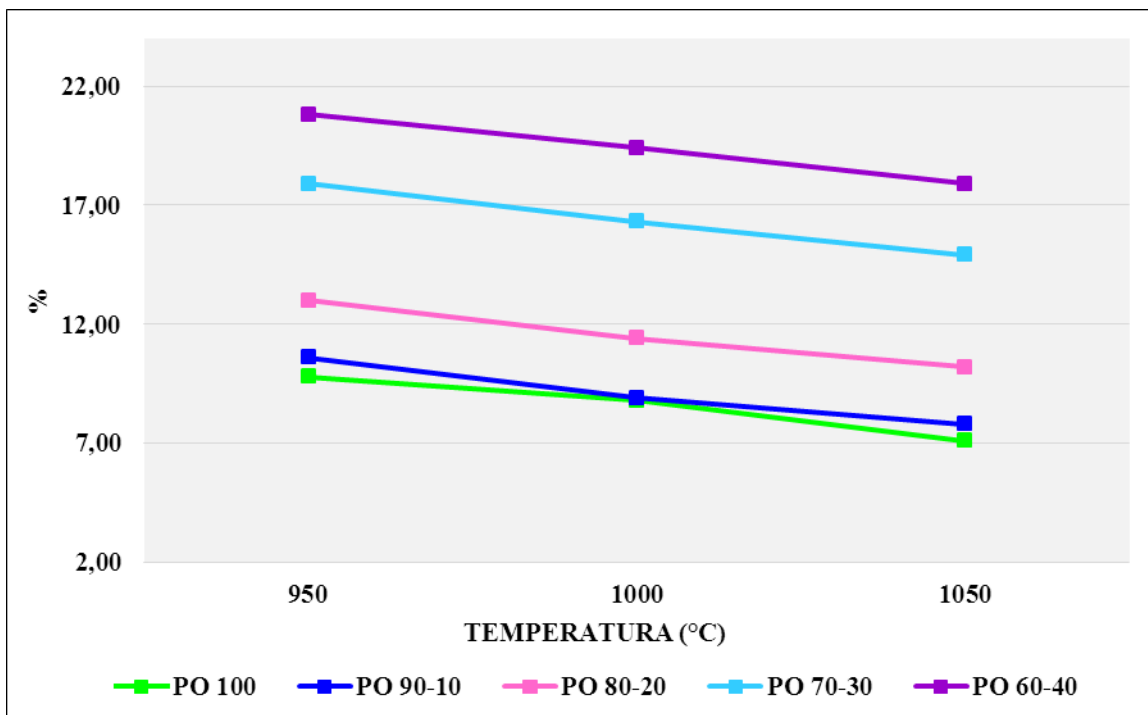


Figura 14. Propiedad estructural en atmósfera oxidante

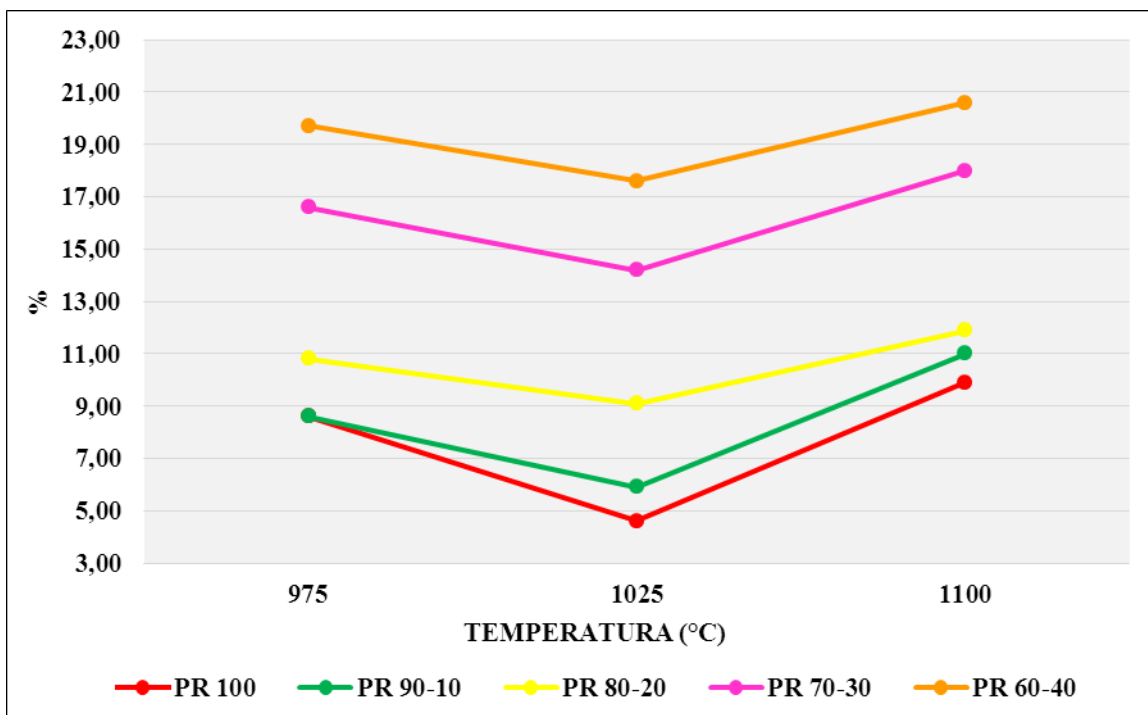


Figura 15. Propiedad estructural en atmósfera reductora

Se observó en la figura 14, que la atmósfera oxidante presenta valores más altos de porosidad en comparación con la atmósfera reductora, principalmente a temperaturas inferiores de 1050 °C, a excepción de la P60-40. La porosidad del material se redujo con el incremento en la temperatura de cocción, a mayor temperatura hay mayor sinterización, lo que disminuye la porosidad abierta de los productos cocidos (ladrillos con cv, 2019), esto se evidencia en cada una de las atmósferas, teniendo en cuenta que en la reductora es hasta los 1025°C.

Se observó en la figura 14 y 15, que se presentan disminuciones en la porosidad en la temperatura media hasta del 16,0% en P90-10 y hasta del 46,5% en P100, evidenciado en las atmósferas oxidante y reductora, respectivamente. En la atmósfera oxidante (ver figura 14), se presentó una reducción hasta del 19,3% en la P100 en la temperatura alta, estas disminuciones de porosidad pueden ser causadas debido a que los mecanismos de transporte de masa se activan y los poros comienzan a cerrarse y a perder su interconexión, sin embargo, en la atmósfera reductora (ver figura 15), las muestras presentaron aumentos en su porosidad hasta de 115,2% principalmente en la P100 en la temperatura final, temperatura a la cual se presentaron los descensos en la densificación, en este intervalo de temperatura puede llegar a suceder, como se indicó anteriormente, el colapso de los poros (fenómeno denominado “Ostwald Ripening”), a excepción de la P60-40 la cual presentó un comportamiento contrario.

Es posible clasificar las muestras en dos grupos teniendo en cuenta su porcentaje de absorción, ubicando en un grado medio-alto a las muestras que contienen un porcentaje de absorción por debajo del 10%, y son consideradas de nivel alto las muestras que contienen un porcentaje de absorción mayor al 10% (Flórez Vargas, Sánchez Molina, & Blanco Meneses, 2018); es decir, las muestras P100 y P90-10, presentan una porosidad media-alta, lo que puede indicar mayores valores en la resistencia mecánica, como puede verse más adelante, a diferencia

de las demás que presentan un grado de absorción alto.

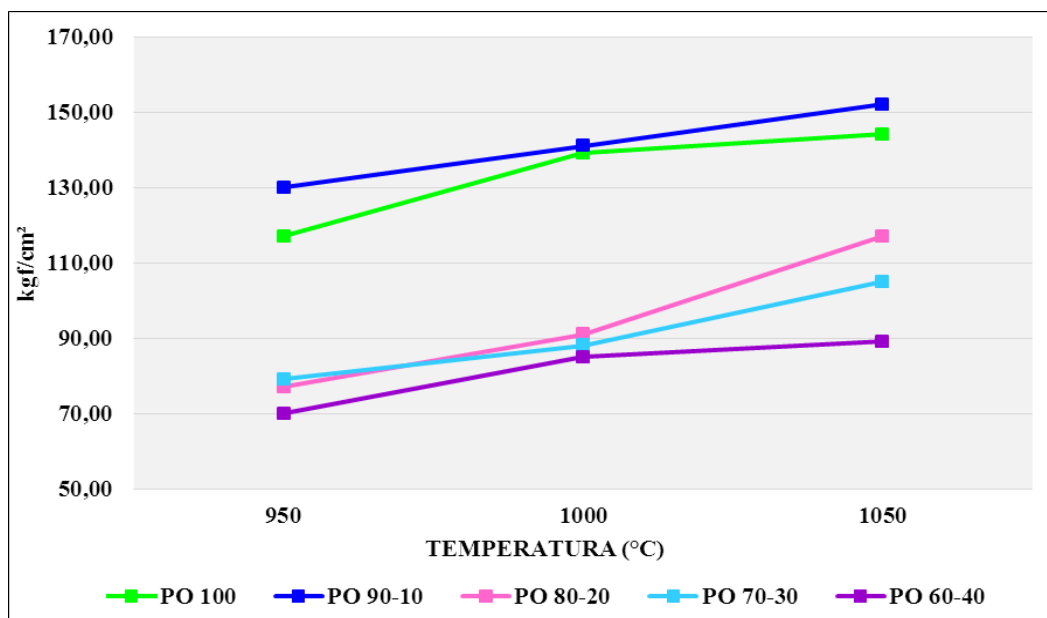


Figura 16. Propiedad mecánica (resistencia a la flexión) en atmósfera oxidante

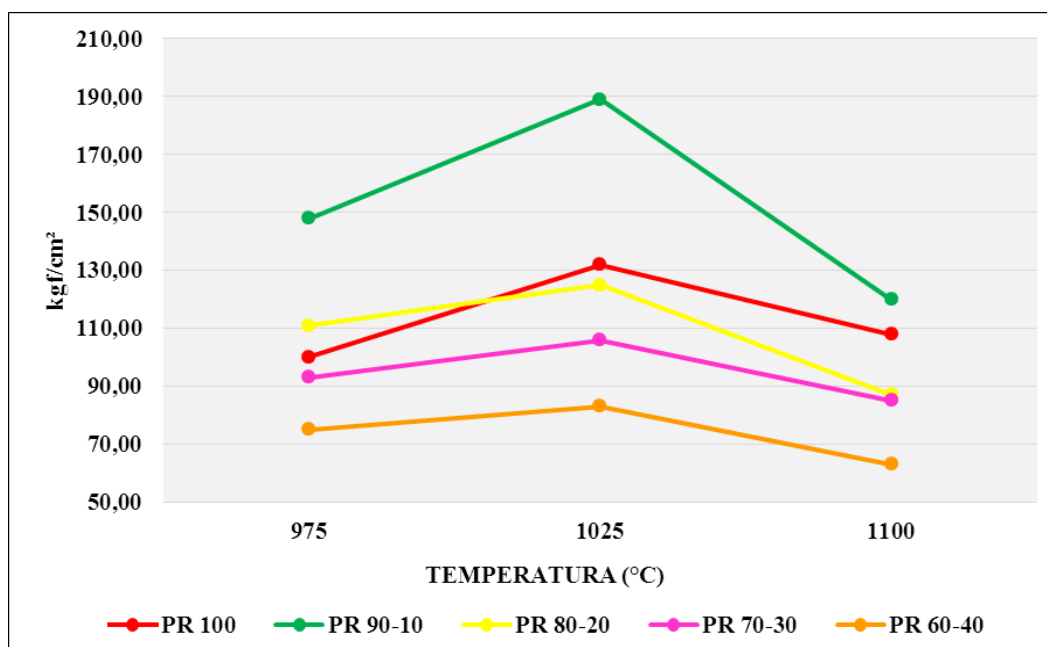


Figura 17. Propiedad mecánica (resistencia a la flexión) en atmósfera reductora



En las figuras 16 y 17, se observó la propiedad mecánica evaluada mediante el ensayo de resistencia a la flexión. Las muestras que se encuentran en atmosfera oxidante (ver figura 16), iniciaron la RF a los 950 °C, y al aumentar la temperatura a los 1000 °C las muestras P100 y P90-10, alcanzaron un máximo valor de resistencia de 139  $kgf/cm^2$  y 141  $kgf/cm^2$ , respectivamente, en comparación con las demás; sin embargo, todas las muestras presentaron un leve aumento en su resistencia mecánica, a medida que aumentaba la temperatura. La P60-40 es la muestra que presentó mayor incremento hasta la temperatura media (21,4%), sin embargo, la P80-20 y P70-30 son las muestras que registraron mayores incrementos hasta de 28,6% a la temperatura final.

Por otra parte, se observó que todas las muestras en la atmosfera reductora (ver figura 17), presentaron incrementos en la resistencia hasta alcanzar la temperatura de cocción de 1025 °C, siendo la P90-10 la muestra que arrojó un mayor incremento (27,7%) y una mayor resistencia mecánica a esta temperatura, con una RF de 189  $kgf/cm^2$ ; posteriormente, se presentó un descenso en todas las muestras hasta de 36,5%, esto puede ser ocasionado por la temperatura de fundición de las cenizas volantes, la cual es inferior a la que se presenta en la atmosfera oxidante, llegando en ocasiones a los 1093 °C, como menciona Bessette R, en su libro, Efecto de la ceniza del combustible en el diseño y funcionamiento (Cap. XXI). Sin embargo, esta temperatura puede llegar a reducirse por el tipo y cantidad de los compuestos en las cenizas volantes, los cuales comienzan a derretirse por su bajo punto de fusión, ocasionando que las muestras pierdan propiedades de resistencia, entre otras (Bessette, 1981). Estos cambios presentados en la P100 podrían estar asociados a recristalizaciones del cerámico.

Se podría llegar a pensar que sustituciones de hasta el 10% de cenizas volantes, podrían ser aceptables para productos cerámicos de bajas temperaturas de cocción (inferiores a 1025°C), como en el caso de algunos productos de mampostería, concordando con otras investigaciones (Aguilar Gutiérrez, 2019), sin embargo, estos resultados se evaluaron a continuación, según la norma NTC 919.

#### **4.5 Comparativo de los Resultados Obtenidos en las formulaciones con la Norma Internacional NTC 919**

Los resultados obtenidos en los análisis de la propiedad estructural y la resistencia mecánica, fueron comparados mediante la norma NTC 919 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación -ICONTEC-, 2000), que evalúa los productos de revestimiento; este comparativo se realizó únicamente en estas dos propiedades (ver anexos 5 y 6), debido básicamente, a que las empresas regionales, evalúan sólo estas dos. Con esto se abre la posibilidad de analizar estos resultados a nivel industrial. Se realizó este comparativo con todas las formulaciones, puntualizando en las muestras que presentaron mejores comportamientos en estas dos propiedades, para observar los beneficios obtenidos al utilizar las cenizas volantes como sustituto en las pastas cerámicas.

Inicialmente, se realizó la evaluación con la norma NTC 4321-3, que evalúa la capacidad de absorción de agua de un revestimiento cerámico; esta es la característica que identifica la naturaleza del cuerpo cerámico en cuanto a la estructura interna, directamente relacionada con la resistencia mecánica y con otras características que afectan la durabilidad de la baldosa cerámica (sobre todo en baldosas no esmaltadas) como es la resistencia a la abrasión profunda, a las manchas y a ciclos de hielo/deshielo (NTC 4321-3, 1998). En el caso de revestimientos

cerámicos, ya sea para piso o para pared, esta propiedad es utilizada para clasificar las baldosas en grupos (GI, GIIa, GIIb y GIII), por tanto, es de gran importancia la evaluación y el análisis de esta propiedad, ya que a partir de los resultados obtenidos es posible la clasificación del producto y la observación de las mejoras del mismo.

Para las condiciones del proyecto, esta propiedad se desarrolló mediante el método de impregnación en agua hirviendo durante 2 h, siguiendo los procedimientos de la norma NTC 4321-3 “Determinación de la absorción de agua, de la porosidad abierta, de la densidad relativa aparente, y de la densidad aparente” (ICONTEC-1998). Como se observó en las figuras 14 y 15, en relación a la norma NTC 919 y la clasificación en los grupos de absorción de agua, se detalló, que en referencia a estos, en la atmósfera oxidante la muestra P90-10 presentó un cambio de grupo de GIII a GIIb a temperaturas de 1000 °C y 1050 °C, aumentando la calidad técnica de la pasta, mientras tanto, en la atmósfera reductora a la temperatura de 1025°C, la muestra P90-10 presentó un cambio de grupo de GIIb a GIIa, generando una reducción en la porosidad del material, lo que mostró un incremento en la resistencia y durabilidad en las pastas (ver anexo 5).

Seguidamente, se analizó la resistencia a la flexión; esta propiedad se aproxima a la resistencia mecánica del material en su conjunto, ante agresiones de diferente naturaleza: cargas dinámicas y estáticas e impactos, que puedan llegar a afectar la durabilidad del material cerámico (NTC 4321-4, 2015). En este método de ensayo se analizaron diferentes magnitudes como: la carga de rotura, la fuerza de rotura y el módulo de rotura o resistencia mecánica. En la norma NTC 919, se estudia el módulo de rotura, característica intrínseca del material, en este caso, expresado en  $\text{kgf/cm}^2$ .

Para el proyecto de investigación, esta propiedad se desarrolló mediante el ensayo de resistencia a la flexión en tres puntos utilizando una prensa de presión y siguiendo el procedimiento de la norma NTC 4321-4 “Método de ensayo para determinar el módulo de rotura y la resistencia a la flexión” (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - ICONTEC-, 1997). Como se observó en la figura 16, en relación con la norma NTC 919 y su clasificación en los grupos de resistencia mecánica, la atmósfera oxidante a temperaturas de 1000 °C y 1050 °C, presentó cambios de grupo en las muestras P80-20, P70-30 y P60-40 del GIII a GIIB, generando mejoras en la resistencia mecánica de las pasta (ver anexo 6)

En la atmósfera reductora, se observó que las muestras P80-20 y P70-30 permanecieron en el mismo grupo GIIB, mientras que, la P90-10 y la P60-40 presentaron un cambio de grupo de GIIB a GIIA y de GIII a GIIB respectivamente, a la temperatura de los 1025°C, mejorando la resistencia mecánica en las pastas, sin embargo, es importante resaltar, que a la temperatura de los 1100 °C, dichas pastas volvieron a su grupo inicial (ver anexo 6)

## 5. Conclusiones

Tras la caracterización química y mineralógica de las materias primas utilizadas para este proyecto, se pudo determinar que la arcilla es de tipología Illítico- Caolinítica, la cual se caracteriza por contener cantidades de Cuarzo (Q), Calcita (C), Caolinita (K) e Illita (I) dentro de su composición arcillosa; así mismo, se destaca, en la arcilla elevados contenidos de Sílice y Alúmina, y en una proporción moderada, el óxido de hierro, elemento que justifica el color rojo característico de las arcillas del área metropolitana de Cúcuta. Por otra parte, las cenizas volantes pertenecen a la clase F, procedentes del carbón Bituminoso y con propiedades puzolánicas, de igual manera, se observó en su composición química, un nivel bajo en pérdida por ignición de 2,04% y una relación molar representado en un 3,53%, lo cual indicó, que este tipo de material de sustitución, puede conferir una elevada resistencia mecánica al producto cerámico.

Las formulaciones P100, P90-10, P80-20 y P70-30, son mezclas aptas para la fabricación de materiales cerámicos, caso contrario la P60-40 según el triángulo de Winkler, la cual, no se ubicó en ninguna zona estipulada, debido a su alto contenido de partículas gruesas; de igual manera, el pronóstico de extrusión de Casagrande, confirma que esta formulación presenta una extrusión difícil, junto con la P80-20 y la P70-30, como efecto de un mayor contenido en peso de cenizas volantes, requiriendo un mayor porcentaje de agua para su moldeo.

El análisis de las muestras después del proceso de secado, mostró un comportamiento inversamente proporcional a la cantidad de cenizas adicionadas, con relación a la densificación y a las contracciones. La disminución en la densidad puede estar asociado, a la cantidad de carbón inquemado que se encuentra adherido en las partículas de ceniza, el cual se puede determinar en la pérdida por ignición, mayormente en la P60-40 y a su vez, estas cenizas volantes permiten

reducir significativamente la contracción, siendo favorable para lograr un mayor control en las dimensiones del cerámico obtenido. Además, en esta etapa, se genera la mayor pérdida de agua en la misma muestra, debido a su alto índice de plasticidad, es decir, la cantidad de agua necesaria para su moldeo.

Las muestras mantienen una pérdida por calcinación entre un rango del 5,12% al 7,52%, lo que indica que es una materia prima propia para procesos de cerámicos. La mayor pérdida por calcinación se evidencia en la muestra P60-40; esto puede ser ocasionado por el alto contenido de materia inorgánica presente en las muestras con mayor adición de cenizas volantes; de igual manera, este tipo de formulación presenta bajos porcentajes de arena, lo cual genera mayores contracciones en el proceso de cocción.

Durante la etapa de cocción, en la atmósfera reductora a la temperatura de 1025 °C, se presentó un proceso de desdensificación de las muestras; esto puede deberse a la pérdida de masa de las muestras y al posible desarrollo del fenómeno denominado “Ostwald Ripening”, que se evidencia de igual manera en la propiedad estructural, aumentando la porosidad del material. Sin embargo, en la atmósfera oxidante se presentan disminuciones de porosidad, las cuales pueden ser causadas debido, a que los mecanismos de transporte de masa se activan y los poros comienzan a cerrarse y a perder su interconexión.

En el estudio de la resistencia mecánica a la flexión, también se evidenció en la atmósfera reductora a los 1025 °C disminuciones en esta propiedad; esto pudo ser ocasionado por la temperatura de fundición de las cenizas volantes (1093 °C), que debido a sus componentes, la temperatura puede llegar a reducirse y ocasionar que dichos compuestos comiencen a derretirse por su bajo punto de fusión, ocasionando que las muestras pierdan propiedades de resistencia,

entre otras.

Esta investigación permite demostrar que la incorporación de cenizas volantes como materia prima de sustitución en arcillas para la fabricación de productos de revestimiento tipo fachaleta, arroja efectos positivos en ambas atmosferas sin embargo en la atmosfera reductora hasta los 1025 °C. La muestra P90-10, es la que presentó un mayor incremento en la densificación cocida y resistencia mecánica a la flexión, mostrando también una disminución en su propiedad estructural, siendo estas propiedades criterios determinantes para la calidad del espécimen, sin embargo, es importante mencionar que las demás formulaciones con adiciones de cenizas volantes presentaron incrementos en estas propiedades

La evaluación realizada a las muestras, según la norma NTC 919, presentó productos con baja porosidad en pastas con adiciones de cenizas volantes hasta del 10%, y para productos con una mayor resistencia a la flexión se evidenciaron en pastas con adiciones de cenizas volantes hasta del 40%, lo cual es un resultado importante, ya que, se logra reducir la cantidad de material arcilloso a utilizar en las pastas, y por tanto, un mayor uso del residuo industrial, lo que generará una importante reducción de los gases contaminantes, favoreciendo al medio ambiente y permitiendo demostrar que se le puede dar un aprovechamiento al material residual, mediante la incorporación de estos, en productos de revestimiento, los cuales cumplen con los estándares de calidad exigidos por la norma.

Con los valores de resistencia mecánica a la flexión, obtenidos en cada una de las mezclas, se puede determinar que el producto cerámico de revestimiento tipo fachaleta, presenta carga de rotura  $> 450$  N, lo que proporciona características mecánicas de tipo 1, es decir puede ser utilizado para pared (paramento), de tráfico 1.

## **6. Recomendaciones**

Se considera pertinente realizar otros tipos de ensayos que permitan garantizar la calidad en estos productos de revestimiento, como propiedades tribológicas (desgaste de abrasión profunda), y de esta manera, conocer el efecto que podría ocasionar, factores como la temperatura y desgastes por cambios climáticos.

Se sugiere realizar el proceso de cocción mediante la utilización de otros tipos de hornos y de esta manera, analizar y evaluar comparativamente las propiedades tecnológicas obtenidas en este tipo de producto.

Se recomienda que, las muestras no sean sometidas al proceso de cocción en atmósfera reductora, debido que en la temperatura media presentaron resultados desfavorables, obteniendo productos que no cumplen con los estándares establecidos por la norma NTC 919; sin embargo, en el posible caso de usar esta atmósfera, se recomienda llevar a cabo la cocción, en temperaturas inferiores a los 1025°C.



## Referencias Bibliográficas

- Abad, L. & Villegas, A. (2016). Desarrollo de piezas de gran formato en la ladrillera san cristóbal y medición de sus impactos ambientales mediante la metodología de análisis de ciclo de vida. Medellín, Colombia: Universidad Eafit.
- Acuerdo 065. (1996). Estatuto estudiantil. Cúcuta, Colombia: Universidad Francisco de Paula Santander.
- Aguilar, J. (2019). Elaboración de ladrillos mediante la inclusión de ceniza de carbón proveniente de la ladrillera bella vista de Tunja-Boyacá. Tunja, Colombia: Universidad Santo Tomás Sede Tunja.
- ASTM C618. (2019). Especificación estándar para Ceniza volante de carbón y puzolana natural cruda o calcinada para su uso en hormigón. USA: ASTM.
- ASTM D 4318-05. (2017). Los métodos estándar de ensayo para límite líquido, límite de plástico, y el índice de plasticidad de los suelos. ASTM International.
- ASTM D422. (2007). Método de prueba estándar para análisis de tamaño de partículas de suelos. ASTM International.
- Bautista, W., Díaz, M. & Martínez, S. (2017). Caracterización de las cenizas volantes de una planta termoeléctrica para su posible uso como aditivo en la fabricación de cemento. Rev.investigación, desarrollo e innovación, 135-146.
- Behar, D. (2008). Metodología de la Investigación. Shalom.

- Bessette, R. (1981). Efecto de la ceniza del combustible en el diseño y funcionamiento.
- Betancourt, D., Díaz, Y., & Martirena, F. (2013). Influencia de la adición de un 2% de carbonato de calcio en el proceso de fabricación de los ladrillos de cerámica roja: etapas de secado y cocción . Revista Ingeniería de Construcción RIC, 113 – 124.
- Cáceres, V., Sánchez, J. & Chaparro, A. (2017). Evaluación de arcillas caoliniticas-illiticas provenientes de la formación guayabo del área. Revista ION, 117-127.
- Campos, J., Quispe, E., & Prias, O. (2015). Ahorro de energía en la industria cerámica, un proyecto de la unidad de planeación minero energética de Colombia ((UPME)) y el instituto colombiano para el desarrollo de la ciencia y la tecnología “francisco José de caldas” ((Colciencias)). Caldas: Universidad Autónoma de Occidente.
- Castellanos, A., Mawson, H., Burke, V. & Prabhakar, P. (2017). Compuestos de cenosfera y arcilla mezclados con cenizas volantes para baldosas resistentes al impacto. Construcción y materiales de construcción.
- Cely, L., & Bolívar, R. (2015). Materia prima para la industria cerámica de Norte de Santander. II. Evaluación del comportamiento térmico y su incidencia en las propiedades tecnológicas. Respuestas, 84-94.
- Cerquera, A., Rodríguez, C. & Ruano, D. (2017). Análisis mineralógico, químico y porosimétrico de los agregados pétreos de una cantera perteneciente a la formación geológica de la sabána en el municipio de Soacha – Cundinamarca . Bogotá, Colombia: Universidad católica de Colombia.

- Chávez, C., & Guerra, Y. (2015). Producción, propiedades y usos de los residuos de la combustión del carbón de termotasajero. Bogotá, Colombia: Universidad Santo Tomás.
- Ciancaglini, N. (s.f.). Guía para la determinación de textura de suelos por métodos organoléptico. San Juan: Inta EEA.
- Cometa, S., & Méndez, N. (2016). Correlación entre los resultados obtenidos en el ensayo de corte directo y el ensayo de triaxial en un suelo arcilloso típico de la zona occidental de Bogotá. Bogotá, Colombia : Universidad distrital Francisco José de Caldas.
- Cruz, D. (2016). Diseño de un compuesto formado por un desecho agroindustrial y una arcilla natural como alternativa de uso en la elaboración de piezas cerámicas. Huajuapán de León, Oaxaca: Universidad Tecnológica De La Mixteca.
- Doménech, V., Sánchez, E., Sanz, V., García, J., & Ginés, F. (2015). Estimación de la plasticidad de masas cerámicas mediante la determinación de la fuerza de indentación.
- Eliche, D., Sandalio, J. A., Martínez, S., Pérez, L. & Sánchez, P. (2017). Investigation of use of coal fly ash in eco-friendly construction materials: fired clay bricks and silica-calcareous non fired bricks. *Ceramics International*, 1-13.
- Estrada, D., & Espinosa De Los Monteros, J. (2015). El Secado De Los Productos Cerámicos. Instituto de Cerámica y Vidrio.
- Flores, J. (2014). Efecto en las propiedades en tensión de un material compuesto base cemento reforzado con fibras de pet reciclado. Chihuahua. : Centro de investigación en materiales avanzados S.C.

- Flórez, A., Sánchez, J. & Blanco, D. (2018). Las arcillas de las formaciones geológicas de un área metropolitana, su uso en la industria cerámica e impacto en la economía regional. *Revista EIA*, 133-150.
- Fuentes, N., Fragozo, O., & Vizcaino, L. (2015). Residuos agroindustriales como adiciones en la elaboración de bloques de concreto no estructural. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*.
- García, J. (2014). Desarrollo de un modelo teórico experimental del proceso de corte del bagazo de caña de azúcar orientado al diseño óptimo de un sistema cortador . Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia .
- Instituto geográfico Agustín Codazzi. (s.f.). Guía de muestreo. Bogotá, Colombia: Instituto geográfico Agustín Codazzi.
- Itocarpio, D. (2015). Ladrillo de Ceniza Volante.
- Kovalchuk, G., Fernández, A., & Palomo, A. (2008). Activación alcalina de cenizas volantes. Relación entre el desarrollo mecánico resistente y la composición química de la ceniza. *Materiales de Construcción*.
- Kuenl, R. (2001). Diseño de experimentos . Mexico.
- Liu, T., Tang, Y., Han, L., Song, J., Luo, Z., & Lu, A. (2016). Recycling of harmful waste lead-zinc mine tailings and fly ash for preparation of inorganic porous ceramics. *Ceramics International*, 21.
- Lizarazo, J., García, F., & Higuera, C. (2015). Activación de las propiedades cementicias de la ceniza volante mediante electromutagénesis química. *LatinAm. Metal. Mat*, 305- 314.

- Lozano, M. & Gonzalez, S. (2016). Uso de residuos cerámicos en la producción de ladrillos de arcilla cocidos del sector alfarero de candelaria. Santiago de Cali: Pontificia Universidad Javeriana .
- Martínez, A. (2013). Optimización del proceso de secado en piezas de cerámicas fabricadas en talleres semi-artesanales, por medio del diseño de un mecanismo de evaporación a baja presión (EBP). : Guatemala: Universidad Rafael Landívar.
- Masías, K. (2018). Resistencia a la flexión y tracción en el concreto usando ladrillo triturado como agregado grueso. Piura, Perú: Universidad de Piura.
- Maza, O. (2017). Efecto de la incorporación de residuos industriales en la resistencia y durabilidad de ladrillos de arcilla. Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca: Instituto Politécnico Nacional.
- Mejía, J., Rodríguez, E., & Mejía de, R. (2014). Utilización potencial de una ceniza volante de baja calidad como fuente de aluminosilicatos en la producción de geopolímeros. Ingeniería y Universidad, 309-327.
- Morales, D. (2015). Valoración de las cenizas de carbón para la estabilización de suelos mediante activación alcalina y su uso en vías no pavimentadas. Medellín, Colombia: Universidad de Medellín.
- Moreno, M., Pabón, Y., Cely, L., & Cely, J. (2018). Influencia de la molienda húmeda en el comportamiento estructural y mecánico de productos cerámicos conformados por extrusión de una arcilla del Zulia (Norte de Santander, Colombia). Boletín de la Sociedad Española Cerámica y Vidrio.

- Muñoz, J., Muñoz, R., Mancill, P. & Rodríguez, J. (2012). Estudio del procesamiento cerámico de las arcillas de la vereda “La Codicia” (Guapi, Colombia) para potencializar su uso en la elaboración de piezas cerámicas. *Revista Facultad de Ingeniería*, 68-78.
- NTC 2401. (2004). Arcillas grasas para la industria de la cerámica. Bogotá, Colombia: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).
- NTC 3493. (2017). Ingeniería civil y arquitectura. Cenizas volantes y puzolanas naturales, calcinadas o crudas, utilizadas para el concreto. Bogotá, Colombia : Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).
- NTC 4321-3. (1998). Baldosa Cerámica. Parte 3. Método de ensayo para determinar la absorción de agua, de la porosidad abierta, de la densidad relativa aparente y de la densidad aparente . Bogotá, Colombia : Instituto Colombiano de Normas Tecnicas (ICONTEC).
- NTC 4321-4. (2015). Determinación de la resistencia a la flexión y carga de rotura. Bogotá, Colombia : Instituto Colombiano de Normas Tecnicas (ICONTEC).
- NTC 919. (2015). Baldosas cerámicas. Definiciones, clasificación, características y rotulado . Bogotá, Colombia : Instituto Colombiano de Normas Tecnicas (ICONTEC).
- Pacheco, C., & Severiche, J. (2015). Plan de negocios para la producción comercialización de ladrillos ecológicos - ecoladrillo . Bucaramanga, Colombia : Universidad de Santander UDES.
- Payares, C. (2014). Estudio de la relación entre las propiedades físicas finales de los bloques cerámicos para mampostería y los perfiles de temperatura presentados en el horno durante su cocción en la ladrillera Ocaña. Ocaña, Colombia : Universidad Francisco De Paula Santander

Ocaña.

Peña, G., & Ortega, L. (2014). Caracterización morfológica y estructural de polvos de cenizas volantes. 14-19.

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

Rozo, S., Sánchez, J., & Álvarez, D. (2014). Propiedades físico mecánicas de bloques H10 fabricados en el área metropolitana de Cúcuta. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 24(1), 67-78.

Rozo, S., Sánchez, J., & Gelves, J. (2014). Evaluación de minerales aluminio silicatos de Norte de Santander para fabricar piezas cerámicas de gran formato. *Revista Facultad de Ingeniería*.

Salinas, J., Ñurinda, K. & Ramírez, J. (2014). Comportamiento del índice de plasticidad de una pasta arcillosa madurada naturalmente. *Nexo revista científica*, 74-81 .

Sánchez, J., Corpas, F. A., & Rojas, J. P. (2019). Cenizas Volantes de Termoeléctrica como Materia Prima para la Fabricación de Materiales Cerámicos de Construcción: Efecto de la Temperatura de Cocción sobre el Material. *Información tecnológica*, 285-298.

Sánchez, J., Gelves, J., Álvarez, D., & Ramírez, P. (2013). Caracterización tecnológica y del talento humano de las empresas fabricantes de cerámica roja en el departamento del Huila. *Revista Ingeniería y Región.*, 7-14.

- Sánchez, J., Sarabia, A., & Alvarez, D. (2016). Evaluación de materias primas utilizadas en la fabricación de baldosas de gres en el sector cerámico de norte de Santander (Colombia). *Respuestas*, 48-56.
- Santaella, L. (2001). Caracterización física química y mineralógica de las cenizas volantes. Bogotá, Colombia: Ciencia e Ingeniería Neogranadina.
- Santos, J., Malagón, P., & Córdoba, E. (2011). Caracterización de arcillas y preparación de pastas cerámicas para la fabricación de tejas y ladrillos en la región de Barichara, Santander. *Dyna rev.fac.nac.minas*.
- Sumer, M. (2012). Compressive strength and sulfate resistance properties of concretes containing Class F and. *Construction and Building Materials*, 531–536.
- Uchima, J. (2015). Evaluación de la puzolanicidad de material obtenido en la calcinación simultánea de biomasa y arcilla caolinítica. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Vega, A., & Diaz, Y. (2014). Aprovechamiento de los gases generados por el horno hoffman para mejorar la zona de secado en la ladrillera Ocaña. Ocaña, Colombia : Universidad Francisco de Paula Santander .



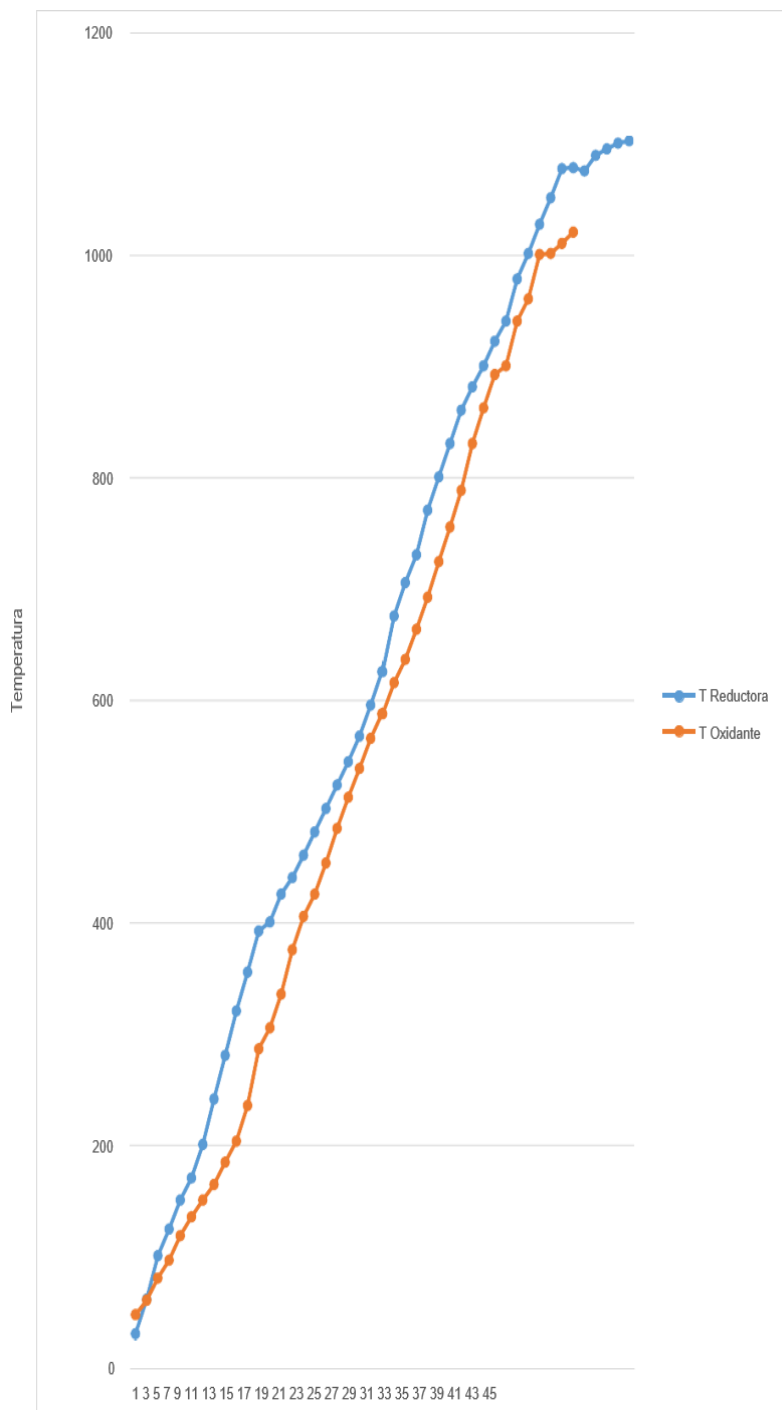
**ANEXOS**

Anexo 1. Distribución normal estándar; los elementos  $P(Z \leq z) = a$ 

$z$	.00	.01	.02	.03	.04	.05	.06	.07	.08	.09
0.00	.5000	.4960	.4920	.4880	.4840	.4801	.4761	.4721	.4681	.4641
0.10	.4602	.4562	.4522	.4483	.4443	.4404	.4364	.4325	.4286	.4247
0.20	.4207	.4168	.4129	.4090	.4052	.4013	.3974	.3936	.3897	.3859
0.30	.3821	.3783	.3745	.3707	.3669	.3632	.3594	.3557	.3520	.3483
0.40	.3446	.3409	.3372	.3336	.3300	.3264	.3228	.3192	.3156	.3121
0.50	.3085	.3050	.3015	.2981	.2946	.2912	.2877	.2843	.2810	.2776
0.60	.2743	.2709	.2676	.2643	.2611	.2578	.2546	.2514	.2483	.2451
0.70	.2420	.2389	.2358	.2327	.2296	.2266	.2236	.2206	.2177	.2148
0.80	.2119	.2090	.2061	.2033	.2005	.1977	.1949	.1922	.1894	.1867
0.90	.1841	.1814	.1788	.1762	.1736	.1711	.1685	.1660	.1635	.1611
1.00	.1587	.1562	.1539	.1515	.1492	.1469	.1446	.1423	.1401	.1379
1.10	.1357	.1335	.1314	.1292	.1271	.1251	.1230	.1210	.1190	.1170
1.20	.1151	.1131	.1112	.1093	.1075	.1056	.1038	.1020	.1003	.0985
1.30	.0968	.0951	.0934	.0918	.0901	.0885	.0869	.0853	.0838	.0823
1.40	.0808	.0793	.0778	.0764	.0749	.0735	.0721	.0708	.0694	.0681
1.50	.0668	.0655	.0643	.0630	.0618	.0606	.0594	.0582	.0571	.0559
1.60	.0548	.0537	.0526	.0516	.0505	.0495	.0485	.0475	.0465	.0455
1.70	.0446	.0436	.0427	.0418	.0409	.0401	.0392	.0384	.0375	.0367
1.80	.0359	.0351	.0344	.0336	.0329	.0322	.0314	.0307	.0301	.0294
1.90	.0287	.0281	.0274	.0268	.0262	.0256	.0250	.0244	.0239	.0233
2.00	.0228	.0222	.0217	.0212	.0207	.0202	.0197	.0192	.0188	.0183
2.10	.0179	.0174	.0170	.0166	.0162	.0158	.0154	.0150	.0146	.0143
2.20	.0139	.0136	.0132	.0129	.0125	.0122	.0119	.0116	.0113	.0110
2.30	.0107	.0104	.0102	.0099	.0096	.0094	.0091	.0089	.0087	.0084
2.40	.0082	.0080	.0078	.0075	.0073	.0071	.0069	.0068	.0066	.0064
2.50	.0062	.0060	.0059	.0057	.0055	.0054	.0052	.0051	.0049	.0048
2.60	.0047	.0045	.0044	.0043	.0041	.0040	.0039	.0038	.0037	.0036
2.70	.0035	.0034	.0033	.0032	.0031	.0030	.0029	.0028	.0027	.0026
2.80	.0026	.0025	.0024	.0023	.0023	.0022	.0021	.0021	.0020	.0019
2.90	.0019	.0018	.0018	.0017	.0016	.0016	.0015	.0015	.0014	.0014
3.00	.0013	.0013	.0013	.0012	.0012	.0011	.0011	.0011	.0010	.0010

## Anexo 2. Curva de cocción

Horas	T Reductora	T Oxidante
1	30	47
2	61	60
3	100	80
4	124	96
5	150	118
6	170	135
7	200	150
8	241	164
9	280	184
10	320	203
11	355	235
12	392	286
13	400	305
14	425	335
15	440	375
16	460	405
17	481	425
18	502	453
19	523	484
20	544	512
21	567	538
22	595	565
23	625	587
24	675	615
25	705	636
26	730	663
27	770	692
28	800	724
29	830	755
30	860	788
31	881	830
32	900	862
33	922	892
34	940	900
35	978	940
36	1001	960
37	1027	1000
38	1051	1001
39	1077	1010
40	1078	1020
41	1075	
42	1089	
43	1095	
44	1100	
45	1102	



### Anexo 3. Aspectos tecnológicos en húmedo y seco

FORMULACIÓN PATRÓN												
ESPECIMEN	CONDICIONES HUMEDAS				CONDICIONES SECAS				HÚMEDA	SECA		
	LARGO	ANCHO	ESPESOR	MASA	LARGO	ANCHO	ESPESOR	MASA	DENSIDAD	CONTRACCIÓN	PERDIDAS DE MASA	DENSIDAD
	cm	cm	cm	g	cm	cm	cm	g	g/cm <sup>3</sup>	%	%	g/cm <sup>3</sup>
1	13,95	8,50	0,85	249,30	12,85	7,80	0,83	206,10	2,473	7,45	17,33	2,492
2	12,95	8,35	0,85	220,70	11,95	7,85	0,85	182,20	2,401	6,92	17,44	2,285
3	12,65	8,35	0,85	227,60	11,80	7,60	0,85	188,10	2,535	6,82	17,36	2,468
4	13,00	8,40	0,80	234,30	12,20	7,60	0,80	193,90	2,682	6,75	17,24	2,614
5	13,55	8,45	0,80	242,40	12,55	7,65	0,80	200,60	2,646	6,71	17,24	2,612
6	13,30	8,45	0,85	236,10	12,35	7,70	0,80	195,20	2,472	6,65	17,32	2,566
7	11,05	8,50	0,85	201,20	10,15	7,85	0,80	166,20	2,520	6,65	17,40	2,607
<b>PROMEDIO</b>									<b>2,5328</b>	<b>6,85</b>	<b>17,33</b>	<b>2,521</b>

FORMULACIÓN 90-10												
ESPECIMENES	CONDICIONES HUMEDAS				CONDICIONES SECAS				HÚMEDA	SECA		
	LARGO	ANCHO	ESPESOR	MASA	LARGO	ANCHO	ESPESOR	MASA	DENSIDAD	CONTRACCIÓN	PERDIDAS DE MASA	DENSIDAD
	cm	cm	cm	g	cm	cm	cm	g	g/cm <sup>3</sup>	%	%	g/cm <sup>3</sup>
1	16,35	8,40	0,80	281,00	15,05	7,85	0,73	225,20	2,558	6,89	19,86	2,629
2	15,55	8,60	0,85	269,80	14,20	7,85	0,80	216,00	2,374	6,75	19,94	2,422
3	17,20	8,30	0,70	296,70	15,85	7,80	0,80	237,10	2,969	6,67	20,09	2,397
4	14,65	8,55	0,70	253,70	13,60	8,05	0,75	203,10	2,893	6,52	19,94	2,474
5	12,45	8,25	0,80	213,80	11,65	7,25	0,80	171,00	2,602	6,30	20,02	2,531
<b>PROMEDIO</b>									<b>2,6791</b>	<b>6,63</b>	<b>19,97</b>	<b>2,491</b>

FORMULACIÓN 80- 20												
ESPECIMEN	CONDICIONES HUMEDAS				CONDICIONES SECAS				HÚMEDA	SECA		
	LARGO	ANCHO	ESPESOR	MASA	LARGO	ANCHO	ESPESOR	MASA	DENSIDAD	CONTRACCIÓN	PERDIDAS DE MASA	DENSIDAD
	cm	cm	cm	g	cm	cm	cm	g	g/cm <sup>3</sup>	%	%	g/cm <sup>3</sup>
1	12,75	8,25	0,85	214,70	11,80	7,55	0,83	172,00	2,401	6,30	19,89	2,340
2	12,60	8,35	0,80	215,10	11,30	7,75	0,85	172,40	2,556	6,24	19,85	2,316
3	13,10	8,40	0,85	225,00	12,20	7,80	0,80	180,30	2,406	6,13	19,87	2,368
4	11,95	8,25	0,90	204,10	10,95	7,70	0,80	163,30	2,300	6,15	19,99	2,421
5	12,70	8,60	0,80	224,80	12,15	7,55	0,80	179,60	2,573	5,89	20,11	2,447
6	13,35	8,40	0,85	227,60	12,30	7,70	0,80	181,70	2,388	5,70	20,17	2,398
7	13,45	8,45	0,80	226,90	12,35	7,60	0,80	181,00	2,496	5,58	20,23	2,411
<b>PROMEDIO</b>									<b>2,4455</b>	<b>5,96</b>	<b>20,01</b>	<b>2,386</b>

FORMULACION 70-30												
ESPECIMEN	CONDICIONES HUMEDAS				CONDICIONES SECAS				HÚMEDA	SECA		
	LARGO	ANCHO	ESPESOR	MASA	LARGO	ANCHO	ESPESOR	MASA	DENSIDAD	CONTRACCIÓN	PERDIDAS DE MASA	DENSIDAD
	cm	cm	cm	g	cm	cm	cm	g	g/cm <sup>3</sup>	%	%	g/cm <sup>3</sup>
1	15,05	8,20	0,83	247,50	13,75	7,65	0,80	190,80	2,431	6,10	22,91	2,267
2	15,80	8,30	0,80	259,50	14,60	7,75	0,85	200,20	2,474	5,93	22,85	2,082
3	16,40	8,35	0,85	269,00	15,00	7,90	0,80	207,70	2,311	5,74	22,79	2,191
4	16,60	8,30	0,85	271,40	15,00	7,85	0,85	209,30	2,317	5,63	22,88	2,091
5	16,25	8,35	0,80	273,00	14,85	7,90	0,85	209,90	2,515	5,38	23,11	2,105
6	16,05	8,40	0,85	266,80	14,65	7,90	0,80	205,20	2,328	5,20	23,09	2,216
7	16,15	8,50	0,80	256,60	14,35	7,75	0,80	197,60	2,337	5,04	22,99	2,221
<b>PROMEDIO</b>									<b>2,3875</b>	<b>5,57</b>	<b>22,95</b>	<b>2,168</b>

FORMULACIÓN 60-40												
ESPECIMEN	CONDICIONES HUMEDAS				CONDICIONES SECAS				HÚMEDA	SECA		
	LARGO	ANCHO	ESPESOR	MASA	LARGO	ANCHO	ESPESOR	MASA	DENSIDAD	CONTRACCIÓN	PERDIDAS DE MASA	DENSIDAD
	cm	cm	cm	g	cm	cm	cm	g	g/cm <sup>3</sup>	%	%	g/cm <sup>3</sup>
1	10,45	8,25	0,80	174,00	9,80	7,95	0,96	134,00	2,523	5,41	22,99	1,792
2	10,85	8,40	0,80	181,30	10,00	7,80	0,95	139,60	2,487	5,22	23,00	1,884
3	10,75	8,50	0,80	179,90	10,00	8,00	1,00	138,40	2,461	5,13	23,07	1,730
4	10,60	8,35	0,80	173,20	9,95	7,85	0,91	133,40	2,446	5,01	22,98	1,887
5	11,00	8,35	0,80	180,40	10,00	7,95	1,00	138,60	2,455	4,80	23,17	1,743
<b>PROMEDIO</b>									<b>2,4743</b>	<b>5,11</b>	<b>23,041</b>	<b>1,807</b>

### Anexo 4. Aspectos y caracterización tecnológica cocidos

FORMULACIÓN PATRON															
ATMÓSFERA OXIDANTE															
TEMP	CONDICIONES SECAS				CONDICIONES COCIDAS						ASPECTOS TECNOLÓGICOS COCIDOS			CARACTERIZACIÓN TECNOLÓGICA	
	LARGO	ANCHO	ESPESOR	MASA	LARGO	ANCHO	ESPESOR	MASA	MASA Aa	CARGA	DENSIDAD	CONTRACCIÓN	PERDIDAS DEMASA	POROSIDAD (Aa)	RESISTENCIA MECÁNICA (Rf)
°C	cm	cm	cm	g	cm	cm	cm	g	g	kgf	g/cm <sup>3</sup>	%	%	%	kgf/cm <sup>2</sup>
950	23,35	7,65	0,91	370,70	23,25	7,69	1,04	352,60	380,9	31,20	1,892	0,43	4,88	8,03	119
	23,15	7,50	0,95	360,40	23,00	7,67	1,04	341,70	377,3	32,60	1,867	0,65	5,19	10,42	124
	23,25	7,65	0,94	365,80	22,60	7,78	1,01	346,40	381,8	27,80	1,951	2,80	5,30	10,22	108
	23,15	7,51	0,92	369,20	23,02	7,68	1,04	352,61	381,8	31,15	1,918	0,56	4,49	8,28	118
	23,35	7,63	0,94	361,10	23,25	7,69	1,02	342,00	379,6	32,66	1,875	0,43	5,29	10,99	130
	23,25	7,65	0,92	366,49	22,58	7,77	1,03	346,00	383,6	27,81	1,915	2,88	5,59	10,87	104
PROMEDIO											1,903	1,291	5,125	9,801	117
1000	23,00	7,80	0,95	355,60	22,55	7,64	0,99	335,90	366,0	35,20	1,969	1,96	5,54	8,96	145
	22,80	7,90	0,97	360,70	22,50	7,70	1,06	342,30	371,3	38,80	1,870	1,32	5,10	8,47	139
	23,10	7,80	1,00	368,40	22,60	7,63	1,02	348,30	378,5	34,70	1,975	2,16	5,46	8,67	134
	23,09	7,81	0,96	355,63	22,60	7,64	1,02	335,81	368,0	35,19	1,907	2,12	5,57	9,59	137
	22,79	7,91	0,97	360,71	22,39	7,64	1,05	342,32	371,3	38,82	1,906	1,76	5,10	8,47	141
	23,02	7,80	0,99	368,30	22,66	7,61	1,01	348,32	378,4	34,70	2,000	1,56	5,42	8,65	139
PROMEDIO											1,938	1,812	5,366	8,800	139
1050	23,00	7,60	0,94	362,00	22,40	7,58	1,05	342,00	366,3	40,70	1,920	2,61	5,52	7,11	149
	22,90	7,75	0,94	366,30	22,35	7,57	1,03	346,50	370,2	29,60	1,995	2,40	5,41	6,84	113
	23,10	7,50	0,89	339,70	22,50	7,45	0,98	321,10	343,4	25,70	1,950	2,60	5,48	6,94	110
	23,09	7,51	0,88	339,55	22,51	7,45	0,99	321,11	345,8	42,69	1,934	2,51	5,43	7,69	180
	22,90	7,75	0,93	366,31	22,34	7,55	1,02	346,51	370,3	42,61	2,014	2,45	5,41	6,87	166
	23,00	7,61	0,94	362,19	22,39	7,59	1,05	342,01	366,5	40,72	1,917	2,65	5,57	7,16	149
PROMEDIO											1,955	2,536	5,469	7,101	144

FORMULACIÓN PATRON															
ATMÓSFERA REDUCTORA															
TEMP	CONDICIONES SECAS				CONDICIONES COCIDAS						ASPECTOS TECNOLÓGICOS COCIDOS			CARACTERIZACIÓN TECNOLÓGICA	
	LARGO	ANCHO	ESPESOR	MASA	LARGO	ANCHO	ESPESOR	MASA	MASA Aa	CARGA	DENSIDAD	CONTRACCIÓN	PERDIDAS DEMASA	POROSIDAD (Aa)	RESISTENCIA MECÁNICA (Rf)
°C	cm	cm	cm	g	cm	cm	cm	g	g	kgf	g/cm <sup>3</sup>	%	%	%	kgf/cm <sup>2</sup>
975	23,15	7,65	0,94	358,00	22,80	7,64	1,03	338,10	369,3	29,20	1,895	1,51	5,56	9,23	114
	23,20	7,65	0,94	363,70	22,80	7,64	1,05	343,30	371,8	23,30	1,878	1,72	5,61	8,30	86
	23,45	7,60	0,94	369,20	23,25	7,66	1,02	349,40	380,2	24,70	1,934	0,85	5,36	8,82	100
	23,39	7,60	0,95	368,02	23,24	7,66	1,02	349,41	380,1	24,60	1,924	0,64	5,06	8,78	98
	23,21	7,64	0,94	362,55	22,81	7,70	1,04	343,30	371,9	23,30	1,879	1,72	5,31	8,33	87
	23,20	7,66	0,94	358,00	22,80	7,64	1,02	338,09	369,3	29,19	1,903	1,72	5,56	9,23	115
<b>PROMEDIO</b>											<b>1,902</b>	<b>1,363</b>	<b>5,410</b>	<b>8,782</b>	<b>100</b>
1025	23,00	7,85	0,96	342,90	22,20	7,47	1,04	328,00	338,2	33,30	1,903	3,48	4,35	3,11	125
	23,15	7,60	0,96	343,60	22,30	7,53	1,03	328,10	349,5	36,10	1,903	3,67	4,51	6,52	138
	23,50	7,70	0,96	359,20	22,65	7,53	1,01	332,30	356,3	33,10	1,930	3,62	7,49	7,22	134
	23,49	7,69	0,96	350,80	22,64	7,53	1,02	327,20	342,3	33,09	1,882	3,61	6,73	4,61	131
	23,13	7,60	0,97	353,90	22,29	7,54	1,02	333,10	341,9	36,08	1,943	3,63	5,88	2,64	140
	23,00	7,84	0,97	341,90	22,19	7,48	1,03	328,01	340,3	33,29	1,913	3,52	4,06	3,75	126
<b>PROMEDIO</b>											<b>1,912</b>	<b>3,589</b>	<b>5,502</b>	<b>4,643</b>	<b>132</b>
1100	23,15	7,55	0,94	360,80	23,05	7,69	1,05	341,50	377,3	32,60	1,831	0,43	5,35	10,48	121
	23,10	7,60	0,86	334,10	23,15	7,75	0,98	316,30	350,8	22,30	1,804	-0,22	5,33	10,91	96
	23,08	7,54	0,93	352,77	23,03	7,69	0,98	341,49	351,9	32,90	1,968	0,22	3,20	3,05	141
	23,09	7,55	0,87	332,10	23,10	7,70	0,99	316,31	348,9	24,00	1,796	-0,04	4,75	10,30	101
	23,16	7,58	0,87	322,02	23,15	7,64	0,99	311,51	356,6	26,30	1,779	0,04	3,26	14,47	111
	23,10	7,60	0,93	352,00	23,05	7,61	1,05	316,32	348,7	21,20	1,722	0,22	10,14	10,24	80
<b>PROMEDIO</b>											<b>1,817</b>	<b>0,108</b>	<b>5,338</b>	<b>9,909</b>	<b>108</b>



FORMULACIÓN 90-10															
ATMÓSFERA OXIDANTE															
TEMP	CONDICIONES SECAS				CONDICIONES COCIDAS						ASPECTOS TECNOLÓGICOS COCIDOS			CARACTERIZACIÓN TECNOLÓGICA	
	LARGO	ANCHO	ESPESOR	MASA	LARGO	ANCHO	ESPESOR	MASA	MASA Aa	CARGA	DENSIDAD	CONTRACCIÓN	PERDIDAS DEMASA	POROSIDAD (Aa)	RESISTENCIA MECÁNICA (Rf)
°C	cm	cm	cm	g	cm	cm	cm	g	g	kgf	g/cm <sup>3</sup>	%	%	%	kgf/cm <sup>2</sup>
950	22,95	7,70	0,88	328,80	22,90	7,65	0,96	309,00	342	29,60	1,833	0,22	6,02	10,68	131
	23,00	7,75	0,87	326,60	22,90	7,74	0,93	307,30	339,8	29,50	1,864	0,43	5,91	10,58	138
	22,80	7,60	0,91	332,40	22,65	7,72	0,94	312,60	346,5	26,60	1,912	0,66	5,96	10,84	122
	23,96	7,72	0,89	328,82	22,90	7,64	0,96	309,00	343,53	26,60	1,840	4,42	6,03	11,17	118
	23,44	7,75	0,86	326,62	22,91	7,73	0,92	307,32	338,90	29,51	1,882	2,26	5,91	10,28	141
	22,81	7,78	0,90	332,39	22,66	7,69	0,95	312,61	345,9	29,61	1,888	0,66	5,95	10,65	132
PROMEDIO											1,870	1,442	5,963	10,700	130
1000	23,10	7,55	0,98	347,90	22,60	7,50	1,03	326,70	355,5	29,20	1,871	2,16	6,09	8,82	113
	23,05	7,60	0,91	335,10	22,70	7,64	0,95	314,40	342	32,40	1,920	1,52	6,18	8,78	148
	22,60	7,70	0,91	348,20	22,35	7,64	1,02	326,60	355,8	42,00	1,884	1,11	6,20	8,94	163
	23,63	7,54	0,97	347,66	22,61	7,51	1,02	326,71	355,30	30,80	1,886	4,32	6,03	8,75	122
	22,80	7,61	0,91	335,00	22,72	7,42	0,96	314,39	354,90	37,95	1,943	0,35	6,15	12,89	173
	22,85	7,70	0,92	348,12	22,32	7,75	1,02	326,20	342,19	33,40	1,849	2,32	6,30	4,90	126
PROMEDIO											1,892	1,962	6,158	8,845	141
1050	22,85	7,60	0,87	324,90	22,25	7,54	0,92	304,20	328,1	30,90	1,978	2,63	6,37	7,86	148
	22,85	7,40	0,89	322,60	22,25	7,45	0,92	302,50	326,2	32,60	1,996	2,63	6,23	7,83	159
	22,86	7,55	0,87	323,90	22,27	7,48	0,93	304,50	328,3	28,90	1,966	2,58	5,99	7,82	136
	22,90	7,50	0,84	323,69	22,28	7,55	0,91	302,60	326,7	31,60	1,977	2,71	6,52	7,96	154
	22,85	7,66	0,89	324,60	22,25	7,38	0,92	302,70	326,3	32,60	2,015	2,63	6,75	7,80	160
	22,83	7,40	0,86	322,70	22,24	7,48	0,92	303,50	327,2	31,60	1,994	2,58	5,95	7,81	153
PROMEDIO											1,987	2,626	6,301	7,846	152

FORMULACIÓN 90-10															
ATMÓSFERA REDUCTORA															
TEMP	CONDICIONES SECAS				CONDICIONES COCIDAS						ASPECTOS TECNOLÓGICOS COCIDOS			CARACTERIZACIÓN TECNOLÓGICA	
	LARGO	ANCHO	ESPESOR	MASA	LARGO	ANCHO	ESPESOR	MASA	MASA Aa	CARGA	DENSIDAD	CONTRACCIÓN	PERDIDAS DE MASA	POROSIDAD (Aa)	RESISTENCIA MECÁNICA (Rf)
°C	cm	cm	cm	g	cm	cm	cm	g	g	kgf	g/cm <sup>3</sup>	%	%	%	kgf/cm <sup>2</sup>
975	23,25	7,50	0,93	345,50	22,30	7,51	1,02	323,50	350,3	40,80	1,903	4,09	6,37	8,28	161
	22,85	7,55	0,95	350,90	22,60	7,61	1,01	329,00	357,1	34,00	1,891	1,09	6,24	8,54	135
	23,20	7,59	0,95	345,80	22,30	7,53	1,02	323,70	353,2	39,00	1,890	3,86	6,39	9,11	152
	22,91	7,54	0,97	348,59	22,70	7,55	1,02	329,80	357,9	37,30	1,887	0,92	5,39	8,52	147
	23,59	7,55	0,93	349,40	22,40	7,88	1,01	327,00	353,4	37,20	1,830	5,04	6,41	8,07	141
	22,22	7,58	0,98	348,90	22,10	7,20	1,03	324,40	353,9	39,40	1,979	0,54	7,02	9,09	156
PROMEDIO											1,897	2,590	6,304	8,604	148
1025	23,00	7,70	0,92	348,40	22,20	7,40	0,97	325,60	346,0	45,90	2,038	3,48	6,54	6,27	199
	23,00	7,85	0,92	349,80	22,00	7,46	0,99	327,40	344,2	49,00	2,025	4,35	6,40	5,13	203
	23,05	7,60	0,81	335,30	22,25	7,43	0,94	310,30	328,3	35,80	1,992	3,47	7,46	5,80	165
	22,99	7,68	0,90	345,30	22,23	7,49	0,95	326,50	343,9	43,70	2,064	3,31	5,44	5,33	196
	22,96	7,80	0,83	345,80	22,26	7,46	0,96	318,70	335,8	42,90	1,999	3,04	7,84	5,37	190
	23,40	7,60	0,81	341,90	22,24	7,42	0,98	322,20	346,8	42,50	1,992	4,96	5,76	7,64	181
PROMEDIO											2,018	3,766	6,575	5,921	189
1100	22,50	7,65	0,99	347,50	22,35	7,72	1,05	323,30	360,7	32,50	1,781	0,67	6,96	11,57	116
	22,75	7,50	0,85	315,90	22,45	7,67	0,93	296,60	328,9	26,40	1,848	1,32	6,11	10,89	122
	22,90	7,55	0,92	343,60	22,80	7,66	1,01	323,30	358,8	30,30	1,829	0,44	5,91	10,98	120
	23,00	7,85	0,92	350,80	22,80	7,72	0,94	309,90	343,1	28,00	1,884	0,87	11,66	10,71	130
	23,21	7,75	0,94	357,61	22,26	7,97	1,05	323,98	381,5	32,90	1,739	4,09	9,40	17,75	114
	23,20	7,23	0,91	349,00	22,38	7,95	1,04	357,80	373,3	32,90	1,934	3,53	-2,52	4,32	117
PROMEDIO											1,836	1,820	6,254	11,038	120

FORMULACIÓN 80-20															
ATMÓSFERA OXIDANTE															
TEMP	CONDICIONES SECAS				CONDICIONES COCIDAS						ASPECTOS TECNOLÓGICOS COCIDOS			CARACTERIZACIÓN TECNOLÓGICA	
	LARGO	ANCHO	ESPESOR	MASA	LARGO	ANCHO	ESPESOR	MASA	MASA Aa	CARGA	DENSIDAD	CONTRACCIÓN	PERDIDAS DE MASA	POROSIDAD (Aa)	RESISTENCIA MECÁNICA (Rf)
°C	cm	cm	cm	g	cm	cm	cm	g	g	kgf	g/cm <sup>3</sup>	%	%	%	kgf/cm <sup>2</sup>
950	23,30	7,80	0,93	339,00	22,60	7,65	1,07	317,70	358,8	18,70	1,713	3,00	6,28	12,94	66
	22,80	7,75	0,94	336,40	22,40	7,68	1,08	313,60	356,7	22,70	1,688	1,75	6,78	13,74	78
	23,30	7,76	0,94	337,50	22,60	7,66	1,09	315,40	357,7	22,60	1,671	3,00	6,55	13,41	77
	23,50	7,75	0,93	336,82	22,06	7,67	1,08	316,80	357,8	23,70	1,734	6,13	5,94	12,94	80
	22,93	7,77	0,95	338,90	23,05	7,68	1,07	318,40	356,8	22,80	1,681	-0,52	6,05	12,06	82
	22,30	7,80	0,94	337,90	22,23	7,68	1,07	313,70	355,8	22,60	1,717	0,31	7,16	13,42	78
PROMEDIO											1,701	2,280	6,461	13,085	77
1000	23,00	7,55	1,16	336,50	22,45	7,49	1,07	313,40	347,9	25,20	1,746	2,39	6,86	11,01	91
	23,00	7,75	0,93	334,10	22,46	7,66	1,07	315,70	353,0	24,70	1,716	2,35	5,51	11,82	86
	23,00	7,76	0,97	335,30	22,60	7,50	1,08	314,80	352,4	25,50	1,720	1,74	6,11	11,94	90
	23,60	7,74	0,99	336,10	22,80	7,55	1,09	316,40	351,1	26,80	1,686	3,39	5,86	10,97	93
	23,58	7,76	1,10	335,48	22,80	7,59	1,03	315,80	351,9	24,30	1,772	3,31	5,87	11,43	94
	23,00	7,75	0,93	334,70	22,70	7,66	1,04	317,30	353,2	24,70	1,756	1,30	5,20	11,31	93
PROMEDIO											1,733	2,413	5,902	11,412	91
1050	23,40	7,60	0,94	341,60	22,30	7,51	1,06	311,10	344,1	30,60	1,754	4,70	8,93	10,61	110
	23,00	7,75	0,92	334,10	22,70	7,49	1,02	318,70	350,3	30,90	1,848	1,30	4,61	9,92	124
	23,50	7,50	0,93	333,20	22,15	7,46	1,05	311,70	342,2	31,10	1,790	5,74	6,45	9,79	113
	23,55	7,50	0,94	335,00	22,45	7,48	1,06	315,80	346,5	31,60	1,774	4,67	5,73	9,71	115
	22,58	7,50	0,91	338,00	22,55	7,46	1,02	317,50	349,4	30,70	1,850	0,13	6,07	10,05	122
	22,32	7,50	0,97	339,00	22,15	7,56	1,05	311,60	343,9	32,10	1,765	0,77	8,08	10,37	116
PROMEDIO											1,797	2,888	6,645	10,071	117

FORMULACIÓN 80-20															
ATMÓSFERA REDUCTORA															
TEMP	CONDICIONES SECAS				CONDICIONES COCIDAS						ASPECTOS TECNOLÓGICOS COCIDOS			CARACTERIZACIÓN TECNOLÓGICA	
	LARGO	ANCHO	ESPESOR	MASA	LARGO	ANCHO	ESPESOR	MASA	MASA Aa	CARGA	DENSIDAD	CONTRACCIÓN	PERDIDAS DEMASA	POROSIDAD (Aa)	RESISTENCIA MECÁNICA (Rf)
°C	cm	cm	cm	g	cm	cm	cm	g	g	kgf	g/cm <sup>3</sup>	%	%	%	kgf/cm <sup>2</sup>
975	23,00	7,80	0,92	331,60	22,40	7,52	1,03	315,80	350,7	25,80	1,825	2,61	4,76	11,05	99
	23,20	7,80	0,92	332,23	22,60	7,50	1,03	309,20	345,0	30,50	1,767	2,59	6,93	11,58	118
	23,80	7,75	0,93	332,30	23,20	7,30	1,05	310,30	340,1	30,70	1,745	2,52	6,62	9,60	121
	23,43	7,70	0,91	332,30	23,00	7,50	1,08	312,40	340,2	30,60	1,677	1,84	5,99	8,90	110
	22,80	7,55	0,92	332,10	22,40	7,20	1,09	311,80	346,2	28,50	1,774	1,75	6,11	11,03	102
	23,00	7,80	0,94	332,20	22,60	7,30	1,03	308,30	347,3	28,80	1,810	1,74	7,19	12,65	114
<b>PROMEDIO</b>											<b>1,766</b>	<b>2,174</b>	<b>6,269</b>	<b>10,802</b>	<b>111</b>
1025	23,00	7,85	0,96	335,30	22,50	7,60	1,06	313,80	342,9	33,10	1,735	2,17	6,41	9,27	120
	23,40	7,85	0,96	336,30	23,00	7,52	1,02	312,70	342,9	33,40	1,769	1,71	7,02	9,66	134
	23,50	7,75	0,97	335,50	22,48	7,54	1,06	313,80	343,9	32,60	1,747	4,34	6,47	9,59	118
	23,40	7,92	0,99	336,30	23,00	7,39	1,09	316,90	343,6	33,42	1,711	1,71	5,77	8,43	120
	23,60	7,88	0,97	336,23	23,55	7,50	1,05	317,50	342,8	32,20	1,712	0,21	5,57	7,97	126
	23,76	7,77	0,96	336,20	22,54	7,48	1,03	312,30	342,7	34,60	1,798	5,11	7,11	9,73	134
<b>PROMEDIO</b>											<b>1,745</b>	<b>2,543</b>	<b>6,391</b>	<b>9,109</b>	<b>125</b>
1100	23,10	7,50	0,93	335,80	22,85	7,80	1,10	327,60	359,5	28,40	1,675	1,08	2,44	9,74	95
	23,20	7,60	0,97	335,90	22,10	7,79	1,08	317,30	360,4	20,90	1,708	4,74	5,54	13,58	69
	22,81	7,55	0,95	336,23	22,75	7,80	1,04	311,80	356,5	25,20	1,698	0,28	7,27	14,34	94
	22,80	7,53	0,98	335,66	22,20	7,80	1,06	322,20	357,3	27,30	1,755	2,63	4,01	10,89	94
	23,09	7,52	0,93	335,72	22,40	7,82	1,10	326,10	358,4	24,10	1,692	2,99	2,87	9,89	78
	22,90	7,58	0,92	336,33	22,70	7,79	1,04	315,20	356,4	25,40	1,722	0,87	6,28	13,08	95
<b>PROMEDIO</b>											<b>1,708</b>	<b>2,099</b>	<b>4,734</b>	<b>11,921</b>	<b>87</b>

FORMULACIÓN 70-30															
ATMÓSFERA OXIDANTE															
TEMP	CONDICIONES SECAS				CONDICIONES COCIDAS						ASPECTOS TECNOLOGICOS COCIDOS			CARACTERIZACIÓN TECNOLÓGICA	
	LARGO	ANCHO	ESPESOR	MASA	LARGO	ANCHO	ESPESOR	MASA	MASA Aa	CARGA	DENSIDAD	CONTRACCIÓN	PERDIDAS DE MASA	POROSIDAD (Aa)	RESISTENCIA MECÁNICA (Rf)
°C	cm	cm	cm	g	cm	cm	cm	g	g	kgf	g/cm <sup>3</sup>	%	%	%	kgf/cm <sup>2</sup>
950	23,00	7,75	0,93	325,50	23,00	7,75	1,05	307,30	363,8	26,70	1,642	0,00	5,59	18,39	98
	23,03	7,60	0,98	316,80	22,85	7,59	1,06	298,60	351,5	17,10	1,620	0,76	5,74	17,72	62
	23,30	7,95	0,97	312,20	22,60	7,78	1,06	297,10	350,3	21,90	1,598	3,00	4,84	17,91	78
	23,40	7,95	0,97	320,80	22,60	7,78	1,06	297,10	349,65	21,90	1,598	3,42	7,39	17,69	78
	23,50	7,95	0,97	324,80	22,60	7,76	1,06	297,10	350,3	21,90	1,602	3,82	8,53	17,91	78
	23,25	7,95	0,97	327,63	22,60	7,79	1,06	297,10	350,1	21,90	1,596	2,80	9,32	17,84	78
PROMEDIO											1,609	2,300	6,901	17,907	79
1000	22,71	7,65	0,94	326,14	22,00	7,75	1,07	296,10	346,2	24,00	1,623	3,11	9,21	16,92	81
	23,00	7,65	0,96	324,30	22,10	7,85	1,07	303,10	353,3	26,90	1,629	3,91	6,54	16,56	90
	22,70	7,95	0,97	329,50	22,20	7,83	1,05	305,50	354,4	24,20	1,674	2,20	7,28	16,01	85
	22,60	7,95	0,97	330,50	22,25	7,78	1,06	306,50	355,6	25,20	1,670	1,55	7,26	16,01	88
	22,60	7,95	0,97	329,50	22,20	7,80	1,07	305,50	354,8	27,20	1,649	1,77	7,28	16,14	92
	22,60	7,95	0,97	329,50	22,10	7,77	1,09	305,50	354,9	28,20	1,640	2,21	7,28	16,17	93
PROMEDIO											1,647	2,460	7,477	16,300	88
1050	23,20	7,85	0,97	326,30	22,65	7,70	1,10	302,70	344,9	27,00	1,574	2,37	7,23	13,94	89
	23,33	7,85	0,97	325,30	22,60	7,73	1,04	301,30	346,2	28,60	1,662	3,13	7,38	14,90	106
	23,30	7,85	0,97	325,30	22,60	7,56	1,04	301,30	346,4	27,80	1,700	3,00	7,38	14,97	106
	23,40	7,85	0,97	326,28	22,70	7,66	1,05	301,30	346,3	30,60	1,650	2,99	7,66	14,94	113
	23,55	7,85	0,97	325,30	22,50	7,58	1,04	301,30	345,8	28,60	1,703	4,46	7,38	14,76	108
	23,20	7,85	0,97	326,30	22,60	7,69	1,06	301,30	349,2	29,60	1,636	2,59	7,66	15,90	106
PROMEDIO											1,654	3,090	7,447	14,900	105

FORMULACIÓN 70-30															
ATMÓSFERA REDUCTORA															
TEMP	CONDICIONES SECAS				CONDICIONES COCIDAS						ASPECTOS TECNOLÓGICOS COCIDOS			CARACTERIZACIÓN TECNOLÓGICA	
	LARGO	ANCHO	ESPESOR	MASA	LARGO	ANCHO	ESPESOR	MASA	MASA Aa	CARGA	DENSIDAD	CONTRACCIÓN	PERDIDAS DE MASA	POROSIDAD (Aa)	RESISTENCIA MECÁNICA (Rf)
°C	cm	cm	cm	g	cm	cm	cm	g	g	kgf	g/cm <sup>3</sup>	%	%	%	kgf/cm <sup>2</sup>
975	23,10	7,65	0,93	325,80	22,57	7,64	1,02	299,40	346,2	24,70	1,703	2,29	8,10	15,63	96
	23,10	7,85	0,93	325,90	22,48	7,64	1,09	294,60	347,5	26,90	1,574	2,68	9,60	17,96	91
	23,02	7,80	0,93	324,30	22,65	7,85	1,07	305,80	355,5	26,30	1,603	1,62	5,70	16,25	90
	22,80	7,80	0,93	322,60	22,55	7,85	1,07	305,80	357,5	27,30	1,611	1,10	5,21	16,91	93
	23,00	7,80	0,93	322,64	22,43	7,85	1,07	305,80	354,7	28,30	1,619	2,48	5,22	15,99	96
	23,00	7,80	0,93	325,30	22,26	7,85	1,07	305,80	357,5	27,30	1,631	3,22	5,99	16,91	92
<b>PROMEDIO</b>											<b>1,624</b>	<b>2,232</b>	<b>6,639</b>	<b>16,607</b>	<b>93</b>
1025	23,15	7,60	0,97	320,10	22,55	7,54	1,05	297,10	339,5	24,70	1,660	2,59	7,19	14,27	91
	23,10	7,70	0,92	322,40	22,40	7,54	1,07	301,80	345,3	24,60	1,679	3,03	6,39	14,41	88
	23,30	7,90	0,94	328,20	22,50	7,55	1,04	303,20	345,9	29,20	1,712	3,43	7,62	14,08	109
	23,40	7,90	0,94	325,00	22,60	7,55	1,04	303,20	346,5	29,20	1,705	3,42	6,71	14,27	110
	23,42	7,90	0,94	322,30	22,90	7,55	1,04	303,20	345,9	29,20	1,682	2,22	5,93	14,08	112
	23,40	7,90	0,94	325,00	22,58	7,55	1,04	303,20	345,9	29,20	1,706	3,50	6,71	14,08	110
<b>PROMEDIO</b>											<b>1,691</b>	<b>3,033</b>	<b>6,756</b>	<b>14,200</b>	<b>103</b>
1100	23,30	7,60	0,96	320,40	22,80	7,97	1,09	295,90	351,4	28,20	1,501	2,15	7,65	18,76	94
	23,40	7,65	0,96	321,06	22,60	7,85	1,05	301,60	356,1	23,50	1,615	3,42	6,06	18,08	84
	23,50	7,80	0,95	323,40	22,80	7,87	1,09	305,20	360,7	22,60	1,561	2,98	5,63	18,18	75
	23,30	7,80	0,95	324,70	22,80	7,89	1,08	305,20	358,7	25,60	1,571	2,15	6,01	17,53	87
	23,60	7,80	0,95	323,40	22,90	7,87	1,05	305,20	359,7	24,60	1,615	2,97	5,63	17,86	89
	23,27	7,80	0,95	324,40	22,95	7,95	1,06	305,20	358,9	23,60	1,578	1,37	5,92	17,60	83
<b>PROMEDIO</b>											<b>1,574</b>	<b>2,504</b>	<b>6,148</b>	<b>18,000</b>	<b>85</b>

MUESTRA 60-40															
ATMÓSFERA OXIDANTE															
TEMP	CONDICIONES SECAS				CONDICIONES COCIDAS						ASPECTOS TECNOLOGICOS COCIDOS			CARACTERIZACIÓN TECNOLÓGICA	
	LARGO	ANCHO	ESPESOR	MASA	LARGO	ANCHO	ESPESOR	MASA	MASA Aa	CARGA	DENSIDAD	CONTRACCIÓN	PERDIDAS DE MASA	POROSIDAD (Aa)	RESISTENCIA MECÁNICA (Rf)
°C	cm	cm	cm	g	cm	cm	cm	g	g	kgf	g/cm <sup>3</sup>	%	%	%	kgf/cm <sup>2</sup>
950	23,20	7,95	1,09	314,40	22,60	7,92	1,07	291,70	352,7	20,70	1,520	2,59	7,22	20,91	70
	23,30	7,90	1,07	313,70	22,90	7,81	1,06	289,50	352,6	20,70	1,523	1,72	7,71	21,80	74
	23,35	7,90	1,07	315,40	22,60	7,90	1,06	290,50	351,9	19,70	1,531	3,22	7,89	21,13	68
	23,30	7,90	1,07	314,20	22,70	7,96	1,07	284,90	350,4	19,70	1,474	2,58	9,33	22,99	67
	23,30	7,90	1,07	313,68	22,90	7,98	1,06	289,80	349,3	20,70	1,493	1,72	7,61	20,53	72
	23,20	7,90	1,07	314,66	22,60	7,81	1,06	299,90	352,2	19,70	1,599	2,59	4,69	17,44	69
<b>PROMEDIO</b>											<b>1,523</b>	<b>2,400</b>	<b>7,410</b>	<b>20,800</b>	<b>70</b>
1000	23,20	7,90	1,08	314,80	22,60	7,75	1,09	291,80	347,3	25,20	1,529	2,59	7,31	19,02	85
	23,20	7,90	1,08	314,30	22,60	7,75	1,09	291,80	349,3	25,20	1,529	2,59	7,16	19,71	85
	23,30	7,90	1,08	314,80	22,70	7,75	1,09	298,90	348,3	25,20	1,560	2,58	5,05	16,53	85
	23,40	7,90	1,08	314,60	22,60	7,75	1,10	291,70	349,4	25,20	1,515	3,42	7,28	19,78	83
	23,21	7,90	1,08	316,40	22,80	7,61	1,09	285,80	347,6	25,20	1,517	1,77	9,67	21,62	88
	23,30	7,90	1,08	314,90	22,70	7,75	1,09	291,70	349,3	25,20	1,522	2,58	7,37	19,75	85
<b>PROMEDIO</b>											<b>1,529</b>	<b>2,586</b>	<b>7,306</b>	<b>19,400</b>	<b>85</b>
1050	22,75	7,85	1,08	310,10	22,25	7,78	1,05	287,80	339,3	25,10	1,588	2,20	7,19	17,89	89
	22,79	7,85	1,08	309,00	22,25	7,78	1,05	287,80	339,2	25,10	1,588	2,38	6,86	17,86	89
	22,90	7,85	1,08	311,10	22,26	7,79	1,05	287,70	340,0	26,00	1,584	2,79	7,52	18,18	92
	23,20	7,85	1,08	308,22	22,27	7,78	1,05	287,80	339,0	25,10	1,587	4,01	6,63	17,79	89
	22,85	7,85	1,08	312,10	22,25	7,77	1,05	287,90	339,2	24,20	1,590	2,63	7,75	17,82	86
	23,30	7,85	1,08	310,10	22,23	7,78	1,05	287,80	339,2	25,10	1,590	4,59	7,19	17,86	89
<b>PROMEDIO</b>											<b>1,588</b>	<b>3,100</b>	<b>7,191</b>	<b>17,900</b>	<b>89</b>

MUESTRA 60-40															
ATMÓSFERA REDUCTORA															
TEMP	CONDICIONES SECAS				CONDICIONES COCIDAS						ASPECTOS TECNOLÓGICOS COCIDOS			CARACTERIZACIÓN TECNOLÓGICA	
	LARGO	ANCHO	ESPESOR	MASA	LARGO	ANCHO	ESPESOR	MASA	MASA Aa	CARGA	DENSIDAD	CONTRACCIÓN	PERDIDAS DE MASA	POROSIDAD (Aa)	RESISTENCIA MECÁNICA (Rf)
°C	cm	cm	cm	g	cm	cm	cm	g	g	kgf	g/cm <sup>3</sup>	%	%	%	kgf/cm <sup>2</sup>
975	23,00	8,00	1,08	316,90	22,50	7,79	1,10	292,20	349,8	23,20	1,512	2,17	7,79	19,71	75
	23,11	8,00	1,08	316,72	22,50	7,79	1,10	293,10	349,8	22,90	1,517	2,64	7,46	19,34	74
	23,20	8,00	1,08	316,80	22,60	7,79	1,10	292,20	336,7	23,20	1,509	2,59	7,77	15,23	76
	23,00	8,00	1,08	315,90	22,50	7,80	1,09	294,10	349,8	23,30	1,537	2,17	6,90	18,94	77
	23,10	8,00	1,08	316,90	22,80	7,79	1,10	293,20	336,8	22,20	1,497	1,30	7,48	14,87	73
	23,00	8,00	1,08	316,90	22,50	7,72	1,10	293,20	349,8	23,11	1,531	2,17	7,48	19,30	76
PROMEDIO											1,517	2,174	7,479	17,900	75
1025	21,20	7,95	1,09	317,60	21,10	7,72	1,05	293,70	352,5	32,70	1,713	0,47	7,53	20,02	110
	21,30	8,00	1,08	316,50	21,20	7,78	1,22	292,60	351,2	32,90	1,454	0,47	7,55	20,03	82
	21,37	8,00	1,08	317,50	21,20	7,70	1,21	293,70	349,3	31,80	1,487	0,78	7,50	18,93	81
	22,30	8,00	1,08	317,50	21,30	7,66	1,24	292,80	351,3	33,90	1,447	4,48	7,78	19,98	83
	21,50	8,00	1,08	316,50	21,20	7,80	1,21	293,70	350,7	29,50	1,468	1,40	7,20	19,39	74
	22,10	8,00	1,08	316,70	20,32	7,66	1,25	292,70	350,8	30,20	1,504	8,05	7,58	19,85	69
PROMEDIO											1,512	2,609	7,522	19,700	83
1100	21,60	7,75	1,08	276,40	21,57	7,77	1,09	257,10	312,8	21,00	1,408	0,14	6,98	21,66	67
	21,62	7,75	1,08	267,40	20,57	7,70	1,09	257,10	310,5	21,00	1,489	4,87	3,85	20,77	64
	21,66	7,75	1,08	294,32	21,57	7,80	1,13	267,20	302,8	20,00	1,405	0,42	9,21	13,32	59
	20,20	7,75	1,08	289,40	19,10	7,77	1,09	267,20	322,3	20,00	1,653	5,45	7,67	20,62	56
	20,10	7,75	1,08	299,40	19,57	7,60	1,09	277,20	312,9	21,00	1,710	2,64	7,41	12,86	61
	22,10	7,75	1,08	289,40	21,57	7,77	1,09	267,10	310,8	23,00	1,463	2,40	7,71	16,36	73
PROMEDIO											1,521	2,650	7,140	17,600	63



**Anexo 5. Propiedad estructural evaluada según la NTC 919**

<b>PROPIEDAD ESTRUCTURAL ( NTC 919)</b>			
<b>GI</b>	<b>GIIA</b>	<b>GII B</b>	<b>GIII</b>
<b>0% - 3%</b>	<b>3.1% - 6,0%</b>	<b>6,01% - 10%</b>	<b>&gt;10,1%</b>

<b>ATMOSFERA OXIDANTE.</b>		<b>P100</b>		<b>P90-10</b>		<b>P80-20</b>		<b>P70-30</b>		<b>P60-40</b>	
<b>TEMPERATURA.</b>	<b>POROSIDAD.</b>	<b>GRUPO.</b>	<b>POROSIDAD.</b>	<b>GRUPO.</b>	<b>POROSIDAD.</b>	<b>GRUPO.</b>	<b>POROSIDAD.</b>	<b>GRUPO.</b>	<b>POROSIDAD.</b>	<b>GRUPO.</b>	
<b>950 °C</b>	9,8%	GII B	10,6%	GIII	13%	GIII	17,9	GIII	20,8%	GIII	
<b>1000 °C</b>	8,9%	GII B	8,9%	GII B	11,4%	GIII	16,3	GIII	19,4%	GIII	
<b>1050 °C</b>	7,1%	GII B	7,8%	GII B	10,2%	GIII	14,9	GIII	17,9%	GIII	

<b>ATMOSFERA REDUCTORA.</b>		<b>P100</b>		<b>P90-10</b>		<b>P80-20</b>		<b>P70-30</b>		<b>P60-40</b>	
<b>TEMPERATURA.</b>	<b>POROSIDAD.</b>	<b>GRUPO.</b>	<b>POROSIDAD.</b>	<b>GRUPO.</b>	<b>POROSIDAD.</b>	<b>GRUPO.</b>	<b>POROSIDAD.</b>	<b>GRUPO.</b>	<b>POROSIDAD.</b>	<b>GRUPO.</b>	
<b>975 °C</b>	8,6%	GII B	8,6%	GII B	10,8%	GIII	16,6%	GIII	17,9%	GIII	
<b>1025 °C</b>	4,6%	GII A	5,9%	GII A	9,1%	GII B	14,2%	GIII	19,7%	GIII	
<b>1100 °C</b>	9,9%	GII B	11%	GIII	11,9%	GIII	18%	GIII	17,6%	GIII	

**Anexo 6. Propiedad Mecánica evaluada según la NTC 919**

<b>PROPIEDAD MECÁNICA (NTC 919)</b>			
<b>GI</b>	<b>GIIA-1</b>	<b>GIIB-1</b>	<b>GIII</b>
<b>23,0</b>	<b>20,0</b>	<b>17,5</b>	<b>8,0</b>

<b>ATMOSFERA OXIDANTE.</b>	<b>P100</b>		<b>P90-10</b>		<b>P80-20</b>		<b>P70-30</b>		<b>P60-40</b>	
<b>TEMPERATURA</b>	<b>RESISTENCI A A LA FLEXIÓN.</b>	<b>GRUPO</b>	<b>RESISTENCI A A LA FLEXIÓN.</b>	<b>GRUPO</b>	<b>RESISTENCI A A LA FLEXIÓN.</b>	<b>GRUPO</b>	<b>RESISTENCI A A LA FLEXIÓN.</b>	<b>GRUPO</b>	<b>RESISTENCI A A LA FLEXIÓN.</b>	<b>GRUPO</b>
<b>950 °C</b>	11,48	GIIB-1	12,75	GIIB-1	7,6	GIII	7,7	GIII	6,9	GIII
<b>1000 °C</b>	13,63	GIIB-1	13,83	GIIB-1	8,9	GIIB-1	8,6	GIIB-1	8,3	GIIB-1
<b>1050 °C</b>	14,13	GIIB-1	14,91	GIIB-1	11,47	GIIB-1	10,3	GIIB-1	8,7	GIIB-1

<b>ATMOSFERA REDUCTORA.</b>	<b>P100</b>		<b>P90-10</b>		<b>P80-20</b>		<b>P70-30</b>		<b>P60-40</b>	
<b>TEMPERATURA</b>	<b>RESISTENCI A A LA FLEXIÓN.</b>	<b>GRUPO</b>	<b>RESISTENCI A A LA FLEXIÓN.</b>	<b>GRUPO</b>	<b>RESISTENCI A A LA FLEXIÓN.</b>	<b>GRUPO</b>	<b>RESISTENCI A A LA FLEXIÓN.</b>	<b>GRUPO</b>	<b>RESISTENCI A A LA FLEXIÓN.</b>	<b>GRUPO</b>
<b>975 °C</b>	9,81	GIIB-1	14,52	GIIB-1	10,88	GIIB-1	9,12	GIIB-1	7,35	GIII
<b>1025 °C</b>	12,95	GIIB-1	18,54	GIIA-1	12,26	GIIB-1	10,39	GIIB-1	8,14	GIIB-1
<b>1100 °C</b>	10,59	GIIB-1	11,77	GIIB-1	8,53	GIIB-1	8,33	GIIB-1	6,18	GIII