	GESTIÓN DE SERVICIOS ACADÉMICOS Y BIBLIOTECARIOS		CÓDIGO	FO-GS-15
			VERSIÓN	02
	ESQUEMA HOJA DE RESUMEN		FECHA	03/04/2017
			PÁGINA	1 de 1
ELABORÓ		REVISÓ	APROBÓ	
Jefe División de Biblioteca		Equipo Operativo de Calidad	Líder de Calidad	

RESUMEN TRABAJO DE GRADO

AUTOR(ES):

NOMBRE(S): DANIEL FERNANDO JURADO PABUENCE

NOMBRE(S): CAMILO ANDRES ALVARADO GALLO

FACULTAD: INGENIERIA

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERIA INDUSTRIAL

DIRECTOR: LEONARDO CELY ILLERA

TÍTULO DEL TRABAJO : ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO Y TECNOLÓGICO DE UN PRODUCTO CERÁMICO EXTRUIDO MEDIANTE PREPARACIÓN POR MOLIENDA VÍA HÚMEDA Y SOMETIDO AL PROCESO DE COCCIÓN EN HORNO COLMENA

En el presente proyecto, se evaluó técnicamente la viabilidad de la conversión tradicional del proceso productivo cerámico regional. Durante el desarrollo del mismo se estudiaron las variables de preparación, conformado y cocción, se configuró el proceso a nivel semi-industrial y se produjeron muestras tipo pavimento. Los resultados mostraron ventajas técnicas y tecnológicas sobre los métodos y productos cerámicos actuales.

PALABRAS CLAVES: MOLIENDA, CONFORMADO, CURVA DE COCCIÓN, MAMPOSTERÍA

CARACTERÍSTICAS:

PÁGINAS: 115 PLANOS: _____ ILUSTRACIONES: _____ CD ROOM: _____

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO Y TECNOLÓGICO DE UN PRODUCTO
CERÁMICO EXTRUIDO MEDIANTE PREPARACIÓN POR MOLIENDA VÍA HÚMEDA Y
SOMETIDO AL PROCESO DE COCCIÓN EN HORNO COLMENA

DANIEL FERNANDO JURADO PABUENCE
CAMILO ANDRÉS ALVARADO GALLO

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA
PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
SAN JOSÉ DE CÚCUTA
2020

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO Y TECNOLÓGICO DE UN
PRODUCTO CERÁMICO EXTRUIDO MEDIANTE PREPARACIÓN POR MOLIENDA VÍA
HÚMEDA Y SOMETIDO AL PROCESO DE COCCIÓN EN HORNO COLMENA

DANIEL FERNANDO JURADO PABUENCE
CAMILO ANDRÉS ALVARADO GALLO

Proyecto de grado presentado como requisito para optar el título de
Ingeniero Industrial

Director
LEONARDO CELY ILLERA
Ingeniero Ambiental
MSc. Ciencia y Tecnología de Materiales

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: viernes 05 de Junio, 2020

HORA: 10:20 – 11:00 a.m.

LUGAR: GOOGLE MEET – CORREO INSTITUCIONAL UFPS

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERIA INDUSTRIAL

TÍTULO DE LA TESIS: ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO Y TECNOLÓGICO DE UN PRODUCTO CERÁMICO EXTRUIDO MEDIANTE PREPARACIÓN POR MOLIENDA VÍA HÚMEDA Y SOMETIDO AL PROCESO DE COCCIÓN EN HORNO COLMENA

JURADOS: GAUDY CAROLINA PRADA BOTÍA
ZAYDEÉ GONZÁLEZ GARCÍA
ANA MILENA GÓMEZ SOTO

DIRECTOR: **LEONARDO CELY ILLERA**

NOMBRE DEL ESTUDIANTE	CÓDIGO	CALIFICACIÓN NÚMERO	CALIFICACIÓN LETRA
DANIEL FERNANDO JURADO PABUENCE	1191360	4,5	Cuatro, cinco
CAMILO ANDRÉS ALVARADO GALLO	1191395	4,5	Cuatro, cinco

MERITORIA


GAUDY CAROLINA PRADA BOTÍA


ZAYDEÉ GONZÁLEZ GARCÍA


ANA MILENA GÓMEZ SOTO


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

Agradecimientos

Ante todo, darle gracias a Dios por permitirme poder culminar mi carrera profesional y obtener tan preciado logro, solo él y quiénes han estado a mi lado durante éste duro camino, saben el esfuerzo que fue para mí conseguir éste título. Gracias a mi familia, a mis padres, Manuel y Rosa, quiénes siempre han confiado en mí y me han animado en los momentos donde quería desistir, mis hermanos Manuel y Fabián, quiénes me han apoyado en las buenas y en las malas; a mi esposa Mónica quién ha sido un pilar fundamental, a ella el mayor de los agradecimientos por estar a mi lado en la consecución de este logro; a mi hija, que viene en camino, por ser el motor que me ha impulsado a nunca rendirme.

A todos los maestros por quienes tuve el privilegio de pasar durante éste largo camino, quienes me inculcaron una educación digna y de mucho valor para mí formación como profesional. A mi compañero de grado y gran amigo Daniel, quién siempre depositó su confianza en mí para poder sacar adelante éste proyecto. Y por último, pero no menos importante, un agradecimiento muy especial, al ingeniero Leonardo Cely, nuestro director de proyecto, quién confió en nuestro potencial y nos brindó su sabiduría y su ayuda durante los últimos dos años, tanto en éste proyecto como en las materias que nos dictó.

CAMILO ALVARADO

Cuando pienso en los agradecimientos, a mi memoria llega Dios, quien ha sido el medio y el instrumento para la construcción y consecución de mi proyecto de vida; después de él, a mis padres Luis Alberto y Martha Esmid por la educación impartida, la cual me preparó de manera integral en aras de asumir los retos que la formación profesional trae consigo. En mis oraciones y acciones eternamente estaré agradecido con aquellas personas que prontamente partieron, las cuales hicieron todo lo posible para brindarme la oportunidad de acceder a un alma mater. Mis logros son de ustedes, y de todos los que con sus actos permitieron que este proceso académico llegara a este punto.

Sería imposible no hacer mención de nuestro director y formador Leonardo Cely, su orientación, experiencia y conocimiento en la realización de dicho proyecto fueron fundamentales, así como el gran apoyo de mi compañero Camilo. Concluida esta etapa formativa solo me resta decir con total convicción, que hice dos buenos amigos.

Con profundo regocijo a todos los anteriores, infinitas gracias...

DANIEL JURADO

Abstract

Regionalmente, las empresas cerámicas muchas veces se limitan a realizar la caracterización de las materias primas, sin tener en cuenta los métodos de molienda y técnicas de conformado, las cuales tendrán influencia en el proceso de cocción y en las propiedades finales del producto terminado. Esto es debido fundamentalmente al factor económico, lo que genera que no se evalué de manera eficiente la influencia de una buena preparación de la materia prima, y el efecto que ocurren sobre las piezas que serán sometidas a cocción, ocasionando que no se obtengan las propiedades tecnológicas que hacen que un producto sea competitivo. Este proyecto, evaluó el comportamiento térmico de una materia prima arcillosa, con el objetivo de evaluar, analizar, comparar y proponer una curva de cocción óptima para un producto cerámico preparado por molienda húmeda y conformado por extrusión. Se estableció la viabilidad de producir industrialmente pavimentos y revestimientos cerámicos, utilizando este método de preparación para la técnica de conformado por extrusión, y se mostraron las ventajas de esta molienda en el proceso de cocción, logrando un beneficio integral, entre el mejor aprovechamiento de los recursos, el incremento en la calidad y un máximo de rentabilidad de los productos.

Tabla de contenido

	pág.
Introducción	16
1.El Problema	19
1.1. Título	19
1.2. Planteamiento del Problema	19
1.3. Formulación del problema	21
1.4. Justificación	21
1.4.1. A nivel de la universidad.	23
1.4.2. A nivel del estudiante.	23
1.5. Objetivos	23
1.5.1. Objetivo General.	24
1.5.2. Objetivos Específicos.	24
1.6. Alcances y Limitaciones	24
1.6.1. Alcances.	24
1.6.2. Limitaciones.	25
2.Marco Referencial	26
2.1. Antecedentes	26

2.2. Marco Contextual	35
2.2.1. Generalidades de la empresa	35
2.2.2. Historia	36
2.2.3. Visión	37
2.2.4. Misión	38
2.2.5. Información general	38
2.3. Marco Teórico	39
2.3.1. Control de humedad	39
2.3.2. Retenido sobre tamiz	39
2.3.3. Distribución granulométrica	40
2.3.4. Granulometría por hidrómetro	40
2.3.5. Granulometría por tamizado	41
2.3.6. Índice de plasticidad	42
2.3.7. Contracción lineal	43
2.3.8. Pérdidas de masa	44
2.3.9. Resistencia mecánica	44
2.3.10. Porcentaje de absorción de agua	45
2.3.11. Análisis termogravimétrico (TGA)	46
2.3.12. Análisis termodiferencial (ATD)	47
2.3.13. Fluorescencia de rayos X (FRX)	47

2.3.14. Difracción de rayos X (DRX)	47
2.4. Marco Conceptual	47
2.4.1. Arcilla	48
2.4.2. Extrusión	48
2.4.3. Prensado	49
2.4.4. Cocción	49
2.4.5. Horno colmena o de llama invertida	50
2.4.6. Hornillas o firebox	51
2.4.7. Brameras	52
2.4.8. Alfacas	52
2.4.9. Puertas del horno	52
2.4.10. Chimeneas	52
2.4.11. Molienda	53
2.4.12. Secado	53
2.4.13. Gresificación	54
2.4.14. Sinterización	55
2.4.15. Contracción	55
2.4.16. Dilatación	55
2.4.17. Porosidad	56
2.4.18. Absorción de agua	56

2.4.19. Controles básicos	57
2.4.20. Controles complementarios	57
2.5. Marco Legal	58
2.5.1. Estatuto estudiantil.	58
2.5.2. Normas técnicas	59
2.5.3. Métodos internos.	60
3.Diseño Metodológico	61
3.1. Tipo de Investigación	61
3.2. Población y Muestra	61
3.2.1. Población	61
3.2.2. Muestra	61
3.3. Instrumentos para la Recolección de Información	62
3.3.1. Fuentes Primarias	62
3.3.2. Fuentes secundarias	62
3.4. Análisis de la Información	62
4.Resultados y discusión.	63
4.1. Preparación de la materia prima para la fabricación de especímenes	63
4.1.1. Conformado por extrusión del material	70
4.1.2. Influencia de la molienda en vía húmeda en los aspectostecnológicos en verde	73

4.1.3. Influencia de la molienda en vía húmeda en los aspectos tecnológicos en seco	74
4.2. Desarrollo de una curva de cocción óptima para la obtención de las propiedades tecnológicas	80
4.3. Influencia de la reconversión del método de preparación sobre las propiedades tecnológicas requeridas a nivel industrial para productos conformados por extrusión su equivalencia con productos en el mercado.	90
5.Conclusiones	106
6.Recomendaciones	109
7.Referencias Bibliográficas	110

Lista de tablas

Tabla 1. Información de la UFPS.	36
Tabla 2. Normas Técnicas.	55
Tabla 3. Composición química de la materia prima arcillosa FRX).	79

Lista de figuras

	pág.
Figura 1.Distribución granulometrica metodo del hidrometro.	41
Figura 2.Distribución granulométrica metodo de tamizado en seco.	42
Figura 3.Metodos para el desarrollo de la propiedad estructural (Absorción de agua).	46
Figura 4.Horno colmena regional.	51
Figura 5. Muestreo de la materia prima.	64
Figura 6. Muestras recolectadas para el desarrollo del proyecto.	65
Figura 7. Equipos y parámetros de molienda.	67
Figura 8. Triangulo de aptitudes de Winkler.	69
Figura 9. Pronóstico de extrusión (Método de Casagrande).	70
Figura 10. Amasado del material.	71
Figura 11. Conformado por extrusión de las probetas.	72
Figura 12. Densificación húmeda de los especímenes.	74
Figura 13. Densificación seca de los especímenes.	76
Figura 14. Contracción seca de los especímenes.	77
Figura 15. Perdidas de masa en seco de los especímenes.	79
Figura 16. Difractogramas de rayos X de la materia prima arcillosa (Q. Cuarzo; K. Caolinita; I. Illita; C.Calcita).	82
Figura 17. Curva dilatométrica (MS. Curva 03 y MH. Curva 01).	84
Figura 18. Curva de gresificación en atmosfera neutra.	86
Figura 19. Curva tentativa de cocción aplicada para el proyecto.	89

Figura 20. Densificación en cocción.	91
Figura 21. Contracción en cocción.	93
Figura 22. Perdidas por calcinación.	95
Figura 23. Propiedad estructural (Porosidad abierta).	98
Figura 24. Propiedad mecánica (Resistencia a la flexión).	100
Figura 25. Gráfico comparativo de porosidad de productos MH vrs NTC 919.	102
Figura 26. Gráfico comparativo de resistencia de productos MH vrs NTC 919	105

Lista de formulas

	pág.
Fórmula 1. Contenido de humedad	39
Fórmula 2. Retenido sobre tamiz	40
Fórmula 3. Índice de plasticidad	42
Fórmula 4. Control lineal en seco	43
Fórmula 5. Control lineal en cocido	43
Fórmula 6. Pérdidas de masa en seco	44
Fórmula 7. Pérdidas de masa en cocido	44
Fórmula 8. Resistencia mecánica a la flexión en tres puntos	45
Fórmula 9. Porcentaje de absorción de agua	46

Introducción

El sector de la arcilla, es uno de los más representativos en el producto interno bruto del departamento, este aporta más del 8%, siendo así uno de los sectores de mayor generación de empleo formal y aportante, destacado en el desarrollo del mercado de materiales del sector de la construcción regional, nacional e internacional (Cámara de Comercio de Cúcuta, 2019); por esta razón, su explotación y transformación, permite la creación de materiales de construcción que hacen parte de muchas obras realizadas en todo el territorio nacional, y la incursión en obras internacionales (Sarabia Guarín, Sánchez Molina, & Leyva Díaz, 2017). En estos campos, la industria cerámica regional se ha destacado por la calidad de sus productos, gracias al aprovechamiento de las propiedades y las características de las materias primas ofrecidas por las diferentes formaciones arcillosas (León, Guayabo y Carbonera) presentes en el departamento.

Por este motivo, resulta fundamental, la investigación y la interacción entre la industria regional y las instituciones académicas, teniendo como objeto de estudio el área de los cerámicos. La generación de conocimientos, fruto del campo investigativo mancomunado, podrá ser usado para lograr un mayor beneficio de los recursos existentes y una optimización de los procesos productivos. Generalmente, los procesos de fabricación en el departamento, están conformados por dos métodos para realizar la molienda de las materias primas, y dos técnicas de conformado como son, para el conformado por extrusión se realiza por molienda vía seca, y para el conformado por prensado, se realiza la molienda vía húmeda. Existe un porcentaje del 85% de las empresa regionales, que utilizan el proceso de molturación vía seca y el conformado por extruido para producir pavimentos y revestimientos cerámicos (Gelves, Monroy, Sánchez, & Ramírez, 2013).

Particularmente, cada método y técnica anteriormente nombrados, ofrecen distintas ventajas que influyen en las propiedades tecnológicas del producto terminado, las cuales han sido objeto de estudio por parte de otros autores.

Aprovechando los resultados de esas investigaciones, se realizó una investigación que tuvo como fin, estudiar el comportamiento térmico y tecnológico de un producto molturado por vía húmeda y conformado por extruido, considerando los beneficios que trae la utilización de estos métodos sobre los productos a obtener. La arcilla fue extraída de la formación Guayabo y utilizada para el desarrollo del estudio, se analizó para caracterizarla física, química y mineralógicamente, e igualmente se le realizaron ensayos térmicos para determinar y proponer una curva de cocción adecuada.

Los especímenes ya conformados, fueron sometidos al proceso de cocción en horno colmena o de llama invertida, a dos atmósferas, una reductora y una oxidante, estas son frecuentemente usadas a nivel regional, aplicando la curva de cocción planteada y sugerida. De las etapas productivas que se aplicaron en el desarrollo de la investigación, arrojaron resultados que sirvieron para determinar la viabilidad de producir a nivel industrial, pavimentos y revestimientos cerámicos, configurando un sistema de producción como el utilizado en este trabajo. Así mismo, se demostrará y propondrá a los fabricantes regionales cerámicos, un mejor desarrollo y obtención de las propiedades tecnológicas que hacen competitivos a estos productos, garantizando la apertura de nuevos mercados y la consolidación en los ya existentes.

Igualmente, se pretende con la ejecución de este trabajo crear un referente bibliográfico que pueda ser consultado por diferentes grupos académicos y empresariales, y que sirva para aportar al desarrollo e innovación de materiales cerámicos en general.

1. El Problema

1.1. Título

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO Y TECNOLÓGICO DE UN PRODUCTO CERÁMICO EXTRUIDO MEDIANTE PREPARACIÓN POR MOLIENDA VÍA HÚMEDA Y SOMETIDO AL PROCESO DE COCCIÓN EN HORNO COLMENA

1.2. Planteamiento del Problema

Es importante considerar, que el resultado final de la elaboración de revestimientos cerámicos dependen de muchas variables. En el proceso productivo, juega un papel importante conocer las propiedades y composición de las arcillas, para determinar la aptitud cerámica dentro del proceso de fabricación. Esto se logra mediante una previa caracterización (Fernández Abajo, 2000) (Instituto de Tecnología Cerámica y Comisión de Trabajo, 2009); de esta última se deriva un proceso de fabricación acorde a lo que se quiere producir; es decir, utilizar el método de molturación, proceso de conformado, secado y el proceso de cocción apropiados, para lograr un aprovechamiento óptimo de los recursos en función de los resultados esperados.

Regionalmente, las empresas cerámicas muchas veces se limitan a realizar la caracterización de las materias primas, omitiendo y obviando la influencia que los métodos de molienda y técnicas de conformado tendrán sobre el proceso de cocción y sobre las propiedades finales del producto terminado (propiedades tecnológicas). El factor económico, es un común denominador al

momento de determinar el método de producción en las empresas, lo que genera la deficiente realización de estas etapas del proceso, y no se evaluó de manera eficiente la influencia de una buena preparación de la materia prima, y el efecto que ocurren sobre las piezas que serán sometidas a cocción, ocasionando que no se obtengan las propiedades tecnológicas que hacen que un producto sea competitivo nacional e internacionalmente (Sánchez Molina & Ramírez Delgado, El Clúster de la cerámica del área metropolitana de Cúcuta, 2013).

Por este motivo, este proyecto, evaluó el comportamiento térmico de un material arcilloso, con el fin de analizar, comparar y proponer una curva de cocción óptima para un producto cerámico preparado por molienda húmeda y conformado por extrusión, que fué sometido a cocción en horno colmena. Se escogió este tipo de molienda sobre esta técnica de conformado, aprovechando los beneficios que trae la molienda en vía húmeda en la preparación de las materias primas y su homogeneidad en el tamaño y distribución de partícula dentro de un proceso de fabricación (SACMI, Asociación española de técnicos cerámicos, 2004). Estos beneficios han sido demostrados anteriormente en estudios e investigaciones a nivel de laboratorio, los cuales han sido tomados como referencia para el inicio de esta investigación (Moreno Quintero & Pabón Acevedo, Estudio de la influencia del proceso de molienda en el desarrollo estructural de un producto extruido al ser evaluado por la temperatura final de cocción, 2018).

Para el desarrollo de esta investigación, se simuló completamente el proceso de fabricación, para esto se conformó en una extrusora semiindustrial, un producto de revestimiento tipo fachaleta, muy comercializado en la región, y se realizó el proceso de secado, inicialmente al natural y seguidamente artificial. Finalmente, la cocción de los productos se realizó en horno colmena o de

llama invertida (uno de los más utilizados en la región), se aplicó la curva de cocción propuesta, para poder demostrar a nivel industrial, el incremento en las propiedades tecnológicas necesarias para ser competitivo en los mercados nacionales e internacionales. Posteriormente se evaluaron y se compararon las propiedades adquiridas por los especímenes, con productos similares en el mercado para verificar si cumplen con la calidad exigida.

Posteriormente, se estableció la viabilidad de producir industrialmente pavimentos y revestimientos cerámicos, utilizando este método de preparación en la técnica de conformado por extrusión, y las ventajas de aplicarla durante el proceso de cocción, logrando un beneficio integral, entre el mejor aprovechamiento de los recursos, el incremento en la calidad y un máximo de rentabilidad de los productos.

1.3. Formulación del problema

¿De qué manera el estudio sobre el comportamiento de un material extruido mediante preparación por vía húmeda y sometido a cocción en horno colmena, contribuirá a obtener mejores características e incrementar sus propiedades tecnológicas a nivel semi-industrial?

1.4. Justificación

Con el fin de aprovechar de manera óptima los recursos técnicos, tecnológicos y de la materia prima de la industria cerámica presentes en la región, se dió continuidad con este proyecto a nivel industrial, a los resultados del trabajo realizado a nivel de laboratorio, los cuales han determinado,

los beneficios que el proceso de preparación por molienda húmeda sobre la técnica de conformado por extruido, aportan al incremento y obtención de las propiedades tecnológicas y la mejora en los ciclos de cocción (Moreno Quintero & Pabón Acevedo, Estudio de la influencia del proceso de molienda en el desarrollo estructural de un producto extruido al ser evaluado por la temperatura final de cocción, 2018).

A este último proceso, teniendo en cuenta lo crítico y lo complejo del mismo, se le hizo un estudio térmico, para poder optimizarlo, analizando y evaluando las variables controlables que inciden dentro del mismo (temperaturas, tiempo y atmósfera), conociendo cómo sería el comportamiento de los materiales al someterlos a altas temperaturas que el mismo proceso de producción demanda. De esta manera, se controlaron defectos por una mala cocción, garantizando una buena sinterización, densificación y gresificación, asegurando la calidad de estos productos, dándoles un valor agregado en términos de rentabilidad y propiedades tecnológicas, a la hora de competir en el mercado actual.

Los resultados de este trabajo, podrían generar un impacto en las empresas fabricantes de materiales cerámicos de la región, teniendo en cuenta que, regionalmente, los hornos comúnmente utilizados, son los colmena en un 77%; el método más empleado de conformado es el extruido, y los productos más elaborados son los bloques, ladrillos perforados, teja española, teja colonial, enchapes o fachaletas y revestimientos, como menciona Sánchez Molina (2012) “Según la figura 15 el tipo de horno más utilizado en las empresas fabricantes de cerámica roja de la región es el horno colmena o de llama invertida (77%), en mínima proporción se pueden encontrar en las empresas hornos Hoffman (9%), horno túnel (4%), horno de fuego tirado (4%), horno de rodillos

(2%), hornos de cámara (2%) y otro (2%)” (Sanchez Molina, Gelvez Díaz, & Romero Arcos, 2012) (p.77). Es decir, industrialmente, la mayoría de las empresas podrían aprovechar los aportes realizados por este proyecto, utilizando este método de preparación como referencia para el mejoramiento de su producción.

1.4.1. A nivel de la universidad.

El presente proyecto, estuvo encaminado a la generación de conocimiento para que pueda ser tomado como referencia por los estudiantes de la Universidad Francisco de Paula Santander, a fin de fortalecer y consolidar las bases de su aprendizaje, cuyo resultado es brindarle a la región y al país, profesionales íntegros, capaces de resolver cualquier problema de aplicación, y contribuir a la activación laboral de la economía de la región.

1.4.2. A nivel del estudiante.

Con el desarrollo de este proyecto, el ingeniero industrial en formación, podrá aplicar y afianzar los conocimientos obtenidos durante su proceso de formación académica, para contribuir a la optimización de procesos productivos de la región, mediante el análisis, evaluación y aprovechamiento óptimo de los recursos.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General.

Estudiar el comportamiento térmico y tecnológico de un producto cerámico extruido mediante preparación por molienda vía húmeda y sometido al proceso de cocción en horno colmena.

1.5.2. Objetivos Específicos.

Realizar. Realizar el proceso productivo con las arcillas previamente caracterizadas para la obtención de los materiales cerámicos a cocer.

Desarrollar. Desarrollar los análisis y ensayos térmicos necesarios para proponer una curva de cocción óptima, que contribuya a la obtención de las propiedades tecnológicas deseadas.

Analizar. Analizar los resultados después de haber aplicado la curva de cocción propuesta, evaluando bajo las normas técnicas colombiana (NTC) para baldosa cerámica.

Determinar. Determinar si la curva de cocción propuesta influyó en la mejora de las propiedades tecnológicas requeridas a nivel industrial.

1.6. Alcances y Limitaciones

1.6.1. Alcances.

El proyecto inició desde la realización de la molienda, mediante preparación por vía húmeda del material cerámico, hasta analizar los resultados, determinando si dicha molienda contribuyó a la obtención y/o mejora de las propiedades tecnológicas.

1.6.2. Limitaciones.

Los equipos requeridos para la realización de análisis y ensayos especializados, los cuales son indispensables para la correcta ejecución del proyecto, dada su complejidad no se encontraban dentro de la universidad ni tampoco dentro de la ciudad, lo que acarreó costos económicos significativos.

2. Marco Referencial

2.1. Antecedentes

Para poder ejecutar y dar respuestas a las intenciones plasmadas dentro del proyecto se tomaron como bases de información a modo referencial, trabajos y artículos que abordaron y estudiaron temas relacionados al objeto de estudio de éste.

Cely Illera, L., & Bolívar León, R. (2015). Materia prima para la industria cerámica de Norte de Santander. Evaluación del comportamiento térmico y su incidencia en las propiedades tecnológicas, *Respuestas*, 20(1), 84-94.

Este trabajo constituye la continuación de uno previo; en la primera parte de este trabajo se estudiaron las características mineralógicas, químicas y físicas de una arcilla del Área Metropolitana de San José de Cúcuta. En este trabajo, se realizaron análisis térmicos de termogravimetría (ATG) y térmico-diferencial (ATD, para desarrollar una curva óptima de cocción. Se sinterizaron muestras extruidas y se realizó la caracterización tecnológica del mismo, ensayos de absorción de agua, resistencia mecánica y abrasión profunda, se desarrollaron. Además, quemamos en un horno industrial, con el fin de realizar un comparativo de la curva propuesta y una curva de cocción real. Se pudo comprobar que al usar la curva propuesta en la investigación, y comparando con los resultados arrojados a nivel industrial, no sólo se obtuvo el mejor provecho de este recurso, sino que se determinó que la materia prima mejora

considerablemente sus características tecnológicas, incrementando el tráfico del producto. Esto representa la posibilidad de obtener mejores productos, generando competitividad en cualquier tipo de mercado, no solo a nivel nacional sino internacional.

Este artículo, fue tomado como referente dentro de la elaboración de ésta propuesta de estudio, debido a la metodología y resultados desarrollados durante el trabajo planteado por el autor. Puntualmente, aspectos que son común denominador entre el presente proyecto y el artículo en mención, que serán determinantes en la consecución de resultados como son: el estudio del comportamiento térmico, el cual se realizó mediante la aplicación de análisis térmicos de termogravimetría (ATG) y térmico-diferencial (ATD), el tipo de conformado utilizado (extruido), el tipo de horno industrial empleado para la cocción (Horno Colmena o de Llama invertida), y el procedimiento de evaluación de las probetas resultantes, los cuáles, fueron aplicados en un contexto muy similar en el que se pretende ejecutar éste proyecto.

Gelvez, J. F., Monroy, R., Sánchez, J., & Ramirez, R. P. (2013). Estudio comparativo de las técnicas de extrusión y prensado como procesos de conformado de productos cerámicos de construcción en el Área Metropolitana de Cúcuta. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 52(1), 48-54.

El presente trabajo estudia las principales variables de control del proceso de fabricación de piezas cerámicas de construcción de la zona metropolitana de San José de Cúcuta, mediante las técnicas de extrusión y prensado para su conformado. La investigación se llevó a cabo

utilizando muestras arcillosas de las dos principales formaciones geológicas de la región, de donde se extraen las materias primas para el proceso a nivel industrial. Las muestras arcillosas se molturaron, tanto por vía seca como por vía húmeda y se estudió su granulometría. Posteriormente, se llevó a cabo el proceso de conformado, utilizando una prensa hidráulica y una extrusora con vacío, ambos equipos a escala laboratorio. Las probetas obtenidas se secaron y cocieron entre 980 °C y 1180 °C; al final del proceso se realizaron pruebas para determinar la absorción de agua, contracción y pérdida de masa en cocción de las probetas. Los resultados dejaron ver que la técnica de extrusión permite una gresificación más rápida para las arcillas de la región, en comparación con la técnica de prensado, las contracciones de secado y cocción son menos marcadas en la técnica de prensado; y con desviaciones estándar mucho más bajas que en el caso de la extrusión.

Éste artículo, fue tomado como referente dentro de la elaboración de esta propuesta de estudio, porque resulta importante y decisivo conocer, apreciar y diferenciar los dos tipos de técnicas de conformados utilizados en la región (extruido y prensado), los beneficios que cada uno ofrece tras su aplicación en procesos de fabricación cerámica. Los resultados de este estudio, se toman como punto de partida, para tener en cuenta las ventajas y características posibles a obtener en pavimentos y revestimientos cerámicos, cuyo condicionamiento, hacen parte para determinar la calidad de un producto, como son: Contracciones, diferencias granulométricas, densidad aparente de piezas cocidas, pérdidas de calcinación y absorción de agua.

Sánchez-Molina, J., Gelvez-Díaz, J. F. & Romero-Arcos, Y. A. (2012). Caracterización tecnológica y del talento humano de las empresas fabricantes de cerámica roja ubicadas en el Área Metropolitana de Cúcuta, *Respuestas*, 17(2), 71-80.

El presente trabajo muestra cómo están conformadas las empresas fabricantes de cerámica roja de esta región de Colombia, desde el punto de vista productivo, tecnológico, económico y de talento humano que allí labora. La información consolidada aquí, se ha basado en un muestreo representativo de las unidades representativas que se encuentran legalmente constituidas en la Cámara de Comercio de Cúcuta. El panorama encontrado, ha dejado ver que la industria ha alcanzado su mayor período de crecimiento en la última década (2000-2010), predominando la empresa pequeña, con un especial énfasis en la fabricación de cerámicas no esmaltadas; se evidencia un nivel tecnológico medio-bajo, al ser comparado con uno de los referentes internacionales; algo similar se aprecia en el nivel de formación académica del personal con altos niveles de analfabetismo y una limitación del personal especializado.

Éste artículo, fue tomado como referente dentro de la elaboración de este proyecto de investigación, ya que se consideró útil conocer de qué manera se encuentran configurados los sistemas de producción de la industria cerámica regional, el nivel y uso técnico y tecnológico, dentro de los distintos procesos productivos de pavimentos y revestimientos cerámicos, identificando de manera cuantitativa, desde los tipos de molturación de materias primas empleados y la utilización de éstos, hasta los tipos de hornos industriales usados para la cocción de estos materiales a nivel local. El conocimiento de esta información de forma verídica, resulta fundamental para tener claridad del posible impacto que puede llegar a generar los resultados

obtenidos en el proyecto, ya que ésta, se enfocó hacia el aprovechamiento óptimo de los recursos existentes para lograr la obtención de productos competitivos.

Payares Pérez, C. A. (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. Trabajo de grado presentado para obtener el título de Ingeniero Mecánico. Universidad Francisco de Paula Santander. Ocaña, Colombia.

Con el estudio realizado en la etapa de cocción de bloques de arcilla en la empresa ladrillera Ocaña, se mostró el comportamiento de cada una de las variables que intervienen en el proceso, las cuales ayudaron a la toma de decisiones, buscando mejorar la eficiencia en el horno como tal. En este proyecto se consideró, entre otros el estudio previo de las propiedades de los materiales sobre los que se trabaja; también se realizaron ensayos en la planta física y los laboratorios de la universidad, para determinar la curva óptima de cocción y propiedades físicas finales de los bloques de arcilla, que mejorará la calidad del producto.

Éste trabajo de grado, fue tomado como referente dentro de la elaboración de ésta propuesta de estudio, debido, a que el autor por medio de él, muestra que gran parte de las propiedades tecnológicas de un producto terminado, están en función del proceso de cocción, el cual resulta ser una de las etapas más críticas. En el desarrollo del estudio, se logra establecer una curva de cocción adecuada, para someter a este proceso bloques y ladrillos en un horno industrial, logrando una sinterización y cristalización correcta, que se evaluaron bajo ensayos destructivos y no destructivos

según las normas técnicas, lo cual comprueba y sirve como fundamento para el presente proyecto ya que, realizar un estudio térmico detallado, es necesario para conocer la correcta distribución de temperaturas dentro del horno, y el comportamiento de las arcillas sometidas a la acción del calor, lo cual permite optimizar el proceso que se ejecuta dentro del mismo, y en su efecto garantizar que se alcancen las propiedades mecánicas que hacen a un producto competitivo en el mercado actual.

Cáceres, I. V., Sánchez-Molina, J., Chaparro-García, A. L. (2017). Evaluación de arcillas caoliniticas-illíticas provenientes de la formación guayabo del área metropolitana de Cúcuta, Norte de Santander, Colombia. *rev.ion*, 30(1), 117-127. DOI: <http://dx.doi.org/10.18273/revion.v30n1-2017009>.

La caracterización de arcillas procedentes de la formación Guayabo, del Área Metropolitana de Cúcuta, Norte de Santander, (Colombia) es presentada. Los resultados obtenidos de estos análisis permiten determinar las propiedades de estas arcillas y potenciar su uso en la fabricación de materiales de construcción, y en la elaboración de nuevos materiales cerámicos, generando impactos tecnológicos, económicos y sociales en la región, pues se podrá competir con productos de calidad, en los exigentes mercados nacionales e internacionales. Es así que a través de este trabajo, se realizó la caracterización química, mineralógica, térmica y físico-cerámica, para determinar la estructura, composición y comportamiento de estas materias primas. Las muestras se obtuvieron de dos puntos diferentes de la formación, ubicados en el municipio de El Zulia y Villa del Rosario. Para la evaluación, se utilizó información obtenida de la caracterización química mediante fluorescencia de rayos X (FRX); caracterización

mineralógica mediante difracción de rayos X (DRX) e infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR);, caracterización térmica mediante análisis térmicogravimétrico (TGA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC), y finalmente, caracterización fisico-cerámica. Los resultados indican, que los minerales arcillosos están constituidos por aluminosilicatos hidratados con presencia de algunas impurezas, como sodio, hierro, potasio, calcio, titanio, por lo que presentan capacidad de ser sometidas a esfuerzos para su conformado a través de procesos de extrusión. Se evidencia que aunque ambas muestras se encuentran en diferentes municipios del Área Metropolitana de Cúcuta, presentan características similares en fases cristalinas, grupos funcionales, comportamientos térmicos y propiedades cerámicas.

Éste artículo, fue tomado como referente dentro de la elaboración de este proyecto, teniendo en cuenta, que la caracterización de una materia prima arcillosa es la primera acción, que debe realizarse antes de que sea procesada, o vaya a tener uso a nivel industrial, es decir, se deben conocer sus propiedades y composición física, química y mineralógica para una posterior identificación de aptitudes cerámicas, como lo revela la presente evaluación referida. Esta misma, tomó como muestra, una arcilla perteneciente a la formación Guayabo, sector del cual también será tomada la muestra que se procesará dentro de la ejecución del presente proyecto. Por tal motivo, los resultados arrojados, son de gran utilidad y sirven de guía, para tener un conocimiento previo sobre los posibles tipos de productos cerámicos que se pueden llegar a obtener, con arcillas provenientes de esta formación.

Moreno Quintero, M. & Pabón Acevedo, Y. (2018). Estudio de la influencia del proceso de molienda en el desarrollo estructural de un producto extruido al ser evaluado por la temperatura

final de cocción. Trabajo de grado presentado para obtener el título de Técnico en fabricación de productos cerámicos. Universidad Francisco de Paula Santander. Cúcuta, Colombia.

De una u otra manera, este proceso de molienda va afectar el desarrollo final de los materiales naturales y su participación en las diferentes pastas cerámicas utilizadas para la fabricación de los productos y va a definir, como ya se mencionó, las propiedades de los mismos. Por esta razón, y partiendo de este concepto básico, este proyecto se enfocó en la importancia que tiene la etapa de molienda en el desarrollo estructural de los productos finales conformados por los diferentes métodos, y la manera como afecta su comportamiento, al ser sometidos a un ciclo de cocción, obteniendo los siguientes resultados: la molienda en húmedo mejoró el proceso de cocción, pues se presentaron incrementos en las propiedades tecnológicas, como fue un aumento en la densificación del material; una reducción de la contracción lineal en cocido, pero sobre todo, redujo la porosidad abierta de los materiales hasta en 46,23%, ubicando el producto en el grupo AIIa según la norma NTC 919, y aumentar su valor agregado pues se pueden fabricar productos tipo gres por la baja porosidad del material. De la misma manera, la molienda en húmedo mejoró los parámetros de uso de este material, aumentando los valores de resistencia mecánica hasta en un 73,09%, lo que incrementa su valor comercial para productos como revestimiento.

Éste trabajo de grado, fue tomado como referente dentro de la elaboración de esta propuesta de estudio, ya que se logra evidenciar, la manera en la que influye el tipo de molienda en el desarrollo estructural de la pieza conformada por extruido. Éste aspecto, cobra gran importancia, al momento de tener caracterizada la materia prima arcillosa, ya que de allí se deriva la

configuración de un proceso productivo, garantizando el incremento en las propiedades tecnológicas, que también estarán en función del proceso de cocción. Por ello, los resultados arrojados en este estudio, se tuvieron presentes dentro de la estructuración y el desarrollo de éste proyecto, pues se utilizarán las mismas variables dentro del proceso de preparación de la materia prima y del conformado, variables que sirvieron para demostrar en un ambiente controlado, los beneficios de la molienda en húmedo, mismas variables que se utilizaron pero en un ambiente no controlado como el industrial.

Guerrero-Gómez, G., Espinel-Blanco, E. & Sánchez-Acevedo, H. G., (2017). Análisis de temperaturas durante la cocción de ladrillos macizos y sus propiedades finales. *Revista Tecnura* 21(51), 118-131. DOI: 10.14483/uindustrial.jour.tecnura.2017.1.a09.

Las propiedades finales de un bloque cerámico utilizado para mampostería, dependen de las temperaturas a las que fue cocida la pasta. Dichas propiedades son relevantes, toda vez que en función de ellas, será el comportamiento estructural de los muros en una edificación. El propósito del presente trabajo es determinar la relación entre las propiedades finales del bloque cerámico y las temperaturas a las que fue cocido, considerando la rapidez con que estas varían en el horno. Se registró un sistema para observar temperaturas en el horno utilizando labview; se consideró la velocidad de incremento de temperatura según la curva de cocción ideal para los bloques, que fueron clasificados al interior del horno; se tomaron muestras al interior del producto, para determinar las propiedades siguiendo las normas NTC 4017 y NTC 4205. Resultados: Se determinó por la tasa inicial de absorción de agua (TIA), absorción a las

24 horas de inmersión, resistencia a la compresión y módulo de rotura (MR). Mediante análisis de regresión lineal múltiple, se encontró relación existente entre la TIA, la velocidad de incremento de temperatura y el MR. Los bloques que superaron los 1000°C, poseen el mayor módulo de rotura (con valor de 1,54Mpa). Sin embargo, se encontró la mayor tasa de absorción inicial (0,37g/cm²/min) y la mejor resistencia a la compresión (7,48 Mpa) en los bloques que fueron cocidos a menor temperatura. Las propiedades no son las adecuadas, dado que en el proceso de cocción no es controlada la temperatura ni el tiempo.

Este artículo, fue tomado como referente en el presente proyecto, ya que se evalúan las propiedades finales después del ciclo de cocción, controlando la temperatura y manejando una curva de cocción adecuada, la cual sirve como medida a tener en cuenta en la elaboración de ésta proyecto. Mediante la utilización de las normas NTC, se obtienen los resultados de un producto, que es sometido a temperaturas bastante elevadas en un horno colmena, facilitando así su ciclo final de cocción.

2.2.Marco Contextual

2.2.1. Generalidades de la empresa

Con el fin de demostrar que el alma máter está en pro de la generación de conocimiento, y siguiendo los parámetros para incentivar a los estudiantes a aprovechar los recursos provenientes de ella, este proyecto se realizó en las instalaciones de la Universidad Francisco de Paula

Santander, específicamente, en el Laboratorio de Formación Cerámica. Por lo tanto, es importante resaltar algunos aspectos de la institución.

2.2.2. Historia

La Universidad Francisco de Paula Santander, nace como fundación de carácter privado, el 05 de Julio de 1962, con la Escuela de Economía. Ese mismo año, el 19 de septiembre, el gobierno departamental le otorga la personería jurídica y se incorporan a la universidad, las escuelas de topografía y dibujo. Su objetivo es elevar el nivel cultural de la juventud nortesantanderiana, solucionar el problema de numerosos bachilleres de la localidad que por diversas causas, sobre todo económicas, no pueden seguir estudios en otras ciudades del país, además de estrechar vínculos de solidaridad.

Por petición escrita del rector de esa época, dr. José Luis Acero Jordán, se cede para el funcionamiento de la Universidad, un local de propiedad del mismo, ubicado en la calle 13 con avenidas 5 y 6, donde inicia labores la UFPS. En el año 1968, la Asamblea del Departamento autoriza al gobernador para que gestione el contrato de compra-venta de un lote ubicado en la urbanización Quinta Oriental, lugar donde actualmente se encuentra la UFPS. Ese mismo año, se inicia el programa de especialización de profesores en el exterior por medio de Becas de la OEA, a través del Icetex. El 01 de Junio de 1970, se declara disuelta la Fundación Universidad de Cúcuta Francisco de Paula Santander, constituida como derecho privado y para garantizar su perpetuidad, se acepta sea declarada como Universidad Oficial del Departamento, quedando como establecimiento público descentralizado y con personería jurídica.

El número de estudiantes y el progreso de los programas académicos ofrecidos por la UFPS a la región, ha aumentado notablemente; en la actualidad, tiene una oferta académica respaldada en procesos de calidad conseguidos mediante el trabajo constante de toda la comunidad, en áreas concernientes a la ingeniería, salud, ciencias básicas, ciencias empresariales, ciencias agrarias, ciencias del medio ambiente, educación, artes y humanidades. Hoy la institución tiene en sus manos la inmensa tarea de brindar una formación a sus estudiantes, soportada en la responsabilidad social, utilizando como herramientas las tecnologías de la comunicación e información. La Universidad Francisco de Paula Santander, como institución pública en el sentido de sus posibilidades está permanentemente en la búsqueda de una formación que brinde al estudiante una misión de mundo desde una óptica crítica, que contribuya al desarrollo social y progreso en general de la región y el país.

2.2.3. Visión

La Universidad Francisco de Paula Santander será reconocida a nivel nacional por la alta calidad, competitividad y pertinencia de sus programas académicos, la generación de conocimiento, la transferencia de ciencia y tecnología, y la formación de profesionales con sentido de responsabilidad social, utilizando estrategias metodológicas presenciales, a distancia y virtuales, que faciliten la transformación de la sociedad desde el ámbito local hacia lo global.

2.2.4. Misión

La Universidad Francisco de Paula Santander, será reconocida a nivel nacional, por la alta calidad, competitividad y pertinencia de sus programas académicos, la generación de conocimiento, la transferencia de ciencia y tecnología, y la formación de profesionales con sentido de responsabilidad social, utilizando estrategias metodológicas presenciales, a distancia y virtuales, que faciliten la transformación de la sociedad desde el ámbito local hacia lo global.

2.2.5. Información general

Tabla 1. Información de la UFPS.

	
LOGO	
NOMBRE	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER
NIT	890500622-6
TELÉFONO FIJO	Av. Gran Colombia #12E-96 Colsag
UBICACIÓN	57 (7) 5776655
PÁGINA WEB	www.ufps.edu.co
REPRESENTANTE LEGAL	HÉCTOR MIGUEL PARRA LOPEZ

Fuente. Biblioteca Eduardo Cote Lemus -UFPS-.

2.3. Marco Teórico

2.3.1. Control de humedad¹

Es determinar en porcentaje, la cantidad de humedad (agua) que contiene una materia prima; esta se puede expresar en base húmeda o en base seca, utilizando termo balanza y secaderos de laboratorio o industriales y, se determina según la siguiente formula:

$$CH = \left(\frac{m1 - m2}{m1} \right) \times 100\%$$

Fórmula 1. Contenido de humedad

Dónde:

CH. Contenido de humedad en %.

m1. Masa húmeda en gramos.

m2. Masa seca en gramos

2.3.2. Retenido sobre tamiz

Es la relación que existe en una muestra de suelo de arcilla con el cuarzo y, se realiza por medio de una criba o tamiz; este análisis se realiza dependiendo del tipo de arcilla que se esté estudiando, siendo desarrollado en un tamiz malla 325 (45 µm) para arcillas con tonalidades blancas o

¹ Todos los procedimientos desarrollados en este proyecto de investigación, están enmarcados dentro de las normas internacionales y/o nacionales utilizadas por las empresas regionales para evaluar sus materiales tanto a nivel de producción (materias primas) como en el producto terminado, normas que se irán incluyendo dentro del proyecto en la secuencia que se vayan utilizando.

sin óxido de hierro y, en un tamiz malla 230 (63 μm) para arcillas con presencia de óxido de hierro y, se determina según la siguiente fórmula:

$$RT = \left(\frac{mr}{mm} \right) \times 100\%$$

Fórmula 2. Retenido sobre tamiz

Donde:

RT. Retenido sobre tamiz en %.

mr. Masa de retenido en gramos.

mm. Masa de la muestras en gramos

2.3.3. Distribución granulométrica

Es aquel análisis tiene por objeto la determinación cuantitativa de la distribución y de los tamaños de partículas de un suelo; generando los criterios de aceptación para ser utilizados en procesos industriales, mediante la clasificación de los sistemas AASHTO o USCS, se emplean tamices normalizados y numerados, dispuestos en orden decreciente. Para muestras con tamaño de partículas mayor a 0,074 mm (74 μm), se utiliza el método de análisis mecánico, mediante tamices de abertura y numeración indicados; y para muestras de tamaño inferior, se utiliza el método del hidrómetro, basado en la ley de Stokes.

2.3.4. Granulometría por hidrómetro

Este método se utiliza para obtener un valor estimado de la distribución granulométrica de suelos cuyas partículas se encuentran comprendidas entre los 0,74 mm (malla ASTM 200) y hasta al rededor de 0,001 mm (Figura 1). El análisis utiliza la relación entre la velocidad de

caída de una esfera en un fluido, el diámetro de la esfera, el peso específico de la esfera tanto del fluido, y la viscosidad de este.



Figura 1. Distribución granulométrica método del hidrometro.

Fuente: http://www.cenam.mx/myd/SIM/05%20Hydrometers%20Clasification%20part%201_Sa%C3%BAI%20Garc%C3%ADa.pdf

2.3.5. Granulometría por tamizado

Este método se utiliza para obtener un valor estimado de la distribución granulométrica (Figura 2), para suelos con tamaño de partículas mayor a 0,074 mm (74 μ m).

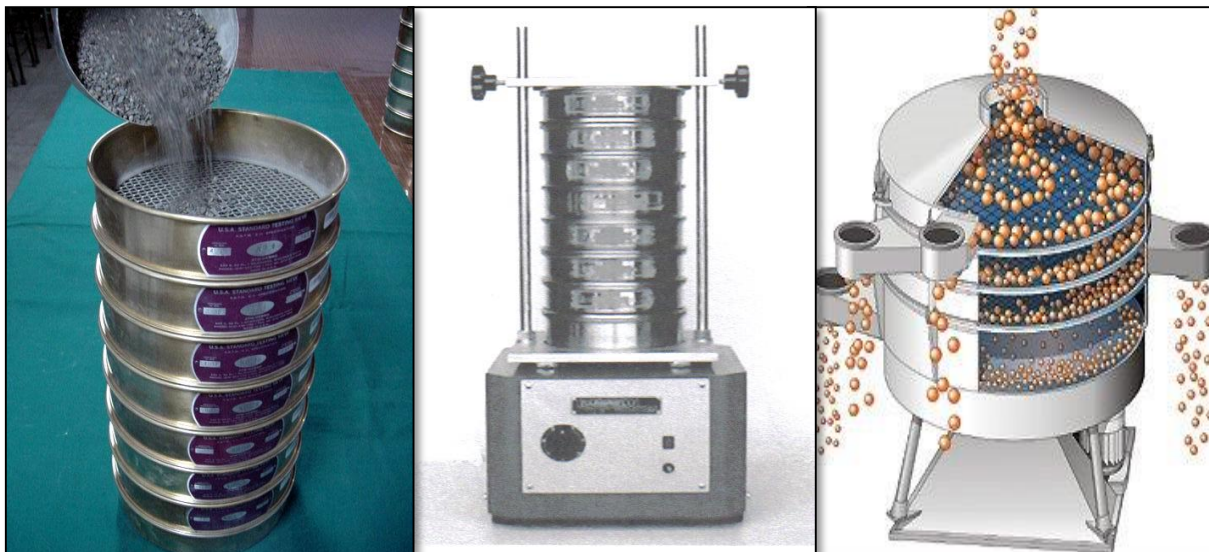


Figura 2. Distribución granulométrica metodo de tamizado en seco.

Fuente. <http://www.uca.edu.sv/mecanica->

[estructural/materias/materialesCostruccion/guiasLab/ensayoAgregados/GRANULOMETRIA.pdf](http://www.uca.edu.sv/mecanica-estructural/materias/materialesCostruccion/guiasLab/ensayoAgregados/GRANULOMETRIA.pdf).

2.3.6. Índice de plasticidad

Análisis de laboratorio que se realiza para determinar la plasticidad que tiene una muestra, por medio de la capacidad para absorber una cierta cantidad de agua; existen varios métodos, siendo los más conocidos el índice de plasticidad de Atterberg y, el índice de plasticidad de Pfefferkorn.

$$IP = \frac{mm \times ht}{100\%}$$

Fórmula 3. Índice de plasticidad

Dónde:

IP. Índice de plasticidad.

mm. Masa de la muestra en gramos.

ht. Humedad de trabajo en %.

2.3.7. Contracción lineal

Control en sus dimensiones, que se le realiza al material, para determinar el comportamiento del mismo durante el secado y, la cocción y se determina según las siguientes formulas:

$$CS = \left(\frac{lh - ls}{lh} \right) \times 100\%$$

Fórmula 4. Control lineal en seco

Dónde:

CS. Contracción seca en %.

lh. Longitud húmeda en milímetros.

ls. Longitud seca en milímetros

$$CC = \left(\frac{ls - lc}{ls} \right) \times 100\%$$

Fórmula 5. Control lineal en cocido

Dónde:

CC. Contracción cocida en %.

ls. Longitud seca en milímetros.

lc. Longitud cocida en milímetros

2.3.8. Pérdidas de masa

Control de masas que se le realiza al material, para determinar las pérdidas que sufre el mismo durante el secado y la cocción y, se determina según las siguientes fórmulas (Moreno Quintero & Pabón Acevedo, 2017).

$$PPS = \left(\frac{mh - ms}{mh} \right) \times 100\%$$

Fórmula 6. Pérdidas de masa en seco

Dónde:

PPS. Pérdidas por secado en %.

mh. Masa húmeda en gramos

ms. Masa seca en gramos

$$PPC = \left(\frac{ms - mc}{ms} \right) \times 100\%$$

Fórmula 7. Pérdidas de masa en cocido

Dónde:

PPC. Pérdidas por cocción en %.

ms. Masa seca en gramos.

mc. Masa cocida en gramos

2.3.9. 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. La Resistencia de Materiales combina los datos de material, geometría y fuerzas, aplicadas para generar modelos matemáticos que permiten analizar la resistencia mecánica de los cuerpos. El ensayo de tracción es el ensayo más típico para comprobar la resistencia mecánica de un material, con una probeta de geometría normalizada (Gilabert, Zumaquero, Machí, Toledo, & Gómez-Tena, 2015).

$$RMF = \left(\frac{3 \times c \times l}{2 \times a \times e^2} \right)$$

Fórmula 8. Resistencia mecánica a la flexión en tres puntos

Donde:

RMF. Resistencia mecánica a la flexión en kgf/cm² o N/cm².

C. Carga de rotura en N o kgf.

l. Longitud del espécimen en milímetros.

a. Ancho del espécimen en milímetros.

e. Espesor mínimo de rotura del espécimen en milímetros

2.3.10. Porcentaje de absorción de agua

Control realizado para determinar la absorción de agua de los productos a base de arcilla; este se puede desarrollar por el método de inmersión a 24 h, por el método de ebullición en un tiempo de 2 h y por el método de vacío (Figura 3); su fórmula, es la siguiente (Gelves, Monroy, Sánchez, & Ramírez, 2013):

$$Aa = \left(\frac{mAa - mc}{mc} \right) \times 100\%$$

Fórmula 9. Porcentaje de absorción de agua

Dónde:

Aa. Porcentaje de absorción de agua en %.

mAa. Masa del espécimen después del ensayo de absorción de agua en gramos.

Mc. Masa cocida en gramos.



Figura 3. Metodos para el desarrollo de la propiedad estructural (Absorción de agua).

Fuente. Centro de Investigación de Materiales Cerámicos -CIMAC-.

2.3.11. Análisis termogravimétrico (TGA)

Determina la pérdida o ganancia de masa que sufre una muestra, en función de la temperatura y/o el tiempo; complementa el ATD, pues permite distinguir entre las reacciones que implican pérdida de peso de las que no lo hacen; se usa para determinar de forma cuantitativa la descomposición de los materiales, cuando las reacciones son identificadas.

2.3.12. Análisis termodiferencial (ATD)

Consiste en la medida de la diferencia de temperatura dentro de un material, en un ciclo de cocción; detecta multitud de transformaciones que implican cambios energéticos, que son debidas a fenómenos químicos y físicos. Los cambios demostrados pueden ser endotérmicos (adsorción de calor) o exotérmicos (desprendimiento de calor). En los picos se analizan el tipo de intercambio térmico, la altura, forma y área de los picos y la temperatura a la que estos se producen (Barba, y otros, 2002).

2.3.13. Fluorescencia de rayos X (FRX)

Es la determinación de la abundancia absoluta o relativa (muchas veces, expresada como concentración) de una, varias o todas las sustancias químicas presentes en una muestra, que puede ayudar en la determinación de sus propiedades específicas.

2.3.14. Difracción de rayos X (DRX)

Comprende la identificación de los minerales arcillosos simples e inter estratificados (caolinitas, micas, esmécticas, cloritas) y de los demás minerales presentes en mayor o menor proporción (cuarzo, feldespatos, minerales de hierro, piritas, yeso, carbonatos, etc); su estudio se realizará a partir del análisis por difracción de rayos x, en muestras tanto orientadas como sin orientación definida, microscopía óptica y microscopía electrónica EDAX (Cely Illera, 2016).

2.4. Marco Conceptual

2.4.1. Arcilla

La materia prima principal del proceso de fabricación de la cerámica, es la arcilla. La arcilla es un material natural, cuyas dimensiones de acuerdo diferentes sistemas de suelos, es menor o igual a dos μm (<0.002 mm), que está constituido por minerales en forma de granos; puede ser un material muy moldeable (plástico, característica fundamental) al ser combinado con agua, y luego se endurece al secar o al ser sometida al calor. Existe una gran variedad de arcillas utilizadas en la fabricación de cerámica; las cuales dependen de los distintos usos que se les han dado. Entre la tipología de arcillas están, la arcilla conocida como caolinita, de menor plasticidad y mayor refractariedad, muy usadas para productos que resistan altas temperaturas, las montmorillonitas, de mayor plasticidad y menor refractariedad y las illitas cuyas características están intermedia entre las dos anteriores. Las diferencias más marcadas, se reflejan en su composición química y mineralógicas, que afectan directamente en las propiedades físico-químicas de los productos obtenidos y en las emisiones residuales, generadas durante todo el proceso (Reyes Jaramillo, 2000).

2.4.2. Extrusión

Es la fase de producción donde se conforman los productos cerámicos, mediante el empuje transversal de una masa plástica; esta se inicia con la molturación de las materias primas. El polvo resultante se somete a un proceso de humectación normalmente en una amasadora; posteriormente, se introduce la masa plástica a la extrusora, la cual pasa por una cámara de vacío, donde el husillo del cuerpo de extrusión, la hace avanzar hacia la boquilla de extrusión en la cual se le confiere a la masa plástica la forma deseada, para que finalmente, un sistema de corte, dotado de varias cuchillas metálicas, definan la longitud en verde de las piezas.

Este proceso conlleva dos inconvenientes; por un lado, limita el tamaño de los revestimientos, en la región se trabaja con formatos de máximo $45\text{ cm} \times 35\text{ cm}$, desventaja frente a los productos de prensado que llegan hoy en día a formatos de $420\text{ cm} \times 120\text{ cm}$, denominadas placas cerámicas. Y por otro lado, implica la necesidad de realizar su colocación, utilizando una junta de mayor tamaño, lo cual, desde un punto de vista comercial y por razones estéticas, suele penalizar a las baldosas extrudidas frente a los productos conformados por prensado (Gelves Diaz, Sánchez Molina, & Peña Rodríguez, 2009) (Gelves, Monroy, Sánchez, & Ramírez, 2013).

2.4.3. Prensado

Es la fase de producción donde se conforman los productos cerámicos, mediante la compactación del polvo granulado semi-seco; este sistema produce piezas con menor cantidad de agua, que puede oscilar entre el 3% al 10% de humedad (prensado en seco) y/o el prensado en semi-seco (10-15% de humedad) (SACMI, Asociación española de técnicos cerámicos, 2004).

2.4.4. Cocción

La razón de ser de la cerámica, así como su importancia económica, se basan en el hecho de que la cocción de las pastas previamente moldeadas, provoca una modificación fundamental en sus propiedades, dando lugar a un material duro de consistencia pétreo e inalterabilidad de forma, elevando su dureza y resistencia mecánica, resistente al agua y a los productos químicos y que posee, además, características excelentes y muy diversificadas.

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

En la industria cerámica, se entiende por cocción, el proceso físico-químico de calentamiento, de acuerdo con un plan preestablecido, de las piezas crudas moldeadas, seguido de un enfriamiento, según un plan igualmente bien definido. En él, las arcillas se transforman en silicatos de aluminio cristalinos sin hidratar (Barba, y otros, 2002).

2.4.5. Horno colmena o de llama invertida

Se emplean para la cocción de materiales especiales como tejas, ladrillos y tubos, productos que requieren una elevada temperatura de cocción. Una ventaja de estos hornos (Figura 4), es que el producto no está en contacto directo con el combustible y los residuos, como es el caso de los hornos campana, rural y de llama horizontal.



Figura 4. Horno colmena regional.

Fuente. Empresa Margress.

En la zona metropolitana de Cúcuta, existen alrededor de 220 hornos de este tipo, los cuales se pueden encontrar en diferentes tamaños, entre los que se encuentran desde los siete metros de diámetro interno, hasta hornos de trece metros de diámetro, siendo los más comunes los de diez y once metros, aunque sus características de diseño no presentan diferencias notables (Sánchez Molina & Díaz García, 2011).

2.4.6. Hornillas o firebox

Son las zonas del horno donde se introduce el combustible y se lleva a cabo su combustión. En las empresas cerámicas de la zona, el combustible empleado es el carbón mineral. La mayoría de los hornos poseen doce hornillas, sin embargo, algunos hornos pequeños poseen ocho o diez hornillas. Entre menor es el espacio existente entre hornillas, menores serán las zonas frías dentro

del horno. Las hornillas encuentran ubicadas a 0,6 metros del suelo y sus dimensiones varían entre 33 y 43 cm de ancho y entre 30 y 40 cm de alto.

2.4.7. Brameras

Son orificios ubicados en la cúpula del horno, las cuales permiten el escape de los gases que se encuentran en el interior del mismo cuando la cocción está en la etapa inicial y final. El número de brameras con que cuentan los hornos, generalmente es igual al número de hornillas, además de la central; aunque existen algunas excepciones, dichas brameras se encuentran al mismo nivel de la cúpula, pero en ocasiones presentan un orden especial, quedando a dos niveles.

2.4.8. Alfacas

Son conductos que permiten el paso de los gases de combustión hacia los ductos, los cuales conducen dichos gases hacia las chimeneas.

2.4.9. Puertas del horno

Permiten el cargue y descargue del material, al inicio y final de la cocción; su cierre, una vez cargado el horno se hace con ladrillo macizo o con bloques cocidos y material arcilloso humectado, que actúa como revestimiento externo.

2.4.10. Chimeneas

Son las que reciben los gases de combustión provenientes de los ductos, para permitir su evacuación. Las chimeneas pueden ser diseñadas para evacuar los gases de uno o más hornos, dos

por lo general. La altura de las chimeneas está establecida por la legislación ambiental colombiana (decreto 02 de 1982), según la cual, es de 15 metros (Sánchez Molina & Díaz García, 2011).

2.4.11. Molienda

El proceso de molienda, se realiza mediante la trituración de la arcilla que es traída directamente de la cantera, en este proceso se obtiene la materia prima con la granulometría y textura necesarias para su posterior conformado. Puede llevarse a cabo de dos formas distintas, por vía seca o por vía húmeda. Las arcillas secas y duras se preparan mejor en instalaciones por vía seca. Este tipo de sistema, asegura la obtención de un porcentaje importante de partículas finas, que se humectan con más facilidad y rapidez, obteniendo una masa muy homogénea y de mayor plasticidad. Como consecuencia se tendrá un mejor acabado y una mayor resistencia mecánica, tanto del material seco como del producto cocido (Zaballa, 1972).

2.4.12. Secado

El secado de un cuerpo arcilloso crudo, es el mecanismo por el cual se elimina el agua que lo humedece. El secado es necesario para que la cocción del cuerpo cerámico se realice adecuadamente. El mecanismo de secado es muy similar para los distintos cuerpos arcillosos. No obstante, a una determinada velocidad de secado, los efectos que se generan sobre cada cuerpo pueden ser muy diferentes entre cada uno de ellos, dependiendo de su naturaleza química y cristalográfica, de su granulometría y de su historia previa antes de llegar al secadero. Las variaciones que se producen durante el secado y que son susceptibles de ser observadas, ocurren sobre los siguientes parámetros: la cantidad de agua residual, las dimensiones longitudinales,

superficiales y de volumen, la resistencia a la flexión y la plasticidad (Escandino, Gallego, Ibañez, & Negre, 1987) (Barba, y otros, 2002).

2.4.13. Gresificación

La gresificación de una pasta, es llevarla a una temperatura donde el porcentaje de absorción de agua es mínimo, coincidiendo con el máximo de contracción de la pasta en la cocción. Este punto normalmente es menor del 1% de absorción de agua. La temperatura dependerá de los componentes de la pasta. A la representación de estas dos variables, se le denomina diagrama de gresificación.

Una pasta gresificada, se caracteriza por ser un cuerpo duro, algo rústico, tiene buena sonoridad y poca porosidad. Muchas veces, la gresificación de la pasta lleva a disminuir el porcentaje de absorción de agua, a menos del 1% sin el uso del esmalte, por tanto, es común ver muchas baldosas con alta resistencia a la abrasión usadas en tráfico alto; además, es posible ver producto utilitario de mesa sin esmaltar y perfectamente impermeable, sólo porque se obtiene un producto gresificado.

La gresificación se consigue mediante la misma sinterización de los materiales durante la cocción, y una posterior vitrificación, ayudada por materiales fundentes como el feldespatos y la caliza. La pasta de gres puede estar compuesta de elementos refractarios, pero el contenido de fundentes como el feldespatos y la caliza, hace que se cree una matriz vítrea durante la cocción, rodeando las partículas refractarias que hacen parte de la pasta. Generalmente, la gresificación de

una pasta no produce productos blancos, sino grisosos y/o oscuros (Escardino Belloch, Amoros Albaro, & Enrique Navarro, 1981).

2.4.14. Sinterización

Es una técnica de procesamiento utilizada para producir materiales con densidad controlada, a partir de polvos metálicos o cerámicos por aplicación de energía térmica. Durante la sinterización, las partículas se unen por coalescencia mediante difusión en estado sólido a altas temperaturas, pero por debajo del punto de fusión compuesto que se desea sinterizar (Djangang, y otros, 2008).

2.4.15. Contracción

Está determinada por la disminución del volumen sufrido por la pieza durante el proceso de secado, cocción y enfriamiento del material. Debido a la evaporación del agua, las partículas arcillosas se van aproximando entre sí, hasta que se tocan, el material alcanza la dureza del cuero y disminuye el tamaño de los poros. A medida que el material pierde humedad, la contracción cesará tan pronto como las partículas dejen de moverse al colisionar (Escardino Belloch, Amoros Albaro, & Enrique Navarro, 1981).

2.4.16. Dilatación

Se denomina dilatación térmica, al aumento de longitud, volumen o alguna otra dimensión métrica que sufre un cuerpo físico, debido al aumento de temperatura que se provoca en él por cualquier medio (Djangang, y otros, 2008) (Lee & Yeh, 2008).

En un sólido, las moléculas tienen una posición razonablemente fija dentro de él. Cada átomo de la red cristalina vibra sometido a una fuerza asociada a un pozo de potencial; la amplitud del movimiento dentro de dicho pozo dependerá de la energía total de átomo o molécula. Al absorber calor, la energía cinética promedio de las moléculas aumenta y con ella, la amplitud media del movimiento vibracional (ya que la energía total será mayor tras la absorción de calor). El efecto combinado de este incremento, es lo que da el aumento de volumen del cuerpo (Lee & Yeh, 2008).

2.4.17. Porosidad

Es la capacidad de un producto cerámico cocido de retener agua mediante la porosidad constituida por una red continua de conductos capilares (porosidad abierta), la cual determina el grado de maduración cocida del producto y evalúa sus propiedades estructurales que pueden ser requeridas para una aplicación dada. La porosidad de las arcillas sometidas a cocción es una característica importante. Puede hacerse una distinción entre los poros abiertos, que se presentan a temperaturas inferiores a la de maduración (o estabilización), y los poros cerrados que aparecen a veces por encima de dicha temperatura de maduración (Escardino Belloch, Amoros Albaro, & Enrique Navarro, 1981).

2.4.18. Absorción de agua

Es la proporción de poros que se llenan de agua cuando el material es humedecido. Este ensayo es fundamental para clasificar los distintos tipos de materiales cerámicos e influye sobre otras características de los mismos (resistencia al congelamiento), entre otros. El método consiste en la inmersión de la pieza en un recipiente con agua. La pieza es luego escurrida y secada superficialmente, a los efectos de ser pesada, y medir así, el porcentaje de variación de peso

sufrido, contra el peso de la misma pieza totalmente seca. Normalmente los productos porosos, absorben agua hasta un 18% de su peso, y los productos vítreos pueden absorber hasta un 0.12 % de su peso (Barba, y otros, 2002).

2.4.19. Controles básicos

Son controles que se caracterizan por la sencillez y la rapidez con que se realiza el control; su duración no es mayor a seis horas y sirven para comprobar o no la conformidad del material. Entre los análisis que se realizan, se encuentran el control de humedad, retenido sobre tamiz, granulometría por tamizado vía seca, contenido de carbonato de calcio (CaCO_3), pérdidas por calcinación, viscosidad en suspensión, y control de atributos.

2.4.20. Controles complementarios

Son controles que se caracterizan por ser más exhaustivos y se llevan a cabo cuando la muestra no ha superado el control básico; estos controles pueden durar mínimo veinticuatro horas; entre los análisis que se realizan, se encuentran el índice de plasticidad, granulometría por hidrómetro, curva de defloculación, densidad aparente, control lineal, absorción de agua, dilatometría, análisis mineralógico y químico, entre otros controles (Sánchez, Ginés, Agramunt, & Monzó, 1998).

2.5. Marco Legal

2.5.1. Estatuto estudiantil.

Estatuto Estudiantil Universidad Francisco de Paula Santander. El Consejo Superior Universitario mediante el Acuerdo N° 69 de septiembre 5 de 1997, expide el Estatuto Estudiantil de la Universidad Francisco de Paula Santander. Título V. Del trabajo de grado:

Artículo 139. El trabajo de grado es un componente del plan de estudios y tiene como objetivos:

Brindar al estudiante la oportunidad de manifestar de manera especial su capacidad investigativa, su creatividad y disciplina de trabajo mediante la aplicación integral de los conocimientos y métodos requeridos.

Servir como instrumento de extensión a la comunidad y medio de generación del conocimiento.

Facilitar al estudiante su participación y concurso en la solución de problemas comunitarios.

Facilitar al estudiante una mayor autonomía en el desarrollo de trabajos científicos, científico tecnológicos y profesionales propios de su formación.

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

Proyecto de Investigación.

Monografía.

Trabajo de investigación: generación o aplicación de conocimiento.

Sistematización del conocimiento.

Proyecto de Extensión.

Trabajo social

Labor de consultoría en aquellos proyectos en los cuales participe la Universidad.

Pasantía 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.

2.5.2. Normas técnicas

Tabla2.Normas Técnicas.

CÓDIGO	NOMBRE
Normas APA.	Normas de la American Psychological Association sexta edición, documentación. Proyecto de grado o decualquier tipo de documentos de investigación.
NTC 1522	Suelo. Ensayo para determinar la granulometria por tamizado.
NTC 2401	Arcillas grasas para la industria de la cerámica.
NTC 1776	Método de ensayo para determinar el contenido total de humedad evaporable por secado de los agregados.
NTC 3674	Ingeniería civil y arquitectura. Practica para la reducción del tamaño de las muestras de agregados, tomadas en campo, para la realización de ensayos.

NTC 4630	Metodo de ensayo para la determinación del limite liquido, del limite plastico y del índice de plasticidad de suelos cohesivos.
NTC 4321-3.	Baldosa Cerámica. Parte 3. Metodo de ensayo para determinar la absorción de agua, de la porosidad abierta, de la densidad relativa aparente y de la densidad aparente.
NTC 4321-4.	Baldosa Cerámica. Parte 4. Metodo de ensayo para determinar el modulo de rotura y la resistencia a la flexión.
NTC 919	Baldosas ceramicas. Definiciones, clasificacion, características y rotulado.
ISO 13006.	Ceramic tiles — Definitions, classification, characteristics and marking.

Fuente. Autores

2.5.3. Métodos internos.

Los métodos para realizar los diferentes ensayos serán determinados según el libro: “MANUAL PARA EL CONTROL DE LA CALIDAD DE MATERIA PRIMAS ARCILLOSAS”. (Amorós, Sánchez, García-Ten, Sanz, Monzó).

3. Diseño Metodológico

3.1. Tipo de Investigación

El presente estudio, se realizó mediante una investigación de tipo descriptiva, ya que al evaluar las propiedades térmicas y tecnológicas de las arcillas previamente caracterizadas, se identificaron distintos parámetros que se tienen en cuenta en el análisis de la información de los datos obtenidos durante el desarrollo del proyecto, que contribuyeron a aspectos significativos a nivel académico, y como resultado se demostró a las empresas de la región, que el proceso propuesto es viable, para su posterior realización.

3.2. Población y Muestra

3.2.1. Población

Como población, se tomaron las arcillas pertenecientes a las tres formaciones más comunes de la región, como fue la formación Guayabo, León y Carbonera.

3.2.2. Muestra

Para la muestra se utilizó arcilla roja proveniente de la formación Guayabo, de una mina del municipio de Villa del Rosario en Norte de Santander.

3.3. Instrumentos para la Recolección de Información

3.3.1. Fuentes Primarias

Estas se refieren a la información obtenida de los proyectos de investigación del área de los materiales cerámicos realizados anteriormente, así como tesis y libros que datan de temas similares al presente estudio.

3.3.2. Fuentes secundarias

Esta es la información que se encontró en todo tipo de artículos de investigación, que fueron publicados en revistas tanto nacionales como internacionales, así como la lista de repositorios de las mejores universidades del país, para dar mayor veracidad al presente estudio. También se tuvo en cuenta la información que se encontró en la web, como libros, artículos etc.

3.4. Análisis de la Información

El análisis de la información se hizo de manera cualitativa, ya que fué necesario analizar los datos suministrados, y observar que no eran lejanos de la realidad y de las necesidades propias de la empresa.

También se analizó de manera cuantitativa, cuando se debía estructurar el diagnóstico de las propiedades, con el apoyo de los resultados arrojados por el estudio de las muestras que se enviaron al laboratorio, para evaluar las condiciones y características de las mismas.

4. Resultados y discusión.

4.1. Preparación de la materia prima para la fabricación de especímenes

Para el desarrollo del proyecto de investigación se llevaron a cabo varios procesos experimentales, los cuales fueron necesarios para ejecutar cada uno de los objetivos de este. La primera parte, la preparación de la materia prima, consistió en dos actividades. Inicialmente, se realizó un muestreo del material arcilloso (Figura 5). La materia prima fue obtenida directamente de la mina, esta se ubica en el municipio de Villa del Rosario, la arcilla pertenece a la formación Guayabo, es de tipología illítico - caolinítica, de color rojizo y de textura de plasticidad media, comparables con las arcillas de la región y con propiedades similares a materiales ubicados en esta formación.

El muestreo se realizó en uno de los frentes de la mina y su método de selección fue de manera intencional debido a la disposición limitada que se tenía sobre este yacimiento. Se hizo en forma de zigzag, mediante una cuadrícula dibujada sobre el plano del frente y sus puntos de extracción y recolección se hicieron en un recorrido ascendente; cabe anotar, que la cuadrícula sirve de guía para conocer la ubicación de estos puntos, teniendo en cuenta que el tamaño y el fraccionamiento de estos se realizaron de forma arbitraria (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y certificación -ICONTEC-, 1995).



Figura 5. Muestreo de la materia prima.

Fuente. Autores.

Durante el proceso de muestreo se tomaron 11 puntos, de estos se recolectaron 15 kg de arcilla en cada uno, los cuales, se recogieron en bolsas plásticas, para después enumerarlos. Finalmente, se llevaron al Laboratorio de Formación Cerámica de la universidad con el fin de dar inicio a los diferentes ensayos que determinaron las propiedades físicas, mecánicas y estructurales del material (Figura 6).

A cada una de las 11 muestras, se le realizó la caracterización física, mediante el control básico, como fué el contenido de humedad, para determinar la humedad con la que llegaron las muestras y de esta manera determinar el tiempo de secado de cada una. Con el dato de humedad, se procedió a realizar el proceso de secado para extraerle la humedad adquirida durante los procesos de meteorización. El proceso de secado se realizó en una estufa eléctrica a 110 ± 5 °C durante 24 h hasta obtener una humedad inferior al 10% (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación -ICONTEC-, 1994). Seco el material se realizó a cada muestra una pre-trituración manual debido al tamaño de grano heterogéneo, con este procedimiento el material se llevó a un

tamaño de partícula inferior a 4,00 mm (Malla ASTM 5). Con el material homogéneo, se procedió a mezclarlo para obtener una muestra representativa, este procedimiento se realizó de manera manual hasta lograr conseguir un color uniforme en toda la muestra. Posteriormente, se separó el material para los controles siguientes mediante un cuarteo, utilizando la técnica del apilamiento en cono (este procedimiento se realizó hasta conseguir un patrón con características similares).



Figura 6. Muestras recolectadas para el desarrollo del proyecto.

Fuente. Autores.

Del material obtenido de la pre-trituración, se tomó una cantidad de 50 kg para cada una de las moliendas (húmeda y seca). La molienda vía seca (MS) se realizó en un molino de martillos hasta obtener un tamaño de partícula pasante por malla ASTM 10 (2,00 mm) y la molienda en húmedo (MH), se realizó en un molino Alsing. Los dos equipos están a escala semi-industrial, con el objetivo de simular al máximo los procesos realizados por las empresas regionales (Figura 7). La arcilla tratada mediante el proceso por vía seca se tamizó por malla ASTM 10 como se mencionó con anterioridad, y luego, fue almacenada en bolsas para evitar contacto con otras sustancias que pudieran causar contaminación y alteración en los resultados finales.

Para el proceso vía húmeda, fue necesario hacer el cálculo de la carga del molino. El cargue del molino, consistió en calcular proporcionalmente la cantidad de arcilla, bolas de alúmina y agua para dar inicio a la molienda. En este proceso se tuvo en cuenta la capacidad volumétrica del molino, la densidad de los materiales y el volumen de las bolas de alúmina, y de esta manera, calcular todas las masas necesarias. Para el tiempo de molienda, se hizo necesario, efectuar pruebas de ensayo y error, y de esta manera ajustarlo a los tiempos utilizados por las empresas regionales. Este ajuste del tiempo se controló en la barbotina mediante parámetros como el residuo industrial (3% al 9%), este se realizó en malla ASTM 230, la densidad ($1,60 \text{ g/cm}^3$ a $1,80 \text{ g/cm}^3$) evaluado mediante un picnómetro y la viscosidad (18 s a 25 s) por medio de la copa Ford N° 4.

Después de realizada la verificación se logró obtener un tiempo de molienda para el proceso vía húmeda en 45 min, con este tiempo, se procedió a programar las moliendas restantes; en total se hicieron 5 moliendas. De igual forma, la verificación de la barbotina se repitió aleatoriamente en todo el proceso para llevar un control sobre el mismo. La barbotina resultante de esta etapa se depositó en bandejas metálicas y se llevó a un secado a una temperatura de $110 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ por 24 h. El material seco, se molturó y se tamizó por malla ASTM 10; luego fue almacenado en bolsas para evitar la contaminación.

Finalizadas las dos moliendas, se muestreo de nuevo cada material, se tomaron 5 kg de cada molienda y se realizaron controles como, retenido sobre tamiz en malla ASTM 230, un índice de plasticidad por el método de Casagrande y una granulometría por hidrómetro 152 H (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación -ICONTEC-, 1987) (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación -ICONTEC-, 1979).



Figura 7. Equipos y parámetros de molienda.

Fuente. Autores.

De acuerdo con las características físicas y los resultados arrojados en cada uno de los controles básicos que se realizaron a cada muestra, se puede detallar inicialmente, que la molienda afecta las características intrínsecas del material, pues como se puede observar en los resultados del retenido sobre tamiz, el residuo en la molienda en húmedo (8,1%) se redujo en un 22,9% en comparación con el de la molienda en seco (10,5%), lo que nos lleva a pensar que después de la molienda en vía húmeda el material está más homogéneo y uniforme. Esta reducción del tamaño de grano grueso incrementa el grano fino, aumentando la densificación del material. Aunque en teoría esto

puede ser problemático en procesos como el secado y la cocción, por la eliminación del agua y otros gases producto de las reacciones internas, en términos generales, esta densificación ayudaría a evitar defectos comunes como deformaciones en los calibres y grietas, problemas frecuentes en las empresas regionales.

Adicionalmente, como se observa en la figura 8, el análisis granulométrico por hidrómetro 152 H, análisis que define la aptitud cerámica de los materiales y su posible uso, se observa una modificación en la aptitud cerámica de las dos muestras. En la muestra por vía húmeda sus componentes texturales arrojaron en la fracción arcillosa 46,4 %, en la fracción limosa 32,1% y en la fracción arenosa 21,5%, arrojando una textura de suelo arcillosa, y con una aptitud cerámica según Winkler para fabricar ladrillos de perforación horizontal (bloques), bevedillas y piezas de paredes delgadas y de gran tamaño. Mientras la muestra por vía seca, arrojó en la fracción arcillosa 51,6 %, en la fracción limosa 18,3% y en la fracción arenosa 30,1%, arrojando una textura igualmente arcillosa, pero con una aptitud cerámica para fabricar tejas, ladrillos de perforación vertical (ladrillo cara vista) y baldosas. Esto indica que el proceso de preparación afecta las características finales del material, y aunque su textura es principalmente arcillosa, rasgo común en las arcillas de la región, con el simple hecho de modificar su método de molienda, se puede llegar a modificar en teoría el uso final de la materia prima.

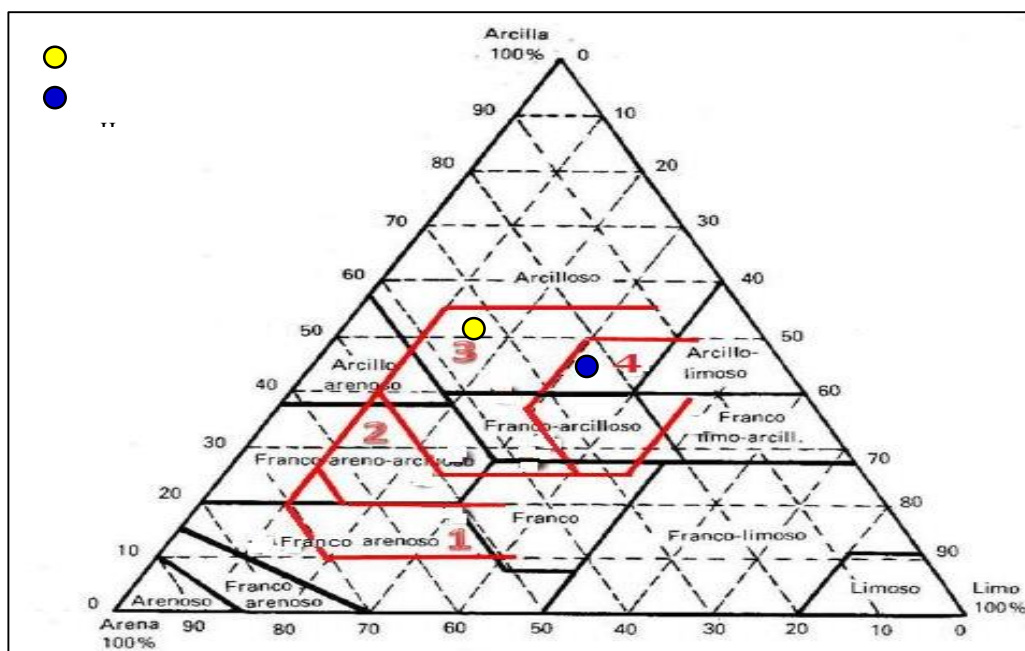


Figura 8. Triángulo de aptitudes de Winkler.

Fuente. Autores.

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, tanto para la muestra molida por vía seca (MS) como para la vía húmeda (MH), con el objetivo de humectar la masa plástica (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación -ICONTEC-, 1999). De los resultados obtenidos se puede inferir que el material posee una plasticidad media-alta en comparación con las muestras de la región, las cuales están en promedio entre el 15% al 25%. Como puede verse, la muestra MS arrojó un índice de plasticidad de 18,4% y MH de 20,7%, generando un incremento del 12,5%, lo que indica que la muestra MH, posee mayor porcentaje de partículas finas en su estructura como ya se había mencionado, afectando la absorción de agua de la materia prima y un mayor porcentaje de esta.

Según el pronóstico de extrusión de Casagrande, figura 9, las muestras a pesar de su plasticidad van a tener una extrusión aceptable en los dos casos, la diferencia en las dos muestras se puede evidenciar, en que el material procesado por vía húmeda va a tener un tamaño de partícula más pequeño, esto podría atribuirse principalmente y complementando lo antes mencionado, a que en las instalaciones por vía seca la granulometría de las arcillas está alrededor de un 82% de partículas inferiores a 0,5 mm y en instalaciones por vía húmeda la granulometría de las arcillas está alrededor de un 28% de partículas inferiores de 0,5 mm, como menciona Fernández Abajo (Fernández Abajo, 2000) en su libro (p.100).

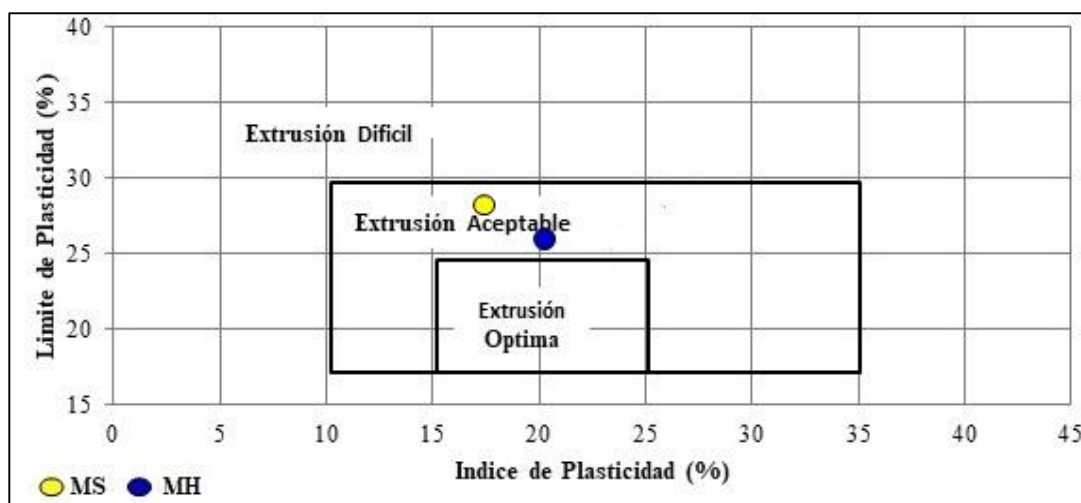


Figura 9. Pronóstico de extrusión (Método de Casagrande).

Fuente. Autores.

4.1.1. Conformado por extrusión del material

Posteriormente, después de haber realizado la caracterización de las muestras, se procedió a desarrollar el proceso de conformado de las mismas, este se realizó mediante el proceso de extrusión. El material de cada molienda se húmedo (Figura 10) utilizando el dato de índice de plasticidad.



Figura 10. Amasado del material.

Fuente. Autores.

Luego de humectado MS y MH, se dejaron en reposo para homogenización por 15 h, con el objetivo de garantizar una humedad uniforme en toda la masa plástica. Pasadas las 15 h, se inició el proceso de conformado empleando para este fin la extrusora sin vacío, previo al proceso, se realizó el montaje del equipo. La eliminación del aire ocluido dentro de la masa plástica se realizó de dos formas, inicialmente de forma manual amasando el material humectado y luego se llevó a la laminadora para eliminar la mayor cantidad de aire posible. Finalmente, se completó esta eliminación mediante la ayuda de la extrusora, pasando completamente todo el material antes de iniciar el moldeado del primer producto.

En la figura 11, se detalla el conformado de las probetas para el desarrollo del proyecto. Se moldearon probetas prismáticas en forma de revestimiento tipo fachaleta de $25\text{ cm} \times 8\text{ cm} \times 1\text{ cm}$. Con las probetas conformadas se midieron dimensiones (longitud, ancho

y espesor) y masa, se llevaron a un secado a temperatura ambiente durante 24 h; después se llevaron a la estufa de secado por un tiempo de 12 h a una temperatura de 60 ± 5 °C.



Figura 11. Conformado por extrusión de las probetas.

Fuente. Autores.

Finalmente se incrementó gradualmente la temperatura en 10 °C/h hasta alcanzar una temperatura de 110 ± 5 °C, manteniéndola durante 24 h. 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 promedios usadas en la mayoría de las empresas regionales. Luego de cocción se midieron nuevamente dimensiones y masa y se realizaron los respectivos análisis para el desarrollo del proyecto.

4.1.2. Influencia de la molienda en vía húmeda en los aspectos tecnológicos en verde

Después del conformado de los especímenes de MS y MH, se procedió a evaluar inicialmente el comportamiento húmedo del material y el efecto que generó el proceso de preparación de las dos moliendas en la estructura interna del mismo y el empaquetamiento de partículas. Pues como se sabe, el tamaño del material que resulta después del proceso de molienda, afecta e influye directamente en la compactación, resistencia mecánica y las contracciones en seco y en cocido, aspectos y propiedades tecnológicas que pueden afectar de manera directa la durabilidad del material y la resistencia mecánica del mismo. Generando la posible aparición de defectos estructurales que disminuyen la calidad técnica del producto cerámico (SACMI, Asociación española de técnicos cerámicos, 2004).

Como se observa en la figura 12, los valores de densidad de las probetas en estado húmedo obtenidas después del conformado por extrusión, arrojan una mayor densificación para los especímenes preparados por molienda vía seca, mostrando una densidad de $2,036 \text{ g/cm}^3$, en comparación con los especímenes de la molienda vía húmeda que fue de $1,826 \text{ g/cm}^3$. Lo que indica que la molienda vía seca genera mayor uniformidad de partículas, esto es debido posiblemente a lo mencionado con anterioridad, que en instalaciones por vía seca hay mayor porcentaje (82%) de partículas menores a $500 \mu\text{m}$ en comparación con la molienda húmeda (28%), razón por la cual el incremento de densificación de MS con respecto a MH fue de 10,31% (Fernández Abajo, 2000). Este valor muestra que los métodos de preparación afectan en alto porcentaje la acomodación de las partículas internas en el momento del moldeado del material. Y para este caso en particular, muestra, que a pesar que la molienda en húmedo disminuye el tamaño de partícula, esto no asegura que dentro de la etapa de conformado se comporte de manera típica,

pues lo que afecta el comportamiento del material en el moldeo es básicamente la homogeneidad de las partículas y no la uniformidad de las mismas.

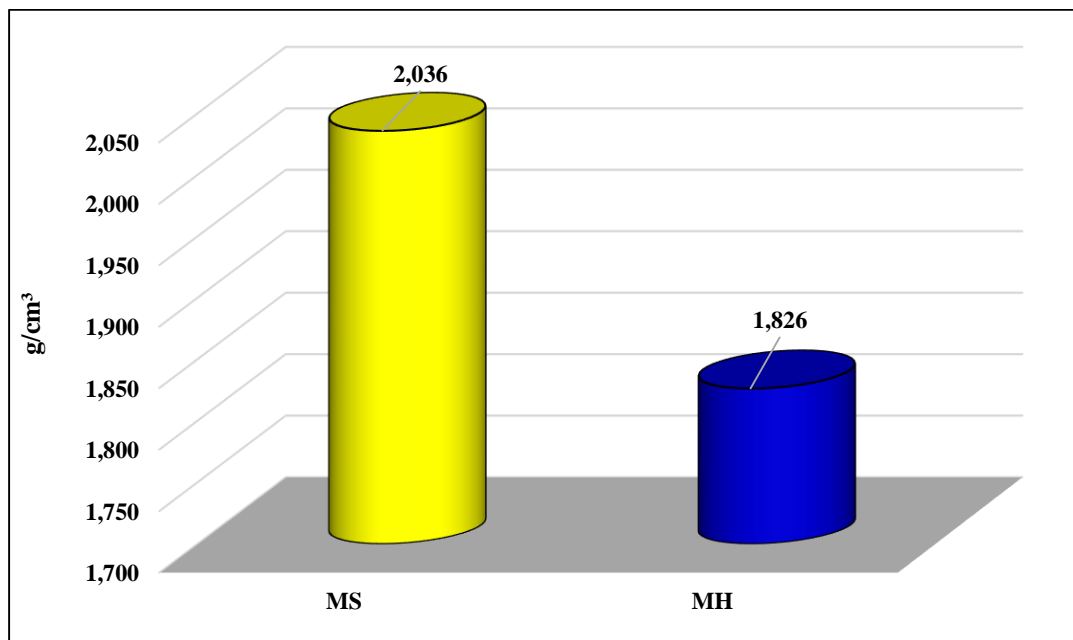


Figura 12. Densificación húmeda de los especímenes.

Fuente. Autores.

4.1.3. Influencia de la molienda en vía húmeda en los aspectos tecnológicos en secos

El secado es una operación que consiste principalmente en evaporar el agua contenida en un producto cerámico moldeado o no, esta agua es agregada a la pasta en el amasado y/o en la atomización, y es eliminada mediante la evaporación. Para este fin, se necesita separar este cuerpo líquido del cuerpo sólido, y así obtener la pieza en condiciones óptimas para la etapa de cocción, con una humedad menor al 1%. Esta es sin duda la operación más crítica de todo el proceso de fabricación de un producto cerámico, pues es aquí donde ocurre aproximadamente el 75% de los defectos estructurales del material (Restrepo Baena, 2011).

Existen diversidad de métodos para eliminar el agua de conformado, pero el más utilizado es el de evaporación. En la región, y para el conformado por extrusión, el 90% de las empresas utilizan el secado natural, no solo por el bajo costo del proceso, sino además, porque en la región, y especialmente el área metropolitana de Cúcuta, se presta para este tipo de secado, pues la temperatura promedio es de 30 ± 5 °C, en días no tan calurosos. Razón por la cual, se hace necesario que los procesos de preparación del material sean los más exigentes, y de esta manera lograr que el producto no genere problemas en esta etapa (Sánchez Molina & Ramírez Delgado, El Clúster de la cerámica del área metropolitana de Cúcuta, 2013).

Estos problemas son debido principalmente al método antes mencionado, pues en este secado no se garantiza, a pesar de la temperatura regional, que la eliminación del agua se uniforme. Esta uniformidad del proceso se logra cuando la velocidad de evaporación no supera a la velocidad de difusión del agua dentro de la estructura del material, lo que causa diferencias de tensiones internas, que pueden llegar a fisurar o deformar el material. Por consiguiente, se debe controlar aspectos tecnológicos como densificación, contracciones y pérdidas de masa para lograr un óptimo producto antes de ingresarlo a cocción.

Teniendo en cuenta esto, en las figuras 13, 14 y 15, se analizaron los comportamiento de los especímenes, la influencia de las moliendas y el efecto que generaba las preparaciones en la estructura interna del material durante la etapa de secado. Como puede verse en la figura 13, la molienda en húmedo, incrementa en comparación con la seca un 5,91% la densidad del material, generando un comportamiento completamente diferente a la densidad húmeda antes analizada.

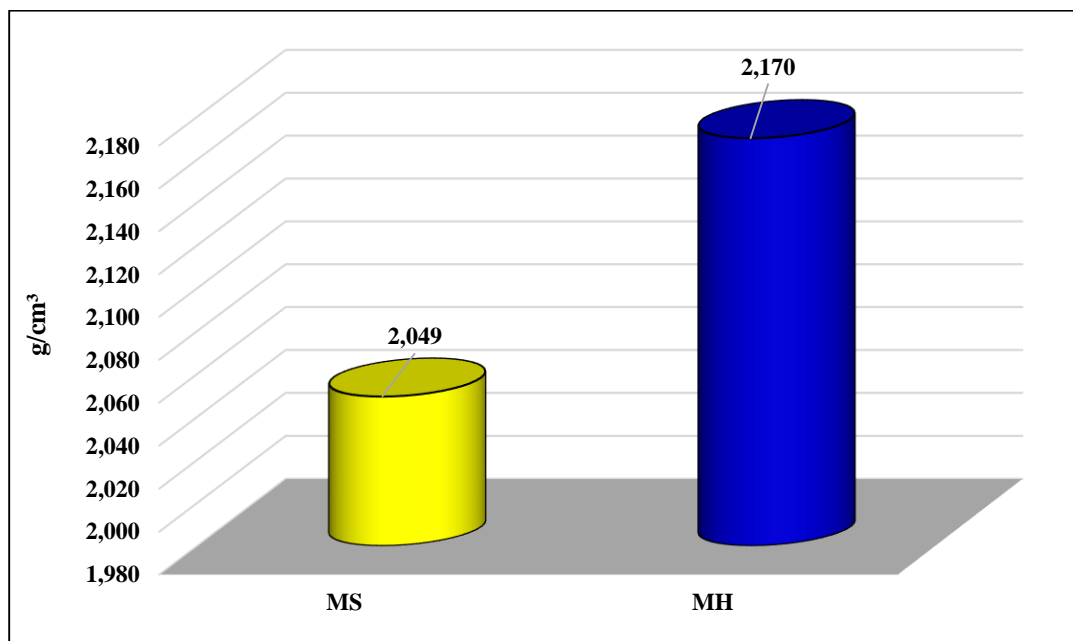


Figura 13. Densificación seca de los especímenes.

Fuente. Autores

Esto se debe, a que en la condición húmeda, el empaquetamiento de las partículas dependía principalmente a la homogeneidad del tamaño, pero en el secado, las variables que afectan el proceso dependen fundamentalmente del movimiento de las moléculas de agua dentro de la masa arcillosa y a la velocidad de migración hacia la superficie, y estas a su vez se ven afectadas por la capilaridad del material y los espacios generados durante la evaporación del agua, por lo tanto, en el secado es más importante la uniformidad de tamaños que la homogeneidad de las partículas (Fernández Abajo, 2000) (Restrepo Baena, 2011).

Por esta razón, la molienda en húmedo incrementa la densidad del material, pues genera mayor uniformidad de partículas, logrando un mejor empaquetamiento y posiblemente una mejor transferencia del calor a la estructura del material, mejorando no solo el proceso de secado, sino

mayor uniformidad en el mismo, y por que no, una reducción del tiempo en esta etapa, que generaría mayor rentabilidad en los procesos. Esta observación es confirmada por el incremento en la contracción seca de MH con respecto a MS como se ve en la figura 14, la cual fue de 57,25%, lo que indica que en las piezas de MH, hubo mayor evaporación de agua, generando un mayor contacto entre partícula y partícula e incrementando la contracción, y esto solo se logra cuando existe mayor uniformidad en la transferencia del calor desde la superficie hasta el centro de la pieza.

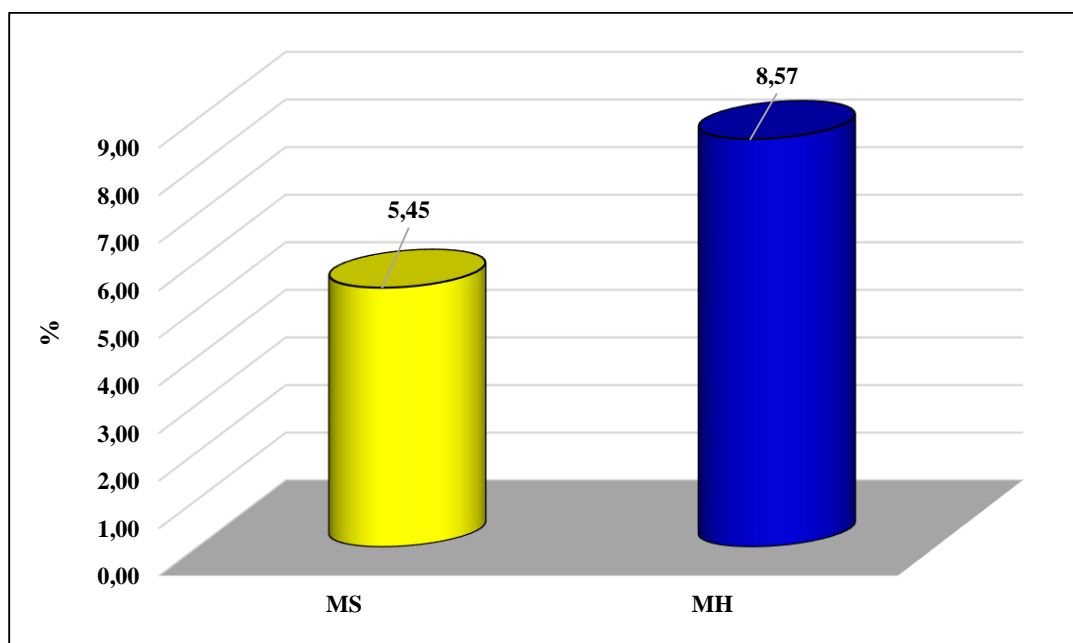


Figura 14. Contracción seca de los especímenes.

Fuente. Autores.

Esta uniformidad en la transferencia del calor no solo mejora estos procesos; sino además, controlando las fases críticas de esta etapa, principalmente la fase dos del secado, que es la fase donde se genera la mayor cantidad de defectos estructurales y estéticos, y es donde la evaporación no se realiza en la superficie sino en la estructura interna del material, se logrará que las moléculas

de agua se muevan más fácilmente a través de los capilares y por medio de los huecos que dejan las partículas laminares después de la evaporación, e iguala en gran parte la velocidad de evaporación y la velocidad de difusión en toda la masa, evitando no solo, que no dañe el material que se está secando, sino además, reducir el tiempo de secado y generando que se pueda acelerar el proceso de la siguiente fase, pues se podrá incrementar en menor tiempo la temperatura del material.

Esto es importante, pues se reducirán tiempos de secado y se garantizará que, la pieza entre con el porcentaje de humedad ideal al proceso de cocción, y de esta manera se podrá controlar mejor las primeras reacciones del material en cocción, logrando desarrollarlas a menor temperatura, y de igual manera acelerar la curva de cocción, generando menores tiempos, menor consumo de combustible (Carbón) y menor contaminación debido a menores tiempos de cocción, aspecto importante en esta rama industrial, esto se verá más adelante.

Además de este importante aspecto, hay que resaltar, que la bibliografía recomienda que, para evitar problemas de fisuras y grietas en esta etapa del proceso, se hace necesario que la contracción seca no supere el 2%, y como se puede observar, la muestra MH arrojó un porcentaje de 8,57%, lo que generaría en condiciones normales, diferencias de contracciones y tensiones que llegarían a superar el límite de deformación plástica produciendo la fisura (Estrada & Espinosa de los Monteros, 1982) (Bueno & Llana). Esta es una de las ventajas técnicas que genera la reconversión del proceso de preparación, que la molienda en húmedo genera el incremento en la densificación del material, lo que ayuda a absorber estas deformaciones plásticas, evitando estas roturas, lo que posteriormente logrará que en este tipo de proceso se puedan utilizar arcillas poco plásticas.

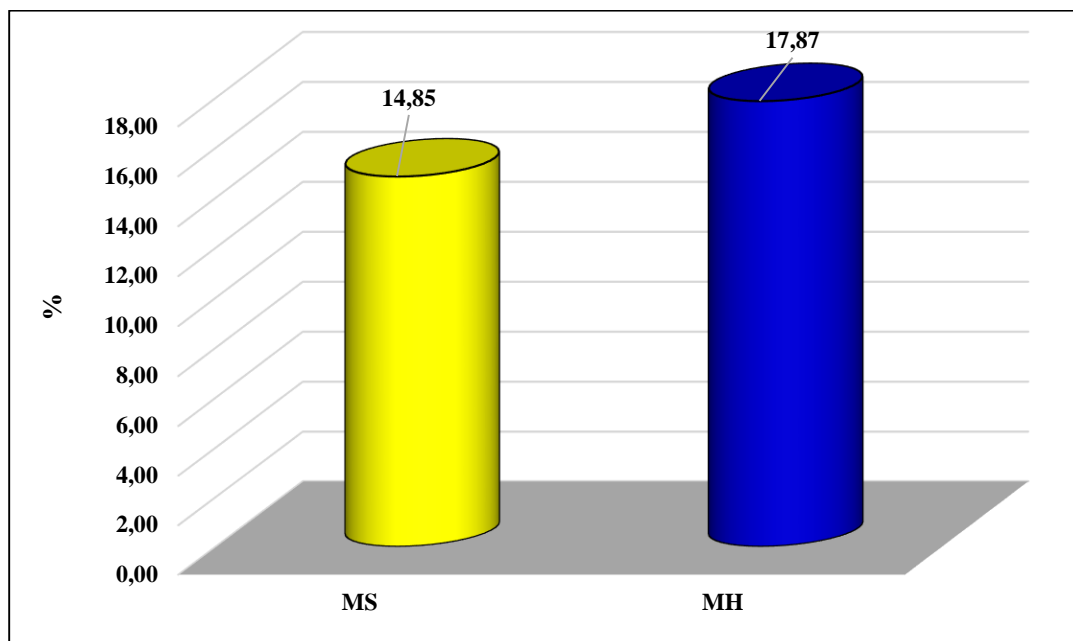


Figura 15. Pérdidas de masa en seco de los especímenes.

Fuente. Autores.

Como se observa en la figura 15, los productos molturados en húmedo tuvieron una pérdida de masa del 17,87% y los molturados en seco perdieron masa en un 14,85%. A pesar que las pérdidas de masa están directamente relacionada con la humedad de moldeo, también se ven influenciados por los aspectos antes mencionados. Este incremento del 20,34%, confirma lo explicado en las gráficas anteriores. Además, genera que a mayor densidad en las piezas de MH, estas poseen menor peso en seco, lo que directamente hará que en cocción reduzca la masa de los materiales. Este resultado de mejora en MH, es excelente para las empresas regionales en términos de rentabilidad y de economía, pues reducirán costos de fletes, ya que habrá mayor cantidad de productos en los mismos valores pagados con anterioridad.

4.2. Desarrollo de una curva de cocción óptima para la obtención de las propiedades tecnológicas

La cocción de los productos cerámicos es la etapa más importante del proceso de fabricación, en esta fase se pone de manifiesto si las operaciones o etapas de fabricación anteriores se han desarrollado convenientemente y si el producto cocido ha adquirido las propiedades y características fijadas por las normas. En esta etapa se consume un alto poder energético, ocasionando el incremento en los costos de fabricación. Durante este proceso, se debe considerar el intervalo de cocción entre el inicio de la vitrificación (formación de fase vítrea) y el inicio de la deformación; este no debe ser demasiado cerca del inicio de la vitrificación para que el material no sea demasiado poroso, y no demasiado cerca del inicio de la deformación para que la pieza no quede deformada (Escardino Belloch, Amoros Albaro, & Enrique Navarro, 1981).

Por lo tanto, se puede decir que la principal especificación en los procesos de cocción es tener controlado el ciclo de cocción, la atmósfera del horno y especialmente la temperatura final y la permanencia en esta temperatura. La velocidad de calentamiento debe ser cuidadosamente controlada sólo mientras se produce la eliminación de volátiles, o para permitir la penetración del calor en piezas de gran masa o de formas complejas. Por esta razón, se hace necesario el estudio y evaluación de los materiales durante esta etapa, para esto se utilizan diversidad de análisis térmicos que van desde una curva de gresificación, donde se evalúa la temperatura ideal de cocción, hasta análisis más específicos como son el análisis térmico diferencial (ATD), análisis térmico-gravimétrico (ATG), análisis dilatométrico (DIL), entre otros, que junto con los análisis de las características mineralógicas (DRX), químicas (FRX) y físicas, se puede elaborar una primera pauta de actuación del material controlando su comportamiento.

Estos análisis permiten conocer los fenómenos físicos y químicos que ocurren durante la cocción, y que pueden causar el deterioro del producto. Estos métodos, que son ampliamente empleados en los laboratorios cerámicos, ayudan a identificar el efecto y la temperatura de reacciones como las pérdidas de agua, dióxido de carbono y materia orgánica, cambios alotrópicos, deshidroxilaciones que ocurren durante el calentamiento, lo que posibilita modificar de manera teórica la curva de cocción, y generar un mejor comportamiento del material dentro del horno.

De acuerdo con esto, se evaluó la materia prima mediante difracción de rayos X (Figura 16) para las características mineralógicas, se realizó un análisis de composición mediante Fluorescencia de rayos X (Tabla 3), para el material arcilloso, y de esta manera determinar las estructuras cristalinas y los óxidos del material. Además, se realizó un análisis dilatométrico (Figura 17) y una curva de gresificación (Figura 18) de cada una de las pastas, para identificar una curva teórica tentativa, la cual se llevó a la industria y se aplicó en cada una de las quemadas realizadas durante el proyecto.

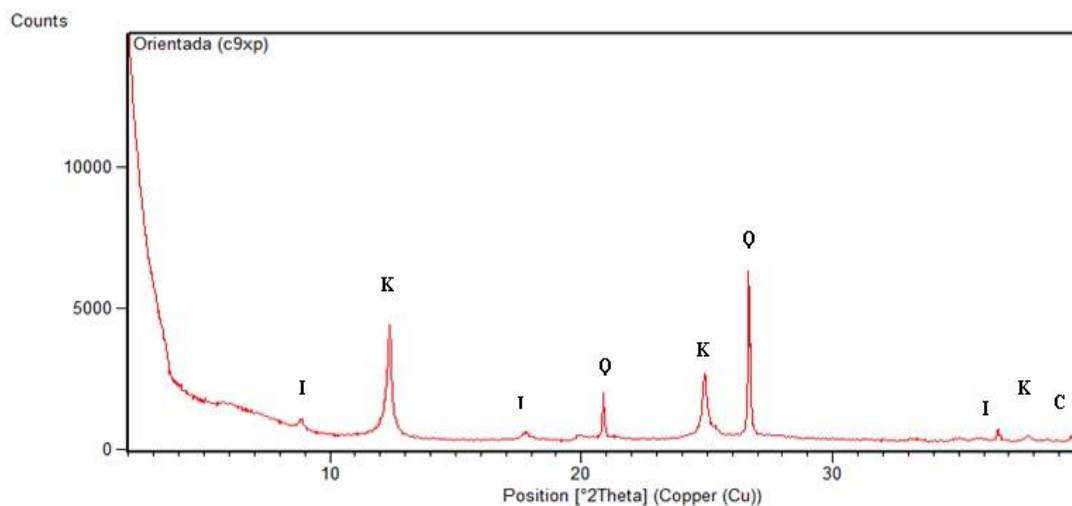


Figura 16. Difractogramas de rayos X de la materia prima arcillosa (Q. Cuarzo; K. Caolinita; I. Illita; C. Calcita).

Fuent. Autores.

Como puede verse en la figura 16, el diagrama de rayos X de la arcilla, detalla que el material presenta sus picos principales asociados con la caolinita (K) y el cuarzo (Q), estructuras principales de los materiales arcillosos. Se puede observar, una alta intensidad de los picos de cuarzo, esto indica fundamentalmente una importante presencia de sílice libre, que puede afectar las reacciones ocurridas durante el precalentamiento de la arcilla. Esto se confirma con el valor de 7,20, alto valor en la relación molar ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) y la baja pérdida por calcinación (LOI), como se muestra en la Tabla 3. Esto es poco frecuente en arcillas de la región, especialmente en arcilla de la formación Guayabo, pues los materiales aflorados allí, presentan características illítico-caoliniticas, con excelentes propiedades, que las hacen materias primas de excelentes calidades para el moldeo, especialmente para el conformado por extrusión.

Además de minerales con elevada resistencia térmica, razón principal por la que la mayoría de las empresas se ubican en esta área regional. Se muestra un pico pequeño de calcita (C), siendo estas las estructuras de mayor contribución en el material.

La tabla 3, nos muestra un bajo porcentaje de Al_2O_3 , poco característico en arcillas de esta formación como ya se había mencionado, y un elevado porcentaje en sílice, ubicándose por encima de los rangos promedios para una arcilla utilizada en este tipo de procesos, los cuales deben estar entre el 45% y 55%, especialmente para materias primas usadas en los procesos de extrusión (Fernández Abajo, 2000). Esto nos hace pensar en la existencia de uno o varios minerales laminares y en la de cuarzo libre en proporción variable, lo que confirma lo evaluado en el DRX.

El bajo contenido en Fe_2O_3 , hacen prever la poca presencia de óxidos de hierro libres, esto es un aspecto importante, especialmente cuando se encuentra en la estructura arcillosa una elevada cantidad de SiO_2 , pues evitará la formación de fayalita, defecto cerámico que deforma las piezas y genera reducción en las propiedades mecánicas.

Además, se puede afirmar, que el color característico de este material después de la cocción en atmósfera oxidante será un rojo claro, esto debido a la 0,18% de la relación $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$, y en atmósfera reductora será de un color beige debido a esta relación y a su porcentaje de Ti_2O . Es de destacar, la presencia de minerales micáceos por los datos antes evaluados y por el porcentaje de K_2O (1,43%). Esto se tuvo en cuenta para la curva de precalentamiento, pues como se sabe el K_2O es uno de los óxidos más fundentes de la composición química de la arcilla y es importante tenerlo en cuenta para los intervalos de cocción del material.

Tabla 3. Composición química de la materia prima arcillosa (FRX).

OXIDO	DENOMONACIÓN	PORCENTAJE EN MASA (%)
SiO_2	SÍLICE	69,80
Al_2O_3	ALÚMINA	16,46
Fe_2O_3	HIERRO	4,60
K_2O	POTASIO	1,43
Na_2O	SODIO	0,13
MgO	MAGNESIO	0,51
CaO	CALCIO	0,27
TiO_2	TITANIO	0,88
MnO	MANGANESO	0,04

SO₃	AZUFRE	0,04
P₂O₅	ANHIDRIDO FOSFORICO	0,11
L.O.I	LOSS OF IGNISION	5,73
TOTAL		100,00

Fuente. Autores.

Esto se puede observar en la figura 17, donde se evalúa el comportamiento termicodilatométrico de MS y MH. En esta curva térmica, se puede observar varios detalles a destacar, estos se tendrán en cuenta para el desarrollo de la curva de cocción del material. Se observa un pico endotérmico de baja intensidad entre los 100 °C y 200 °C, el cual hace parte de la eliminación del agua higroscópica del material, es de destacar, que en las dos curvas es pequeño este pico, lo que se puede deducir que estas arcillas son poco rehidratables y no presentarán problemas de revenido, sin embargo, en la curva de MH se observa una reducción del 64,10% en el coeficiente de dilatación a esta temperatura.

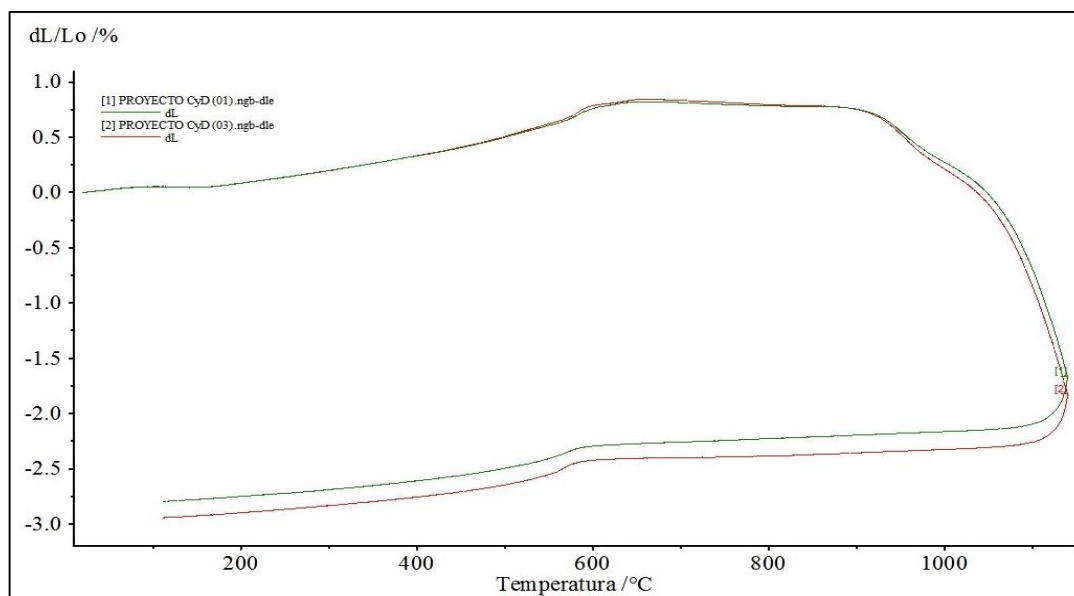


Figura 17. Curva dilatométrica (MS. Curva 03 y MH. Curva 01).

Fuente. Autores.

De la misma forma, se observa otro pico exotérmico entre los 500 °C y 600 °C, que hace referencia a la transformación alotrópica del cuarzo (α - β), transformación importante pues es aquí donde ocurren la mayoría de los defectos estructurales en un material, como son fisuras y grietas que va en detrimento de las propiedades tecnológicas de los productos cerámicos. Aunque en las dos curvas se presentan a la misma temperatura 582 °C, la preparación de la materia prima por vía húmeda genera una reducción del 30,42% en el coeficiente, lo que conlleva a controlar mejor esta etapa en la cocción. Se observa otro pico endotérmico, entre los 900 °C y 1000 °C, que hace parte de la descomposición de materiales volátiles, como el carbonato de calcio y posiblemente el comienzo de la sinterización.

Es de destacar que, en la etapa de precalentamiento de MS y MH, la dilatación total de las dos curvas están por debajo del 1,0%, porcentaje menor a lo recomendable para arcillas utilizadas tradicionalmente para la fabricación de productos de cerámica estructural la cual debe ser menor al 1.1 o 1.2% (Bueno & Llana). Aspecto térmico a tener en cuenta pues esta dilatación que experimentan estas dos muestras mejorarán la ventana de proceso de los materiales. Finalmente, se puede observar, un último pico en el enfriamiento, entre los 500 °C y 600 °C, que hace referencia a la transformación alotrópica del cuarzo (β - α), y como se vio en el precalentamiento con la curva MH, en esta etapa de la curva de cocción, de igual forma la preparación por vía húmeda reduce el coeficiente de dilatación.

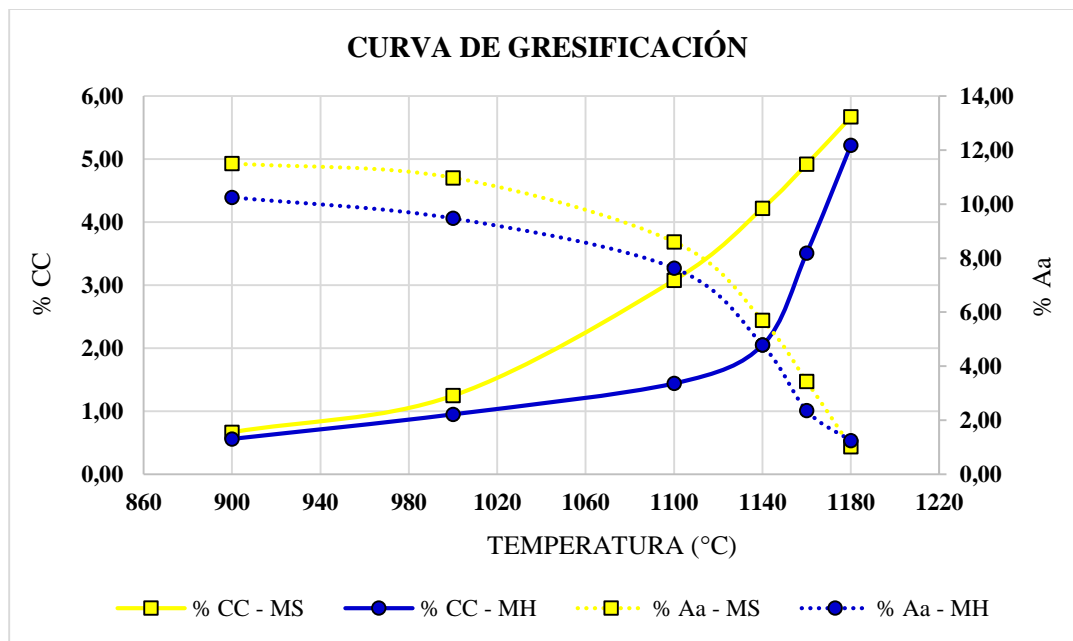


Figura 18. Curva de gresificación en atmosfera neutra.

Fuente. Autores.

Estos coeficientes, se tuvieron en cuenta para diagramar finalmente la curva de cocción que se llevó al horno colmena para el desarrollo de esta etapa del proceso. Para esta finalidad, también se desarrolló una curva de gresificación, principalmente para determinar la temperatura de cocción y el intervalo de temperaturas en el que la porosidad abierta se llegaba a anular, buscando un valor constante en la contracción. Como se puede observar, en la figura 18, la molienda húmeda permite ampliar un poco más el intervalo de cocción de los productos cocidos, esta observación se puede confirmar, al evaluar los porcentajes de contracción, en MS se observa una contracción importante (3,08%) por encima de 1100 °C, a diferencia de MH que esta se ubica sobre los 1140 °C (2,05%), estos 40 °C de diferencia, hace muy improbable que se produzcan deformaciones de piezas por sobrecocción o contracciones y porosidades diferentes por cocción insuficiente, en las muestras MH, además de incrementar la temperatura en la cual el material se puede cocer.

Las curvas de cocción son representaciones gráficas y teóricas de la forma como se debe realizar la etapa de cocción de cualquier material en un horno, teniendo en cuenta factores como la temperatura en función del tiempo, con la necesidad de reducir el consumo energético por unidad de producto fabricado, además del costo de la mano de obra. Para esto se realizan diversos análisis como ya se mencionó con anterioridad, los resultados de estos análisis determinan el paso del ciclo de cocción en horas o minutos sobre una temperatura estimada, y de esta manera poder evitar y/o controlar los problemas causados durante las diferentes reacciones ocurridas durante la etapa de precalentamiento.

Por este motivo, y teniendo en cuenta ya lo analizado se propuso una curva de cocción, que se validó quemando muestras en horno industrial tipo colmena o de llama invertida a dos atmósferas, un atmósfera oxidante y una atmósfera reductora. En esta curva propuesta de cocción se tuvo en cuenta aspectos como, las características físicas del material, los resultados del análisis de difracción de rayos X (DRX), el análisis de fluorescencia de rayos X (FRX) y los análisis térmicos de dilatometría y curva de gresificación.

Por esta razón se propuso, durante la etapa de precalentamiento, en la primera etapa del llamado “caldeo” (Inicio del ciclo térmico hasta aproximadamente los 400°C), que el aumento de la temperatura sea de manera lenta hasta los 200 °C, esto con el fin de minimizar el pico endotérmico que se observó en el dilatograma entre los 100 °C y 200 °C, y de esta manera, evaporar la humedad residual o zeolítica del material (Agua higroscópica). En la segunda etapa de la curva después de la temperatura de los 200 °C, se puede acelerar el proceso hasta los 500 °C, en esta temperatura se vuelve a bajar el ritmo de calentamiento, con el fin de generar una mayor

transferencia de calor y realizar de manera lenta y pausada la transformación α - β de la estructura del cuarzo (Amorfa a cristalina), en esta etapa se hace necesario, reducir bastante el ritmo de calentamiento en el ciclo de cocción, debido al elevado porcentaje de sílice del material; aunque, durante la cocción de MH, se permite acelerar un poco en este rango de temperatura, esto debido a la flexibilidad térmica que esta molienda permite generar durante la cocción.

Seguidamente, entre las temperaturas de 650°C a 900°C, nuevamente se puede acelerar la velocidad de calentamiento, esto es permisible debido al buen comportamiento del material. Pero al llegar a los 900 °C, se recomienda, bajar un poco el ritmo de cocción, esto debido al pico endotérmico observado en esta temperatura, es aquí, como ya se mencionó, se eliminan carbonatos y se inicia la etapa de sinterización, por eso es recomendable bajar la velocidad de calentamiento, para evitar problemas en la porosidad por la eliminación de material volátil y una mala vitrificación que puede terminar en un detrimento de la gresificación del material. Pasada esta temperatura se puede acelerar de nuevo hasta la temperatura final que maneja el horno. Finalmente, de nuevo, se recomienda bajar el ritmo de enfriamiento cuando se este acercando a los 600 °C, para controlar el cambio alotrópico. Una de las características de esta curva, es que en la cocción de MH se permite en todas las temperaturas evaluadas el aumento en la velocidad del ciclo de cocción, esta es una ventaja que le otorga la preparación del material por molienda en húmedo. Según lo anteriormente expuesto la curva propuesta (Figura 19) es la siguiente:

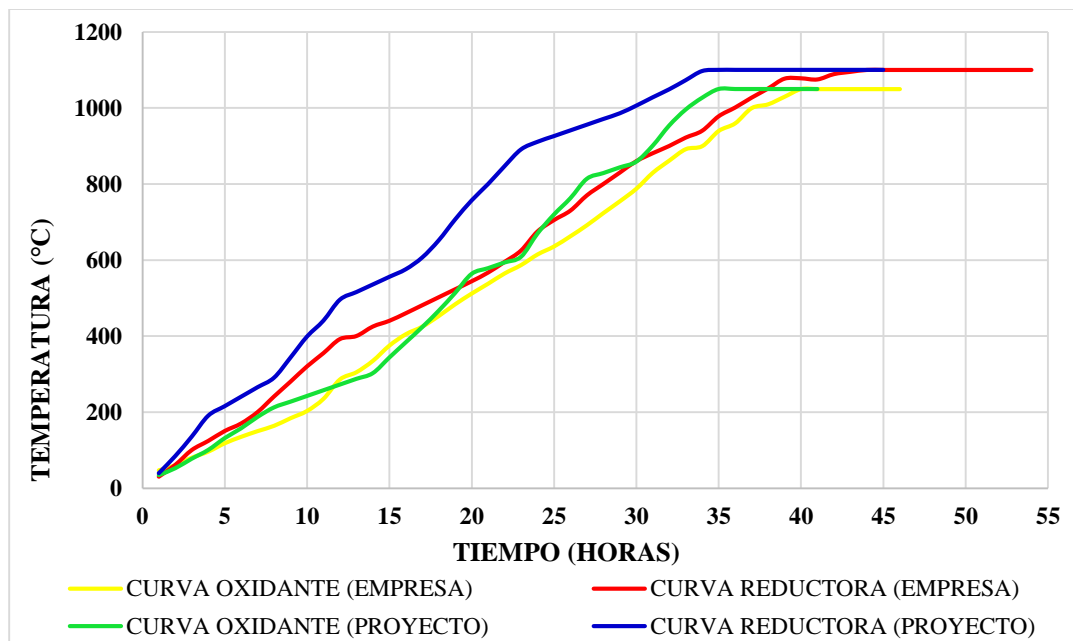


Figura 19. Curva tentativa de cocción aplicada para el proyecto.

Fuente. Empresa regional (Curva empresa) y Autores (Curva proyecto).

Como se puede observar en la figura 19, se muestran cuatro curvas de cocción, una curva oxidante y una curva reductora, las cuales son utilizadas frecuentemente por una empresa regional (Empresa donde se realizaron las quemas), y las otras dos curvas (Oxidante y reductora) son las que se propusieron de acuerdo a los resultados obtenidos en la caracterización mineralógica, química y física de la muestra del proyecto, para realizar las quemas de las probetas. Con esto se validó inicialmente la curva propuesta, además se corroboró las mejoras en las propiedades de los productos al modificar la preparación de la materia prima.

Como se analiza, las dos curvas propuestas para la quema en atmósfera oxidante y reductora mejora térmicamente el proceso de cocción, pues, en la curva de atmósfera oxidante se reduce el tiempo de cocción en 5 h, para llegar a la temperatura final, y en la curva de atmósfera reductora el tiempo de cocción se reduce en 9 h. Esto sugiere que, la molienda en húmedo aplicada para la

preparación de la masa plástica para el proceso de extrusión, reduce los tiempos de fabricación de estos procesos de conformado, esto es debido a, que durante las quemas como se mencionó anteriormente, se puede acelerar la velocidad de calentamiento, pues la densificación generada por este tipo de preparación en el material, permite estas modificaciones térmicas. Esto se verificará evaluando las propiedades tecnológicas de los productos más adelante.

4.3. Influencia de la reconversión del método de preparación sobre las propiedades tecnológicas requeridas a nivel industrial para productos conformados por extrusión su equivalencia con productos en el mercado.

De la misma manera que en las condiciones húmedas y secas, en cocido también se evaluaron los aspectos y las propiedades tecnológicas del material después del proceso de cocción, con el fin de determinar la influencia de la curva propuesta en los especímenes de MS y MH después de haber realizado la reconversión del método de preparación de la materia prima para procesos de extruido. Entre los diferentes aspectos, se evaluó la densificación del material (Figura 20), aspecto que se relaciona directamente con propiedades tecnológicas como son la propiedad estructural y la propiedad mecánica. Se evaluó la contracción en cocido (Figura 21), para determinar el tamaño promedio con el cual quedaba el material después de esta etapa, y las pérdidas de masa por cocción (Figura 22) que determinan, no solo la evolución del material arcilloso en la etapa de precalentamiento, sino al final de todo el proceso de producción, va a determinar la pérdida en porcentaje en masa de los especímenes, dato que se podrá utilizar para realizar los costo de despacho y transporte del material (Fletes).

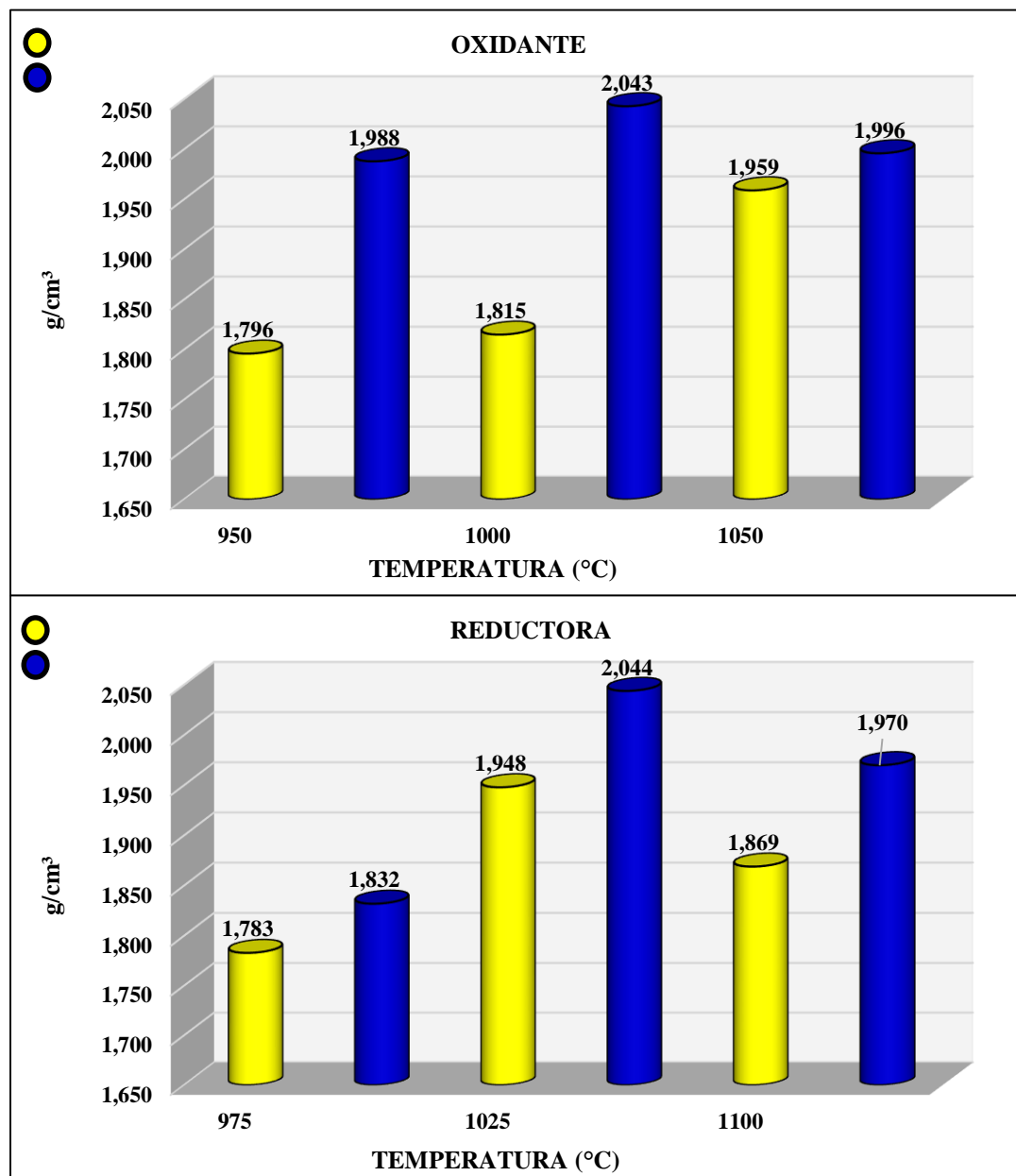


Figura 20. Densificación en cocción.

Fuente. Autores.

Como se observa en la figura 20, los valores de densidad se incrementan en todos los aspectos del ensayo. En las dos atmósferas la muestra MH, se comporta de mejor manera que MS, pues como se detalla, en todas las temperaturas existe un incremento significativo. Sin embargo, se

puede ver que las muestras alcanzan su valor máximo de densificación en la temperatura media del horno, posteriormente este valor disminuye al continuo incremento de la temperatura de cocción. Aunque la disminución no es significativa, se debe tener muy controlado estos comportamientos, pues pueden verse afectadas propiedades tecnológicas del producto. Dentro de los incrementos que se desarrollan en este aspecto tecnológico, se puede detallar que, en la atmósfera oxidante se llega a incrementos hasta del 12,6%, antes del descenso, mientras que en la atmósfera reductora los incrementos son un poco más moderados con incrementos hasta del 4,90%.

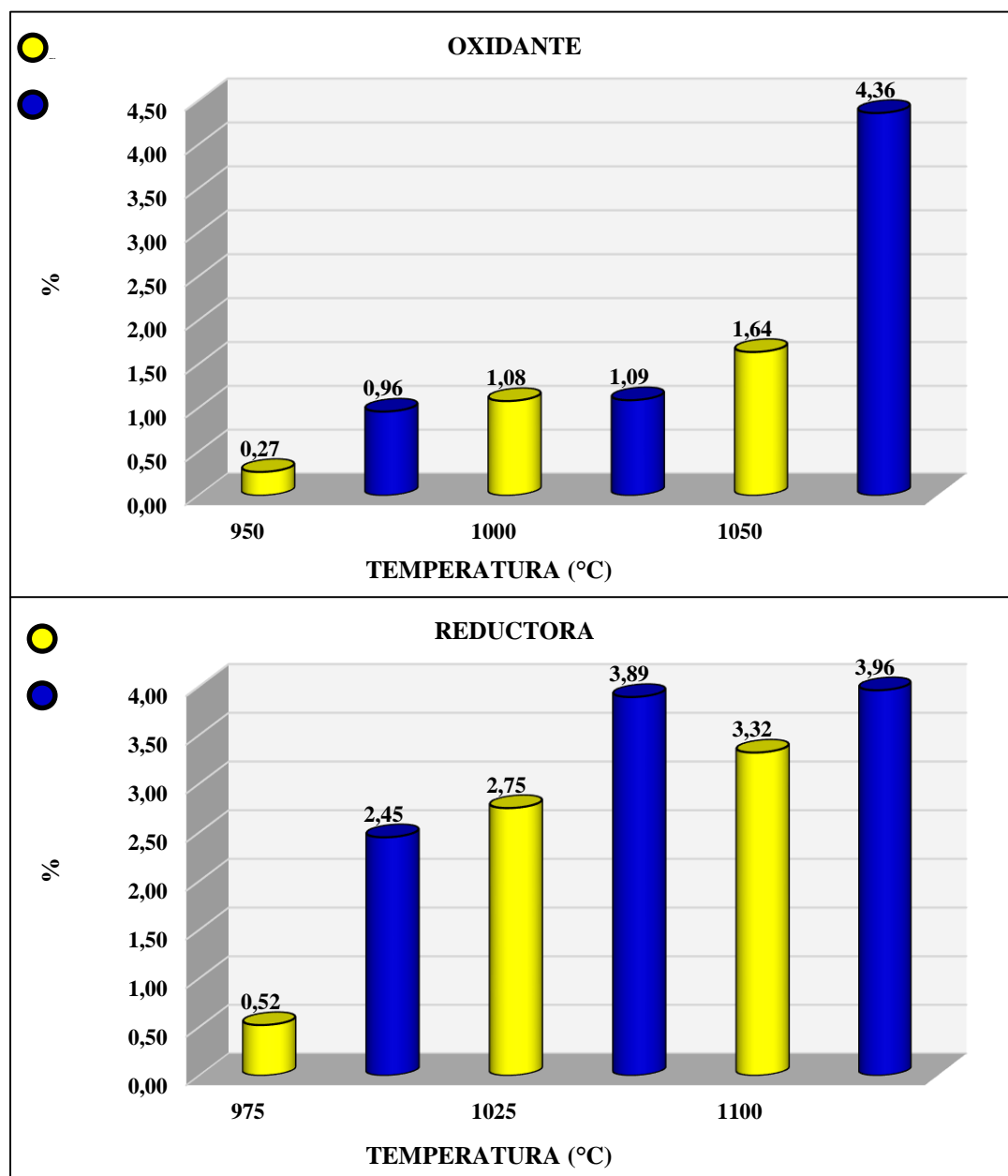


Figura 21. Contracción en cocción.

Fuente. Autores.

En cuanto a la disminución en la densidad en las temperaturas altas de 1050 °C y 1100 °C para la atmósfera oxidante y reductora respectivamente, se puede observar que, en la atmósfera oxidante la disminución de esta no sobrepasa el 1,9%, mientras que en la reductora la disminución

llega al 5,4%, estos resultados sugieren un mayor control en la ventana de proceso de cocción en esta atmósfera reductora, aunque hay que tener presente que son pocas las empresas regionales que manejan esta atmósfera por el gasto de combustible.

En la figura 21, se observan los valores de contracción en cocido, esta propiedad esta relacionada con la densificación del material y su comportamiento se asocia principalmente al mecanismo de sinterización durante la etapa de cocción, pero también se puede relacionar con la densidad aparente en seco y las pérdidas de peso durante la fase de cocción (Guerrero Gómez, Espinel Blanco, & Sánchez Acevedo, 2017). Como se observa, las muestras MS y MH presentan cambios moderados en contracción cocida, principalmente en la atmósfera reductora.

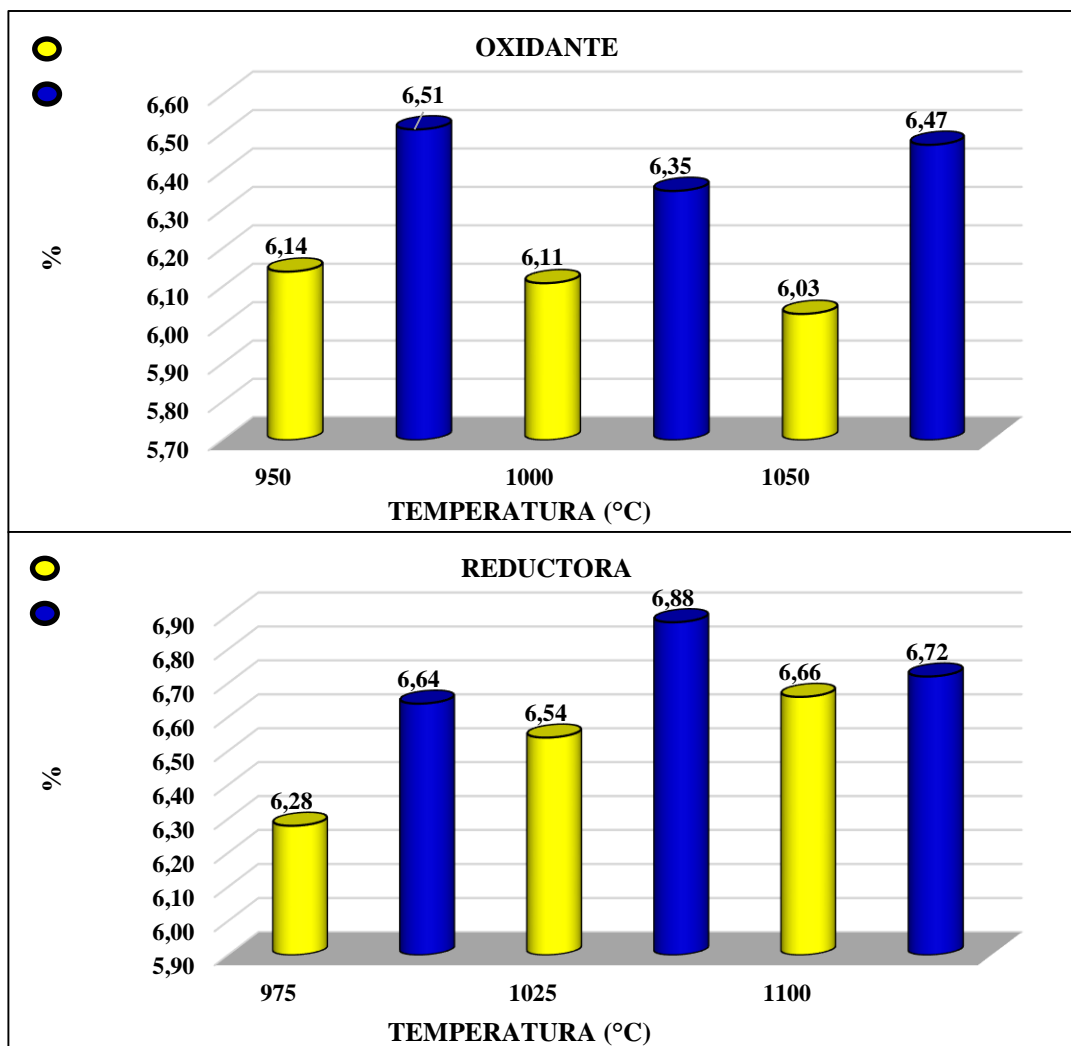


Figura 22. Perdidas por calcinación.

Fuente. Autores.

De hecho, se pueden destacar, cambios significativos en las temperaturas altas, en las dos atmósferas, puntualmente en las muestras MH, lo que confirma lo mencionado anteriormente, que el mecanismo de sinterización se genera de mejor forma en las muestras molida por vía húmeda, lo que garantiza que el calentamiento en cocción de la pieza es completo al aplicarle este método de preparación. Además, se puede decir que, los resultados se comportan de manera típica, pues la densidad y las pérdidas de masa en el proceso de secado fueron mayores en MH.

Las pérdidas de masa por cocción, se relacionan principalmente con la pureza o la cristalinidad del material arcilloso, medido en la cantidad de masa en porcentaje que pierde un material después de aplicarle el proceso de cocción (Pinto, 2011). En esta etapa, a diferencia del secado, donde las pérdidas se relacionan con la cantidad de agua agregada al material en el amasado, las pérdidas por cocción se relacionan con la descomposición de la materia orgánica, carbonatos y sulfuros, la evaporación del agua higroscópica y de cristalización y la descomposición del retículo cristalino de los minerales arcillosos. Por lo tanto, estas pérdidas aumenta con la concentración de minerales arcillosos y con la plasticidad de la arcilla. La bibliografía nos dice que, una pérdida de peso en cocción entre el 6% y 12% puede considerarse normal; por debajo del 5% denota un predominio de compuestos inertes en la muestra (cuarzo principalmente) y entre 15% al 20% o más, es causado por la descomposición de carbonato de calcio con desprendimiento de CO_2 , en arcillas calcáreas (Rondón, 2011).

Como se observa en la figura 22, la materia prima, presenta pérdidas por cocción típicas de materiales con minerales arcillosos promedios, pues en todas las temperaturas y en las dos atmósferas no superan el 7%, lo que indica que es una materia prima propia para procesos de extrusión. Sin embargo, hay que destacar, la homogeneidad en las pérdidas de masa, tanto en MS como en MH, en todas las temperaturas de quema. De hecho, se puede analizar que los incrementos están entre el 3% al 10% a medida que se aumenta la temperatura. Esto es un aspecto importante, primero, porque se está garantizando que se producen por completo todas las reacciones que ocurren en el precalentamiento, y en segundo lugar, que al momento que se vayan a realizar los cálculos para el transporte del material, esta homogeneidad ayudará a que se tengan datos constantes, para cada viaje que se realice del material, de manera que, se pueda verificar cuanto

material se puede transportar y cuanto va a ser el costo del transporte, especialmente, cuando se quiera exportar el producto.

Después de haber realizado la evaluación de los aspectos tecnológicos, y la influencia de la preparación de la materia prima por vía húmeda para procesos de extrusión, hablaremos de las propiedades tecnológicas de los productos y como influyó esta preparación. Como se sabe, frecuentemente, en esta área industrial, las propiedades primordiales para evaluar el comportamiento final de un producto para construcción (Revestimientos, bloques, ladrillos, tejas, entre otros), dependen de la tipología del material a estudiar. Principalmente, se manejan dos propiedades tecnológicas fundamentales, como son la propiedad estructural, evaluada mediante la absorción de agua de los materiales, esta estudia la porosidad abierta, y es la que va a definir los valores para tener en cuenta en las demás propiedades como son las mecánicas, las tribológicas, las químicas, las térmicas, entre otras. La otra propiedad es, la propiedad mecánica, está evalúa la capacidad de un cuerpo para resistir fuerzas aplicadas en él, sin romperse, y depende básicamente del material fabricado y de su forma geométrica. Estas fuerzas aplicadas incluyen flexión, tensión, compresión, impacto, fatiga o fuerzas de altas temperaturas.

Para productos de revestimiento y pavimentos cerámicos, la propiedad estructural (Figura 23) se llevó a cabo mediante el ensayo de absorción de agua por el método de ebullición, dejando las probetas impregnadas en agua 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 (Figura 24) 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/mm² por segundo, siguiendo el procedimiento de la norma NTC 4321-4 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - ICONTEC-, 1997). Finalmente, se compararon los resultados arrojados en cada uno de los análisis, 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, debido básicamente, a que las empresas regionales (Las que lo hacen), evalúan solo estas dos, y como la idea es llevar a nivel industrial estos resultados, y así, lograr una equivalencia con los productos en venta en el mercado regional y nacional, se realizó este comparativo con las muestras MH, y de esta manera, evidenciar las ventajas, las mejoras y los incrementos generados en los productos al realizar la reconversión mediante este método de preparación.

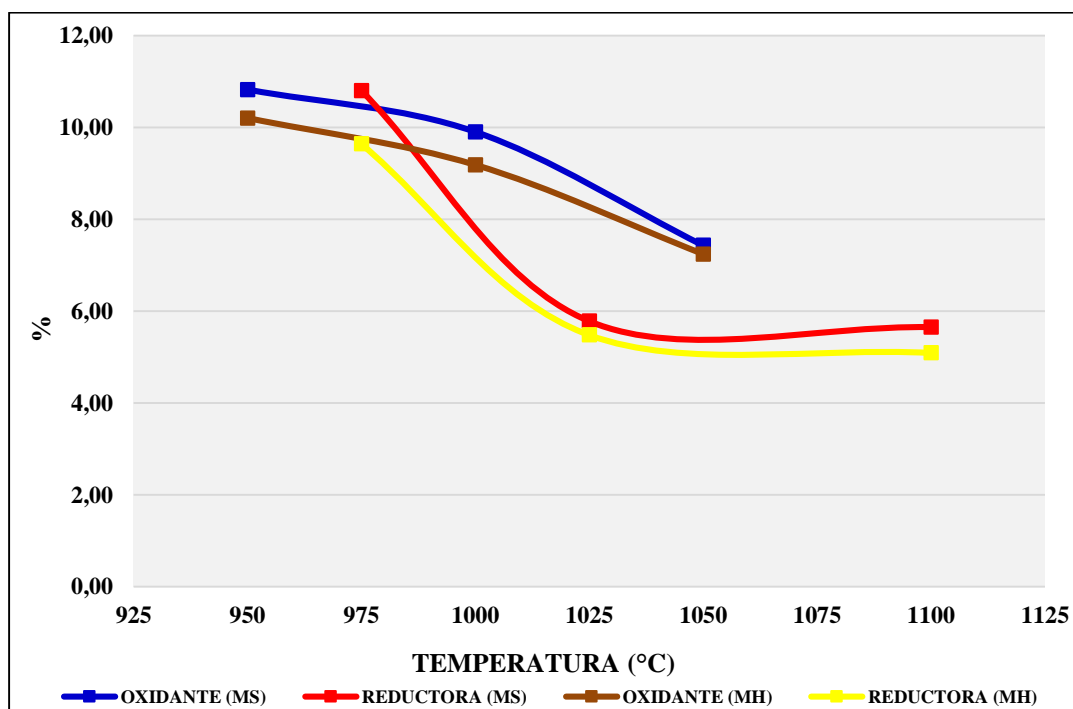


Figura 23. Propiedad estructural (Porosidad abierta).

Fuente. Autores.

Normalmente se piensa, que los productos prensados son más resistentes que los extruidos, sencillamente por el método de conformado del material, pues en el prensado se aplica una presión de aproximadamente 250 kg/cm^2 para productos de revestimiento, mientras que en el extruido se aplica un empuje transversal, que ayuda a conformar la estructura del producto pero no le da la suficiente resistencia al material. Como se analizará más adelante, las mejoras en estas propiedades se obtienen principalmente por el método de preparación, lo que llevará a que se piense en una reconversión en esta etapa del proceso, que ayude a incrementar no solo la calidad técnica del producto sino además la calidad estética del material, mejorándolo, y volviéndolo más competitivo, y por que no, pensar en ingresar de nuevo con fuerza en el mercado internacional, abriendo nuevos mercados.

Como se observa en la figura 23, el comportamiento del material preparado por molienda húmeda, arroja una disminución en su porosidad, esta se observa en todas las temperaturas y en las dos atmósferas, lo que muestra que la reconversión del método de preparación mejora la transferencia del calor en la estructura interna de los productos, como ya se había mencionado anteriormente, lo que facilita un mejor desarrollo en la formación de fase líquida dando lugar al comienzo de la sinterización de las partículas de mineral arcilloso, en temperaturas más bajas, favoreciendo una estructura menos porosa, como se muestra en la atmósfera reductora. Además, se genera un mejor control durante el precalentamiento de las reacciones de los diversos materiales que acompañan los minerales arcillosos, logrando una mejor sinterización, y consecuentemente, una mejor vitrificación y gresificación del material, lo que mejora la eficiencia del proceso de cocción, especialmente en hornos rudimentarios y tan problemáticos como los hornos colmena.

Dentro de las ventajas de la reconversión del método de preparación, se puede analizar, descensos en la porosidad del 2,6% hasta 7,3% en la atmósfera oxidante y del 5,2% hasta el 10,7% en la atmósfera reductora. Como se observa, es más efectiva la molienda húmeda en la atmósfera reductora. Este hecho, se podría atribuir, a que el incremento en la transferencia del calor generado por la molienda en húmedo en la estructura de los productos, es ayudada por el mayor tiempo de exposición de los productos en las temperaturas finales, lo que genera mayor tiempo de transferencia del calor durante el tratamiento térmico, influyendo en mayor grado en las transformaciones mineralógicas que tienen lugar en los minerales de arcilla, logrando que la gresificación en los materiales sea completa, e incrementando propiedades mecánicas como se verá más adelante en la figura 24.

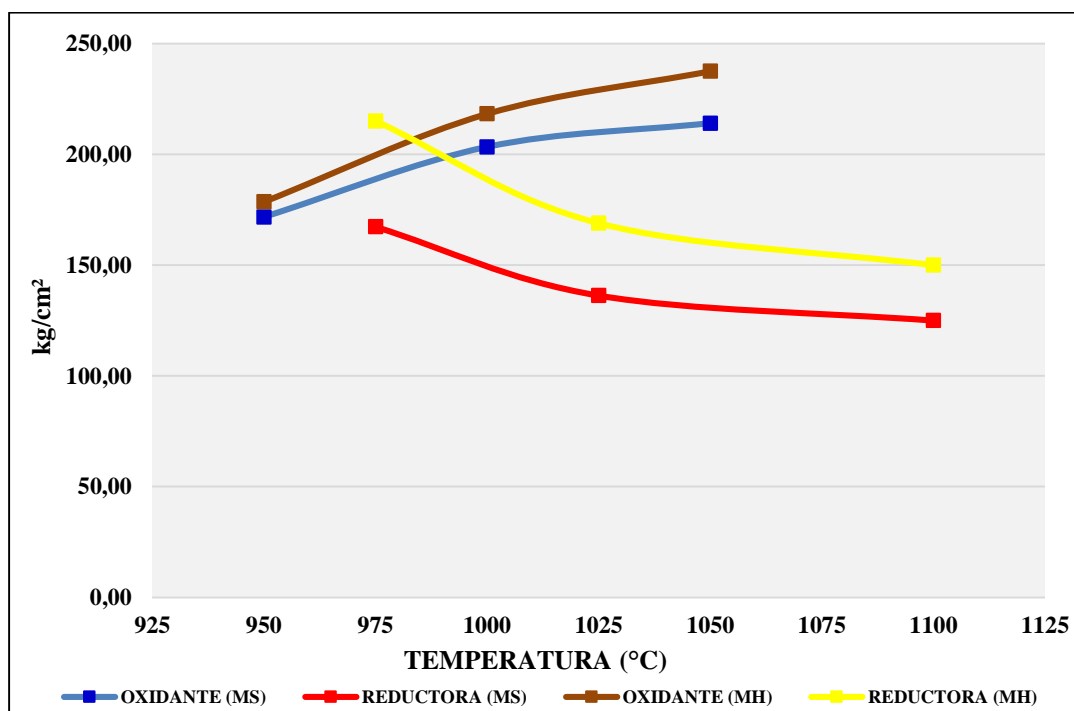


Figura 24. Propiedad mecánica (Resistencia a la flexión).

Fuente. Autores.

En la figura 24, se presenta el gráfico correspondiente a la resistencia a la flexión de las muestras MS y MH en las dos atmósferas, en relación con las diferentes temperaturas finales de cocción. Hay que señalar que, en esta propiedad, la muestra MH se incrementa con referencia a MS en las dos atmósferas, pero se observa que a diferencia de la absorción de agua, hay una tendencia notable de aumento significativo en la resistencia en la atmósfera oxidante, mostrando incrementos hasta del 32,96% en MH, valor superior al 25,26% en MS. Otro aspecto importante a evaluar, y que se observa en la atmósfera reductora, es que las muestras MH presentan valores más altos que MS. Sin embargo, en esta atmósfera se muestra una disminución en la resistencia mecánica a medida que se incrementa la temperatura, esto sugiere, que la permanencia de los productos en las temperaturas finales de cocción, posiblemente genera pequeños defectos microestructurales, lo que causa una disminución en la resistencia mecánica, a pesar de la reducción en la porosidad. Esto se verifica, porque el efecto se observa en las dos muestras, tanto MS como en MH.

Más allá de esta situación, es de destacar, el incremento en la resistencia de MH, especialmente en la atmósfera oxidante, como se ha comentado, esta es la atmósfera de cocción más utilizada por la mayoría de empresas regionales, y más importante aún, si los valores aumentan de 178 Kg/cm^2 para las probetas tratadas a $950 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta 237 Kg/cm^2 para las probetas cocidas a $1050 \text{ }^\circ\text{C}$. Este último valor de resistencia mecánica, es superior en 10,9% al valor que presenta la muestra MS, tratada a la misma temperatura de cocción, lo que nos muestra que la molienda en húmedo para los procesos de extrusión, mejorarían en elevados porcentajes los valores arrojados en estas propiedades.

Finalmente, este valor se considera por encima no solo de productos de revestimiento tipo fachaleta, los cuales están en valores promedios de 204 kg/cm^2 , como se verá más adelante en las figuras 25 y 26.

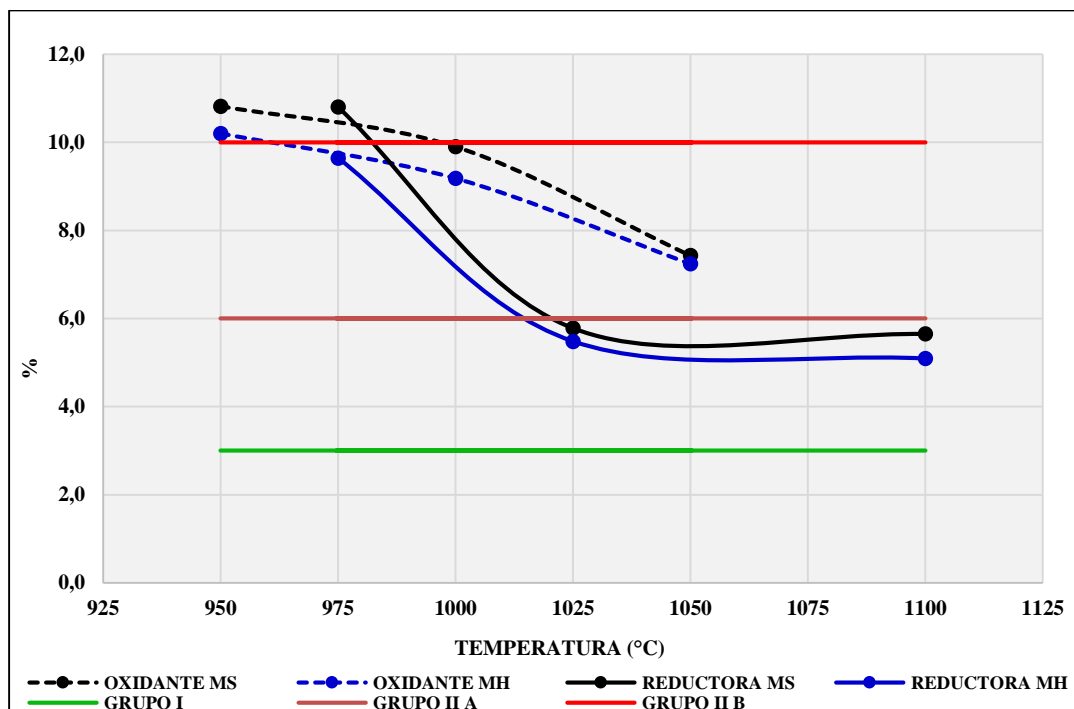


Figura 25. Gráfico comparativo de porosidad de productos MH vs NTC 919.

Fuente. Autores.

La capacidad de absorción de agua es la característica que identifica la naturaleza del cuerpo cerámico en cuanto a lo que se refiere a la estructura interna del producto, esta se relaciona directamente con todas las propiedades tecnológicas y afecta la durabilidad del mismo (Gil, y otros, 2006). En el caso de revestimientos cerámicos, ya sea para piso o para pared, esta propiedad es utilizada para clasificar las baldosas en grupos (I, II_a, II_b y III), donde se van a determinar directamente los resultados de otros análisis como son la resistencia mecánica, la abrasión profunda en baldosas no esmaltadas, la resistencia a las manchas y la resistencia a ciclos de hielo

y deshielo, entre otros. Por esta razón, es de suma importancia la evaluación y el análisis de esta propiedad, porque del resultado va a permitir clasificar el producto y observar 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*” (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - ICONTEC-, 1998). Como se observa en la figura 25, en relación a la norma NTC 919 y la clasificación en los grupos de absorción de agua, se detalla, que en referencia a estos, las muestras MH y MS, se ubican en los mismos grupos, a excepción de un cambio en el grupo en MH con respecto a MS en 975 °C y 1000 °C, en donde se ve que la molienda en húmedo ayuda a mejorar la calidad técnica del mismo, pasando del grupo AII_b a AII_a en las dos temperaturas, lo que mostrará un incremento en la resistencia y durabilidad de los materiales, además de un valor comercial más alto. Es de destacar que, aunque en la mayoría de temperaturas no cambia de grupo, si cabe resaltar el hecho de que se reduce la porosidad del material, lo que origina una mejor estructura y una durabilidad mayor en cuanto a los proceso de molienda seca tradicionales.

En la figura 26, se analiza la resistencia mecánica, esta propiedad nos evalúa la resistencia de las piezas cerámicas ante agresiones de diferente naturaleza como son cargas dinámicas y/o estáticas, rodaduras, impactos, entre otras, que pueden llegar a afectar la durabilidad de los revestimientos. En esta propiedad se analizan diferentes características como son, la carga de rotura, la fuerza de rotura y el módulo de rotura o resistencia mecánica. Para efectos de la norma

NTC 919, se analiza el módulo de rotura, en este caso, expresado en N/mm^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 observa en la figura 26, en relación a la norma NTC 919 y la clasificación en los grupos de absorción de agua, se detallan incrementos significativos en todas las temperaturas, lo que permite el cambio de grupo en varios puntos de la gráfica. Los cambios más relevantes que se evalúan, y que permiten concluir que la molienda en húmedo es una forma de preparación ideal para procesos de extruido, es en la atmósfera oxidante, donde se muestran los cambios más significativos, los cuales se dan en todas las temperaturas evaluadas, es así que se observan cambios del grupo AIII al grupo AII_b a 950 °C; del grupo AII_b al grupo AII_a en lo 1000 °C y el cambio más significativo es del grupo AII_a al grupo AI en lo 1050 °C, lo que nos indica que la molienda en húmedo no solo reduce la porosidad abierta de los materiales, sino que incrementa la calidad técnica del mismo, logrando mejorías a temperaturas que se pueden alcanzar en hornos colmena, muy utilizados en la región.

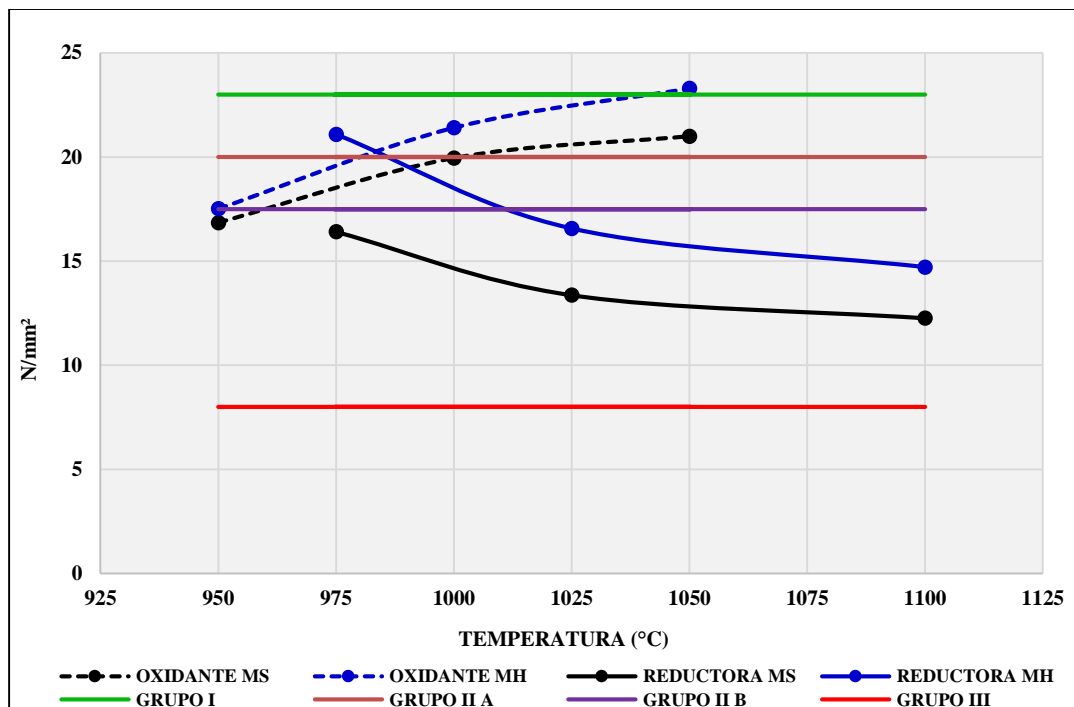


Figura 26. Gráfico comparativo de resistencia de productos MH vs NTC 919

Fuente. Autores.

Además, la molienda húmeda utilizada en la preparación para procesos de extrusión, no solo genera incrementos en el valor comercial de las piezas, sino ayuda a que este tipo de materiales de construcción sean más competitivos en los mercados internacionales. Sin embargo, hay que mencionar, que en la atmósfera reductora el único cambio de grupo se logra a los 975 °C, pasando del grupo AIII al grupo AII_a. A pesar de que es el único cambio que se observa en esta atmósfera, es de destacar, que el cambio que se logra es elevado, pero principalmente que este cambio se logra a temperaturas inferiores a los 1000 °C, este es un aspecto importante de destacar, pues la mejora se logra en temperaturas bajas. De hecho, aunque en la temperatura media y alta se reduce la resistencia mecánica, cabe destacar que las muestras MH siguen estando por encima de las muestras MS, las cuales han sido preparadas con métodos tradicionales.

5. Conclusiones

El estudio del comportamiento térmico y tecnológico de un producto cerámico extruido mediante la reconversión del método de preparación por molienda en húmedo, y los efectos ocurridos en los productos durante el proceso de cocción en horno colmena, ha llevado a las siguientes conclusiones:

La arcilla es una materia prima que presenta estructuras cristalinas asociadas a la caolinita, cuarzo y calcita, con presencia de minerales micáceos. Con una presencia importante de sílice libre confirmado por la baja pérdida por calcinación y el porcentaje de sílice, que puede afectar la etapa de precalentamiento. Posee una característica poco común en arcillas regionales como es la baja presencia de alúmina; además, se observa un bajo contenido en hierro, lo que posiblemente generará después de la cocción un color rojo claro en atmósfera oxidante y un color beige en atmósfera reductora debido a su porcentaje de óxido de titanio.

La molienda en húmedo afecta las características intrínsecas de la materia prima reduciendo en un 22,9% la relación arcilla/cuarzo del material, lo que genera una granulometría más uniforme y homogénea y evitará problemas dimensionales por la manipulación de los productos. Así mismo, se observa un cambio en la aptitud cerámica, mientras la molienda tradicional seca, permite fabricar tejas, ladrillos de perforación vertical (ladrillo cara vista) y baldosas, la molienda en húmedo permite fabricar ladrillos de perforación horizontal (bloques), bevedillas y piezas de paredes delgadas y de gran tamaño como los tabelones, productos que en los últimos años se han

vuelto muy comercializados debido a los diferentes usos, como son eregir muros y especialmente la fundición de placas para los techos, pues se reduce el costo y el peso de esta casi en un 50% a diferencia de las placas en concreto.

La reconversión del método de preparación de productos extruidos, mejora térmicamente el proceso de cocción, reduciendo en la curva de atmósfera oxidante en 5 horas el tiempo de cocción en la etapa de precalentamiento hasta llegar a la temperatura final de calentamiento, y hasta en 9 horas la curva de la atmósfera reductora, pues permite modificar el ciclo de cocción, acelerando este y aumentando la rentabilidad del proceso, no solo por la reducción del tiempo en la ventana de proceso (Menor tiempo – más productos) sino por el menor gasto de combustible.

La molienda en húmedo incrementa hasta en 5,91% la densidad del material en seco, obteniendo mayor uniformidad de partículas, logrando un mejor empaquetamiento y una mejor transferencia del calor a la estructura del material, ayudando no solo al proceso de secado, sino a una mejor uniformidad de este, pues genera mayor evaporación de agua, además, presenta pérdidas por cocción típicas de materiales con minerales arcillosos promedios, pues en todas las temperaturas y en las dos atmósferas no superan el 7%, lo que indica que es una materia prima propia para procesos de extrusión.

El comportamiento del material preparado por molienda húmeda, arroja una disminución en su porosidad, se pueden analizar, descensos del 2,6% hasta 7,3% en la atmósfera oxidante y del 5,2% hasta el 10,7% en la atmósfera reductora, e incrementos en la resistencia mecánica en la atmósfera oxidante de hasta del 32,96% en MH, valor superior al 25,26% en MS. Además, MH

con respecto a MS en 975 °C y 1000 °C, pasa del grupo AIIb a AIIa en las dos temperaturas, lo que mostrará un incremento en la resistencia y durabilidad de los materiales, además de un valor comercial más alto.

Finalmente, se puede deducir que la molienda en húmedo es una forma de preparación ideal para procesos de extruido, pues genera incrementos significativos en todas las propiedades evaluadas, evidenciándose, cambios significativos fundamentalmente en la atmósfera oxidante, atmosfera utilizada por todas las empresas de la región, donde se muestran modificaciones del grupo AIII al grupo AIIb a 950 °C; del grupo AIIb al grupo AIIa en lo 1000 °C y el cambio más significativo es del grupo AIIa al grupo AI en lo 1050 °C.

6. Recomendaciones

Se recomienda realizar un estudio factible, para determinar la viabilidad industrial de producir regionalmente productos cerámicos con los parámetros expuestos en este trabajo.

Se sugiere realizar la cocción en otros tipos de hornos, conservando las variables de preparación y conformado para evaluar comparativamente las propiedades tecnológicas obtenidas.

Este tipo de estudios resultan genéricos en distintos productos de mampostería, por esto se recomienda aplicarlo a los productos cerámicos regionales y nacionales de mayor nivel comercial.

Como se observó, las características granulométricas de los materiales toman un papel importante en el comportamiento de los productos en proceso y productos terminados. Por ello se recomienda, trabajar con tamaños de partícula inferiores a los trabajados en el presente estudio para evaluar su influencia en el conformado por extrusión y cocción en hornos colmena.

Referencias Bibliográficas

- Barba, A., Beltrán, V., Feliu, C., García, J., Ginés, F., Sánchez, E., & Sanz, V. (2002). *Materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas*. Castellón, España: Grupo de Tecnología Cerámica.
- Bueno, S., & Llana, A. A. (s.f.). *Estudio de caracterización tecnológica de la arcilla gris de Almuradiel*. Andalucía: Innovaarcilla.
- Cámara de Comercio de Cúcuta. (04 de Abril de 2019). *Encuentro Internacional de la Arcilla, la Cerámica y la Construcción*.
- Cely Illera, L. (2016). *Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia*, 80, 31-37.
- Djangang, C. N., Elimbi, A., Melo, U. C., Lecomte, G. L., Nkoumbou, C., Soro, J., . . . Njopwouo, D. (2008). Sintering of clay-chamotte ceramic composites for refractory bricks. *Ceramics International*, 34, 1207–1213.
- Escandino, A., Gallego, M., Ibañez, M. J., & Negre, F. (1987). Secado de materiales Cerámicos. I. Factores que afectan a la humedad de equilibrio. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 26(6), 367-373.
- Escardino Belloch, A., Amoros Albaro, J. L., & Enrique Navarro, J. E. (1981). Estudio de pastas de gres para pavimentos. *Bol.Soc.Esp.Ceram.Vidr.*, 20(1), 17-24.
- Estrada , D. A., & Espinosa de los Monteros, J. (1982). Elsecado de los productos cerámicos. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 21(6), 327-339.

- Fernández Abajo, M. (2000). *Manual sobre Fabricación de baldosas, tejas y ladrillos*. Barcelona: Ed. Beralmar S.A.
- Gelves Diaz, J. F., Sánchez Molina, J., & Peña Rodríguez, G. (2009). Comportamiento de las arcillas del Área Metropolitana de Cúcuta sometidas a proceso de moldeo por extrusión. *Respuestas*, 2, 32-38.
- Gelves, J. F., Monroy, R., Sánchez, J., & Ramírez, R. P. (2013). Estudio comparativo de las técnicas de extrusión y prensado como procesos de conformado de productos cerámicos de construcción en el Área Metropolitana de Cúcuta. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 52(1), 48-54.
- Gil, C., Peiró, M. C., Gómez, J. J., Chiva, L., Cerisuelo, E., & Carda, J. B. (2006). Estudio de la porosidad en soportes de gres porcelánico. *Congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico -QUALICER-*, (págs. 43-48). Castellón.
- Gilabert, J., Zumaquero, E., Machí, C., Toledo, J., & Gómez-Tena, M. P. (2015). Caracterización mecánica y tribológica de recubrimientos diamond-like carbon aplicados por la técnica deposición química de vapor sobre baldosas cerámicas. *Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidrio*, 54, 209–218.
- Guerrero Gómez, G., Espinel Blanco, E., & Sánchez Acevedo, H. G. (2017). Análisis de temperaturas durante la cocción de ladrillos macizos y sus propiedades finales. *Tecnura*, 21(51), 118-131.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación -ICONTEC-. (12 de 10 de 1987). NTC 2401. Arcillas grasas para la industria cerámica. *Norma técnica*. Bogotá, Colombia: ICONTEC.

- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - ICONTEC-. (26 de 11 de 1997). NTC 4321-4. Ingeniería civil y arquitectura. Baldosas cerámicas. Parte 4: método de ensayo para determinar el modulo de rotura y la resistencia a la flexión. *Norma técnica*. Bogota, Colombia: ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - ICONTEC-. (23 de 09 de 1998). NTC 4321-3. Ingeniería civil y arquitectura. Baldosas cerámicas. Parte 3: método de ensayo para determinar la absorción de agua, porosidad aparente, densidad relativa aparente y densidad aparente. *Norma técnica*. Bogotá, Colombia: ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación -ICONTEC-. (28 de 11 de 1979). NTC 1522. Suelo. Ensayo para determinar la granulometria por tamizado. *Norma técnica*. Bogotá, Colombia: ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación -ICONTEC-. (19 de 10 de 1994). NTC 1776. Método de ensayo para determinar el contenido total de humedad evaporable por secado de los agregados. *Norma técnica*. Bogotá, Colombia: ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y certificación -ICONTEC-. (10 de 05 de 1995). NTC 3674. Ingeniería civil y arquitectura. Practica para la reducción del tamaño de las muestras de agregados, tomadas en campo, para la realización de ensayos. *Norma técnica*. Bogota, Colombia: ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación -ICONTEC-. (28 de 07 de 1999). NTC 4630. Metodo de ensayo para la determinación del limite liquido, del limite plastico y del índice de plasticidad de suelos cohesivos. *Norma técnica*. Bogotá, Colombia: ICONTEC.

- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación -ICONTEC-. (27 de 09 de 2000). NTC 919. Baldosas cerámicas. Definiciones, clasificación, características y rotulado. *Norma Técnica*. Bogotá, Colombia: ICONTEC.
- Instituto de Tecnología Cerámica y Comisión de Trabajo. (2009). *Guía de mejores técnicas disponibles para el sector de fabricación de baldosas cerámicas en la comunitat valenciana*. Valencia: Centro de Tecnologías Limpias.
- Lee, V.-G., & Yeh, T.-H. (2008). Sintering effects on the development of mechanical properties of fired clay ceramics. *Materials Science and Engineering A*, 485, 5–13.
- Moreno Quintero, M. P., & Pabón Acevedo, Y. A. (2017). Tesis de pregrado, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta.
- Moreno Quintero, M. P., & Pabón Acevedo, Y. A. (2018). *Estudio de la influencia del proceso de molienda en el desarrollo estructural de un producto extruido al ser evaluado por la temperatura final de cocción*. Tesis de pregrado, Cúcuta.
- Pinto, A. (2011). Cerámicos. En M. d. Tecnológica., *Materiales y materias primas* (págs. 1-29). Buenos Aires: Saavedra.
- Restrepo Baena, Ó. J. (2011). *Baldosas cerámicas y gres porcelánico: Un mundo en permanente evolución*. Medellín: Centro Editorial Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
- Reyes Jaramillo, I. (2000). Las arcillas: barro, creación, vida y arte. *ContactoS*, 36, 24-32.
- Rondón, H. A. (2011). Evaluación del comportamiento de arcillas sometidas a diferentes tiempos de exposición a altas temperaturas. *Revista Escuela de Ingeniería de Antioquía*(16), 175-187.

SACMI, Asociación española de técnicos cerámicos. (2004). *Tecnología Cerámica Aplicada* (Vol.

I). Castellón de la Plana, España: Editorial Faenza Editrice Ibérica.

Sánchez Molina, J., & Díaz García, J. I. (2011). Cúcuta: Universidad Francisco de Paula Santander.

Sánchez Molina, J., & Ramírez Delgado, R. P. (2013). *El Clúster de la cerámica del área metropolitana de Cúcuta*. Cúcuta: UFPS.

Sanchez Molina, J., Gelvez Díaz, J. F., & Romero Arcos, Y. A. (2012). Caracterización tecnológica y del talento humano de las empresas fabricantes de cerámica roja ubicadas en el área metropolitana de Cúcuta. *Respuestas*, 17(2), 71-80.

Sánchez, E., Ginés, F., Agramunt, J. V., & Monzó, M. (1998). *Congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico - QUALICER*, (págs. 97-112). Castellon.

Sarabia Guarín, A., Sánchez Molina, J., & Leyva Díaz, J. C. (2017). Uso de nutrientes tecnológicos como materia prima en la fabricación de materiales de construcción en el paradigma de la economía circular. *Respuestas*, 22(1), 6-16.

Zaballa, J. (1972). Trituración y molienda de minerales duros. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 11(3), 193-196.