



DETERMINACIÓN DE LA MEZCLA ÓPTIMA DE ARCILLA DEL BLOQUE H-10 PARA LA INDUSTRIA CERÁMICA

**Ricardo Andrés García León - Eder Flórez Solano
Gustavo Guerrero Gómez**

**DETERMINACIÓN
DE LA MEZCLA ÓPTIMA DE
ARCILLA DEL BLOQUE H-10
PARA LA INDUSTRIA
CERÁMICA**

RICARDO ANDRÉS GARCÍA LEÓN
EDER FLÓREZ SOLANO
GUSTAVO GUERRERO GÓMEZ

García León, Ricardo Andrés

Determinación de la mezcla óptima de arcilla del bloque H-10 para la industria cerámica / Ricardo Andrés García León, Eder Flórez Solano, Gustavo Guerrero Gómez. -- 1a. ed. -- Ocaña : Universidad Francisco de Paula Santander ; Bogotá : Ecoe Ediciones, 2020.
89 p. -- (Ingeniería y afines. Ingeniería civil)

Incluye datos de los autores en la pasta. -- Contiene bibliografía.

ISBN 978-958-503-017-6 -- 978-958-503-022-0 (e-book)

1. Bloques (Materiales de construcción) - Normas técnicas
2. Industria cerámica - Norte de Santander 3. Bloque H-10 I. Flórez Solano, Éder Norberto II. Guerrero Gómez, Gustavo III. Título
IV. Serie

CDD: 693.4 ed. 23

CO-BoBN- a1069419



Área: Ingeniería y afines

Subárea: Ingeniería civil



**Universidad Francisco
de Paula Santander**

Ocaña - Colombia
Vigilada Mineducación

© Ricardo Andrés García León

© Eder Flórez Solano

© Gustavo Guerrero Gómez

► Universidad Francisco
de Paula Santander
Vía Acolsure, Sede el Algodonal
Ocaña Norte de Santander -
Colombia
Teléfono (057)(7) 5690088
Bogotá, Colombia

► Ecoe Ediciones Limitada
Carrera 19 # 63C 32
Bogotá, Colombia

Primera edición: Bogotá, diciembre del 2020

ISBN: 978-958-503-017-6

e-ISBN: 978-958-503-022-0

Directora editorial: Claudia Garay Castro

Corrección de estilo: Paula Rueda

Copy: Angie Sánchez Wilchez

Diagramación: Denise Rodríguez

Carátula: Wilson Marulanda Muñoz

Impresión: Carvajal Soluciones de
comunicación S.A.S

Carrera 69 #15 -24

*Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio
sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.*

Impreso y hecho en Colombia - Todos los derechos reservados

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	XIII
CAPÍTULO 1: PROPIEDADES DE LA ARCILLA Y METODOLOGÍAS PARA LA RECOLECCIÓN DE MUESTRAS.....	1
1.1 Proceso de fabricación del bloque H-10	2
1.2 Diagramas ternarios	2
1.3 Clasificación de las arcillas	3
1.4 Metodología para la selección de las muestras de materia prima.....	5
CAPÍTULO 2: PROCESO DE PRODUCCIÓN PARA LA FABRICACIÓN DE PRODUCTOS DE MAMPOSTERÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN	11
2.1 Detalles del proceso productivo	11
2.2 Evaluación del proceso productivo	15
CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN DEL PRODUCTO FINAL ACTUAL Y CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE ARCILLAS.....	17
3.1 Características morfológicas del bloque H-10	17
3.2 Preparación de muestras para ensayos físicos	18
3.3 Ensayos destructivos	18

3.3.1 Tasa de absorción inicial	19
3.3.2 Tasa de absorción 24 horas.....	21
3.3.3 Resistencia mecánica a la compresión	23
3.4 Resultados estadísticos: tolerancia dimensional.....	25
3.5 Evaluación de los resultados obtenidos	31
3.6 Caracterización de la materia prima.....	31
3.6.1 Recolección de las muestras	31
3.6.2 Análisis tecnológicos	33
3.7 Caracterización física	34
3.7.1 Tamizado vía seca.....	35
3.7.2 Análisis del tamaño de grano por medio del hidrómetro	41
3.8 Evaluación de los resultados obtenidos	47
3.9 Índice de plasticidad.....	47
CAPÍTULO 4: DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE LA MEZCLA ÓPTIMA DE ARCILLA	51
4.1 Determinación de las composiciones mejoradas con base en dos muestras de arcilla	51
4.2 Determinación de las composiciones mejoradas con base en tres muestras de arcilla	53
4.3 Evaluación de los resultados obtenidos	55
4.4 Caracterización físico-cerámica	55
4.4.1 Retenido sobre tamiz e hidrometría.....	56
4.4.2 Conformado del material	58
4.4.3 Contracción lineal	59
4.4.4 Absorción de agua	61
4.4.5 Resistencia mecánica a la flexión en la quema.....	62
4.4.6 Curva de Bigot	64
4.5 Determinación química y mineralógica	64
4.5.1 Fluorescencia de rayos X (FRX)	65
4.5.2 Diagramas de fases	66
4.5.3 Difracción de rayos X (DRX)	69

4.6 Evaluación de los resultados obtenidos	73
4.7 Caracterización térmica	74
4.7.1 Análisis térmico diferencial (ATD)	74
4.7.2 Análisis termogravimétrico (ATG)	74
4.8 Caracterización de la gráfica de quema para las mezclas estudiadas	77
CAPÍTULO 5: DETERMINACIÓN DE LA MEZCLA ÓPTIMA ENCONTRADA EXPERIMENTALMENTE.....	79
5.1 Determinación de los resultados obtenidos	79
5.2 Evaluación de los resultados obtenidos	80
BIBLIOGRAFÍA	83

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.	Clasificación geológica.....	3
TABLA 2.	Clasificación química.....	4
TABLA 3.	Matriz factores actuales de la calidad del bloque H-10.....	15
TABLA 4.	Muestras de bloques H-10 recolectados.....	19
TABLA 5.	Absorción inicial de agua	20
TABLA 6.	Resumen estadístico para absorción inicial.....	21
TABLA 7.	Absorción final de agua	22
TABLA 8.	Resumen estadístico para absorción final.....	23
TABLA 9.	Resistencia mecánica a la compresión.....	24
TABLA 10.	Resumen de estadísticas para el ancho.....	26
TABLA 11.	Resumen de estadísticas para el alto.....	27
TABLA 12.	Resumen de estadísticas para el largo.....	28
TABLA 13.	Resumen de estadísticas para el tabique.....	29
TABLA 14.	Resumen de estadísticas para los espesores.....	30
TABLA 15.	Resumen de los análisis físicos al producto terminado actual.....	30
TABLA 16.	Muestras de las arcillas recolectadas para la empresa.....	32
TABLA 17.	Muestras de las arcillas recolectadas en las zonas cercanas.....	33
TABLA 18.	Tipo de ensayo y finalidad.....	34
TABLA 19.	Clasificación según AASHTO.....	37
TABLA 20.	Clasificación USCS de los suelos.....	38
TABLA 21.	Retenido sobre tamiz en malla ASTM 230. Datos para la empresa.....	40
TABLA 22.	Retenido sobre tamiz en malla ASTM 230. Datos de las fábricas artesanales cercanas.....	40
TABLA 23.	Distribución granulométrica por hidrometría para todas las muestras.....	41

TABLA 24. Hidrometría por granulometría	43
TABLA 25. Cálculo del índice del tipo de suelo para todas las muestras.....	48
TABLA 26. Diseño de dos mezclas de arcilla para muestras M1 y M5.....	52
TABLA 27. Diseño de tres mezclas de arcilla para tres muestras (M1, M2 y M5).....	54
TABLA 28. Preparación de las muestras según lo obtenido en el diseño estadístico	56
TABLA 29. Datos hidrometría por granulometría para las mezclas M7 y M8.....	56
TABLA 30. Cálculo del índice de plasticidad de las mezclas M7 y M8.....	57
TABLA 31. Condición de las composiciones para el conformado.....	58
TABLA 32. Datos de encogimiento lineal para las probetas extruidas de la composición M7	59
TABLA 33. Datos de encogimiento lineal para las probetas extruidas de la composición M8.....	60
TABLA 34. Esfuerzo último a flexión en función de la temperatura.....	63
TABLA 35. Datos promedios de la curva de Bigot para las muestras seleccionadas.....	64
TABLA 36. Fluorescencia de rayos X para ambas mezclas óptimas (M7 y M8).....	65
TABLA 37. Valores de $A = \text{SiO}_2$, $B = \text{K}_2\text{O}$ y $C = \text{Al}_2\text{O}_3$ para encontrar la temperatura de cocción	69
TABLA 38. Disposiciones mineralógicas del análisis DRX, para la mezcla M7	70
TABLA 39. Disposición mineralógica de las observaciones DRX para mezcla M7	72
TABLA 40. Propiedades de las fases.....	73
TABLA 41. Análisis de las gráficas ATD y ATG para la mezcla M7	76
TABLA 42. Relación de los resultados del laboratorio y la resistencia mecánica para las mezclas M7 y M8.....	79

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. Etapas del proceso de fabricación de productos cerámicos	2
FIGURA 2. Representación en el diagrama de fase de la contextura química más idónea de la matriz casi cerámica a partir de la mezcla mineral	3
FIGURA 3. Metodología de la toma de muestras.....	5
FIGURA 4. Proceso de análisis de laboratorio.....	6
FIGURA 5. Muestreo por pilas y región de recolección	7
FIGURA 6. Metodología aplicada en la selección de la materia prima y ubicación	8
FIGURA 7. Diagrama del proceso de fabricación de productos cerámicos...	12
FIGURA 8. Entradas y salidas en la producción de bloques H-10.....	13
FIGURA 9. Proceso de quema en un horno tipo Hoffman.....	14
FIGURA 10. Dimensiones del Bloque H-10 y toma de mediciones	18
FIGURA 11. Representación de la prueba de absorción inicial.....	19
FIGURA 12. Análisis estadístico para absorción inicial	20
FIGURA 13. Representación de la prueba de absorción final.....	21
FIGURA 14. Análisis estadístico para absorción final vs. Número de muestras.....	22
FIGURA 15. Pruebas de fuerza en el producto	23
FIGURA 16. Tenacidad al aplastamiento vs. Número de muestras.....	24
FIGURA 17. Carga vs. tiempo. Ensayo de compresión.....	25
FIGURA 18. Análisis estadístico para el ancho.....	25
FIGURA 19. Análisis estadístico para el alto.....	26
FIGURA 20. Análisis estadístico para el largo	27
FIGURA 21. Análisis estadístico para el tabique	28
FIGURA 22. Análisis estadístico para los espesores.....	29
FIGURA 23. Procedimiento de los análisis realizados.....	35

FIGURA 24. Resultados de los tamaños de grano para todas las muestras	36
FIGURA 25. Resultados de hidrometría para las muestras.....	42
FIGURA 26. Gráfica de los resultados globales de las muestras de arcillas	43
FIGURA 27. Gráfica de los puntos de hidrometría en el diagrama de Winkler.....	44
FIGURA 28. Diagrama de Winkler para tipos de textura	45
FIGURA 29. Diagrama de Winkler. Zonas para el tipo de producto.....	46
FIGURA 30. Posible región óptima para la mezcla de arcilla	46
FIGURA 31. Plasticidad de las muestras (M1, M2, M3, M4 y M5).....	49
FIGURA 32. Diagrama de predicción de la extrusión	50
FIGURA 33. Resultados gráficos de la tabla 26 para (M1 y M5).....	52
FIGURA 34. Muestras seleccionadas para el diseño experimental (M1 y M5)	53
FIGURA 35. Representación gráfica de los resultados (M1, M2 y M5).....	54
FIGURA 36. Resultado de las mezclas de las muestras (M1, M2, M5).....	55
FIGURA 37. Gráfica del tamaño de grano en tamizado e hidrometría de las composiciones M7 y M8	56
FIGURA 38. Plasticidad en el diagrama Casagrande para las mezclas M7 y M8.....	57
FIGURA 39. Comportamiento en extrusión de las mezclas M7 y M8	58
FIGURA 40. Conformación de las probetas en el laboratorio	59
FIGURA 41. Contracción al secado de las mezclas óptimas.....	60
FIGURA 42. Contracción lineal en Cocción vs. temperatura.....	61
FIGURA 43. Absorción de Agua vs. temperatura.....	61
FIGURA 44. Resistencia mecánica a la flexión y carga de rotura.....	62
FIGURA 45. Temperatura vs. Resistencia a la flexión.....	63
FIGURA 46. Diagrama ternario de SiO ₂ , Fe ₂ O ₃ y Al ₂ O ₃	67
FIGURA 47. Esquema <i>ternario FactSage</i> SiO ₂ , Al ₂ O ₃ y K ₂ O, para las dos mezclas óptimas (M7 y M8), y las muestras (M1, M2 y M5)	68
FIGURA 48. Difractograma para la mezcla M7.....	72
FIGURA 49. Termograma de los análisis térmicos de ATD y ATG para la mezcla M7	75
FIGURA 50. Observación de la quema óptima del horno en estudio	77
FIGURA 51. a) Defectos de los bloques.....	80
FIGURA 52. b) Microestructura obtenida por SEM.....	81
FIGURA 53. Elementos principales en la superficie obtenida por SEM-EDS.	81

INTRODUCCIÓN

Este libro, resultado de investigación, busca responder a la necesidad de aumentar la calidad del bloque H-10, teniendo en cuenta los procedimientos y parámetros de las normas técnicas colombianas NTC 4017 y NTC 4205 para las empresas ubicadas en el municipio de Ocaña, Norte de Santander. Durante el desarrollo de la investigación (partiendo de los porcentajes adecuados de arenas, limos y arcillas) se llevaron a cabo pruebas de laboratorio a través de la determinación física, química y térmica de las arcillas utilizadas actualmente, con la finalidad de mejorar las características de la mezcla actual con la materia prima propia de las empresas. Para asegurar la validez estadística de las posibles mezclas se utilizó el *software Stargraphics Centurion*. Por otra parte, se definieron las condiciones tecnológicas del proceso utilizado actualmente por una empresa del sector cerámico, buscando determinar si la materia prima empleada es adecuada para la implementación de esta mezcla óptima propuesta o si es necesario un reajuste o cambio de la técnica/tecnología implementada. También se realizó una valoración de los principales elementos que intervienen en la calidad del proceso de fabricación de los bloques, en donde se determinó la ventana del proceso productivo actual.

Al final se realizó la evaluación del producto obtenido actualmente por la empresa, teniendo en cuenta lo establecido en las normas NTC 4017 y 4205, y de esta manera verificar el porcentaje de cumplimiento. En base a esto se diseñó y caracterizó la mezcla óptima encontrada con análisis completos de su comportamiento físico, químico y térmico, realizando diagramas ternarios para seleccionar una mezcla que obtuviera mejores propiedades en cocción, y por lo tanto mejores propiedades finales.

CAPÍTULO 1

PROPIEDADES DE LA ARCILLA Y METODOLOGÍAS PARA LA RECOLECCIÓN DE MUESTRAS

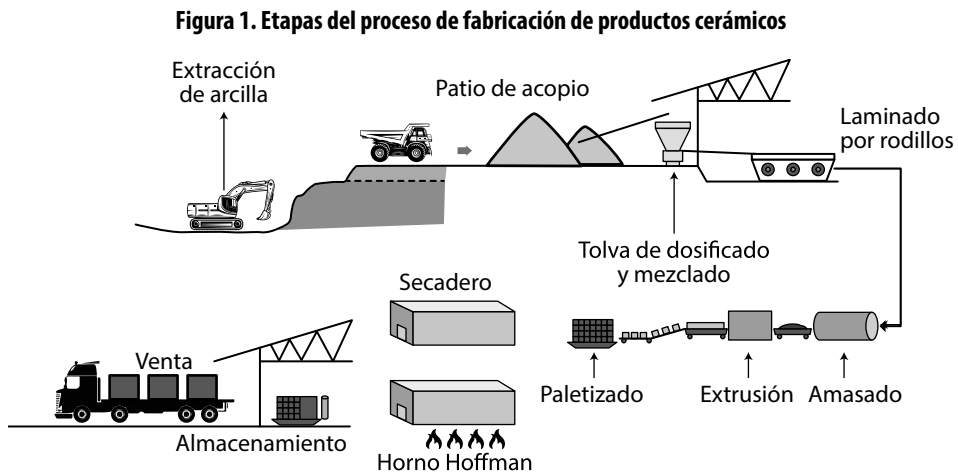
Actualmente los suelos están considerados como un mineral arcilloso, compuesto principalmente por una mezcla de aluminosilicatos y otros componentes cerámicos y orgánicos. Para caracterizar las arcillas se pueden emplear los análisis tecnológicos como: granulometría, límites de Atterberg o de plasticidad, fluorescencia y difracción de rayos X, análisis térmicos y termogravimétricos diferenciales (García, Flórez y Acevedo, 2018; García, Flórez y Espinel, 2020).

El sector cerámico en la región de Norte de Santander está dedicado principalmente a la producción de bloques H-10 × 30 y H-10 × 40, produciendo en gran parte los de H10 × 30 de 6 huecos perforados debido a que son los de mayor demanda. El combustible utilizado en la fabricación de los productos además de la arcilla y sus derivados es el carbón mineral. Por otra parte, se han realizado diferentes investigaciones con el fin de determinar una mezcla adecuada con distintas arcillas y componentes como cenizas y residuos, que han cumplido con la calidad exigida de los productos finales (Amariz, 2016; Augusto, García y Vaca, 2013).

El mejoramiento de las mezclas se llevó a cabo usando diseños de experimentos, variando cantidades de las arcillas de acuerdo a su composición química y mineralógica. Los parámetros de selección de las mezclas se basaron en análisis como proporciones de impregnación de H₂O, resistencias al aplastamiento y tensión apropiadas (entre esto las partículas con diámetro menor a 0.08 y 0.005 mm correspondientes a limo y las partículas con diámetro menor a 0.005 hasta 0 mm correspondientes a arcilla).

1.1 Proceso de fabricación del bloque H-10

El proceso cerámico se compone principalmente de tres fases que son: preparación de la pasta cerámica, moldeo de la pieza y cocción (**figura 1**). En la primera fase del proceso se modifica la composición y la plasticidad adicionando otras arcillas con la finalidad de obtener una pasta cerámica homogénea, luego se moldea según la forma deseada (a presión o extrusión) y, una vez se ha obtenido la pieza moldeada, se procede al secado controlando la velocidad de evaporación de agua con el fin de evitar defectos en la pieza. Posteriormente la pieza se sinteriza, es decir, se somete al proceso de cocción con el fin de disminuir la porosidad, aumentar la densidad y la resistencia mecánica (Muñoz, Muñoz, Mancilla y Rodríguez, 2007; Jácome Manzano, 2012; Barranzuela, 2014).



Fuente: adaptado de García, Flórez y Medina (2018).

En su mayoría las arcillas se utilizan como material de edificaciones para la construcción; el 90 % se aplica en la fabricación de materiales de agregados y construcciones civiles y el restante 10 % se dedica a otras industrias (García y Suárez, 2004; Swisscontact, 2011; Andrade, Covelo y Vega, 2005). Estas arcillas se pueden clasificar según su mineralogía del tipo caolín, tipo illita y montmorillonita (Díaz y Torrecillas, 2002).

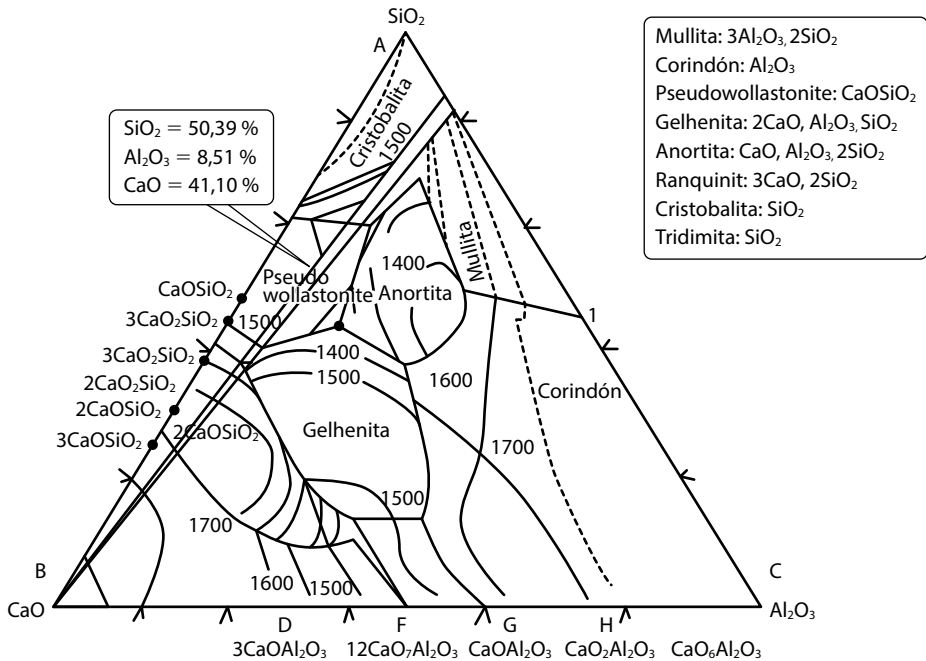
1.2 Diagramas ternarios

Los diagramas ternarios se obtienen a partir de tres componentes principales en porcentaje de peso (wt.%), de los elementos químicos en puntos para distintas mezclas obtenidas en el diseño experimental, estableciendo entre todos los grupos el diagrama de fases a una determinada temperatura. Conociendo la composición presente se puede diseñar u optimizar el proceso aplicado para obtener la fase deseada. Dichos

diagramas son utilizados en diferentes aplicaciones en el sector tecnológico e industrial (Rodríguez, 2009).

Los porcentajes de un diagrama triangular o ternario van del 0 a 100% de contenido de cada mineral, como se muestra en la **figura 2**.

Figura 2. Representación en el diagrama de fase de la contextura química más idónea de la matriz casi cerámica a partir de la mezcla mineral



Fuente: adaptado de Cisternas (2014).

1.3 Clasificación de las arcillas

Debido a la gran variedad de las arcillas y sus diversas maneras de clasificarse las **tablas 1 y 2** muestran algunas de las propiedades características de las arcillas:

Tabla 1. Clasificación geológica

Grupo de arcillas	Características
Residuales	Se forman de arcillas patrones. Siempre han estado estables en sus sitios.
Coluviales	Estas se concentran por las lluvias. Pueden ser aislantes de calor y no aislantes.
Sedimentarias	Se han movido de la arcilla patrones por fenómenos atmosféricos.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Clasificación química

Grupo	Minerales	Características
Caolinita $Al_2(Si_2O_5)_2(OH)_4$	Caolinita Dickita Nacrita Analcita Endellita Haloisita	<ul style="list-style-type: none"> • Bilaminar dioctaédrica. • Formada por capa T de silicio y capa O de aluminio. • Elevado punto de fusión ($> 1200\text{ }^\circ\text{C}$) ideal para el gres. • Baja plasticidad y expansión térmica.
Illita $K_{1.5-1}Al_4(Si_{6.5-7}Al_{1.5-1})O_{20}(OH)_4$	Moscovita Bravaisita Brommallita Atapulgita Bentonitas Ordovicea	<ul style="list-style-type: none"> • Dioctaédricas de la forma T-O-T. • Plasticidad media. • Menor punto de fusión que la caolinita por lo que aumenta la capacidad de fundir. • En la quema del ladrillo se presenta un cambio rápido en la porosidad, además se contrae rápido el material.
Esmeclita $(Na,Ca)_{0.3}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$	Pirofilita Talco Beidellita Montmorillonita Nontronita Saponita Hectorita Sauconita	<ul style="list-style-type: none"> • Estructura del tipo T-O-T. • Altas propiedades de absorción y adsorción. • Alta plasticidad. • Alta resistencia mecánica en seco. • Retrasan el proceso de secado debido al gran volumen de agua interlamina que acepta en su estructura altas contracciones en la cocción.
Clorita $(Mg,Fe)_3(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2(Mg,Fe)_3(OH)_6$	Baileycloro Chamosita Clinocloro Cookeíta Donbassita Gonyerita Nimita Odinita Ortochamosita Pennantita Ripidolita Sudoíta	<ul style="list-style-type: none"> • Posee una estructura tipo T-O-T más una capa de octaedros llamada capa brucítica. • Se caracteriza por tener en la mayoría de los casos Mg o Fe en los octaedros.

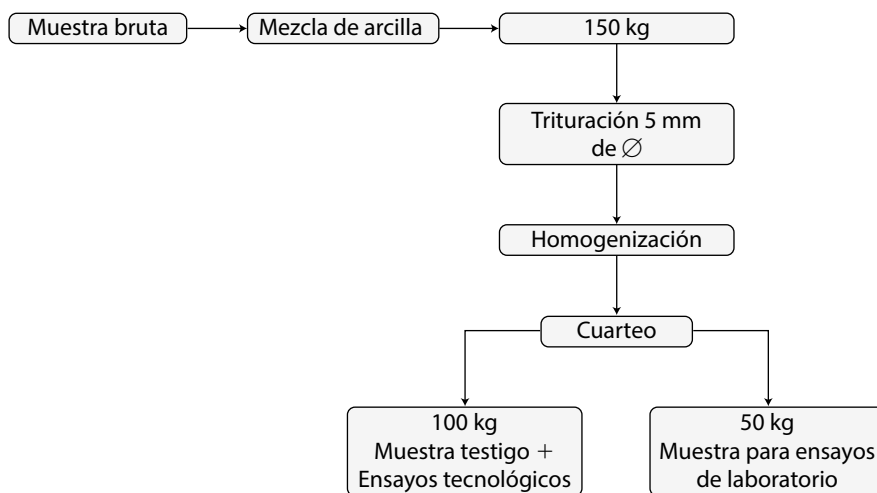
Fuente: adaptado de Morales y Niño (2006).

1.4 Metodología para la selección de las muestras de materia prima

En esta sección se establece estadísticamente la cantidad de muestra que debe ser recolectada considerando las minas de arcilla de la empresa y, de esta manera, obtener datos que brinden cantidades ideales de los componentes para la optimización de la mezcla de material cerámico existente y los posteriores análisis de laboratorio que deben realizarse.

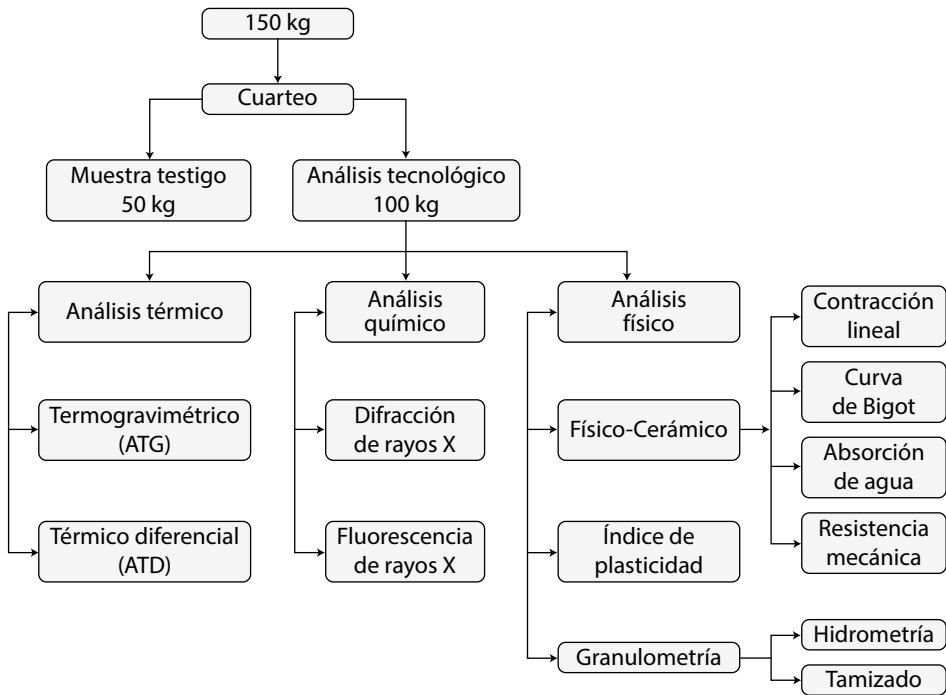
La medición experimental se hace con pruebas de granulometría, para encontrar los porcentajes de la mezcla óptima para la fabricación (especialmente de los bloques H-10), siguiendo la metodología de la **figura 3** y **figura 4**. Los porcentajes son considerados como factores y el dominio experimental —superficie de respuesta—, está relacionado con la interacción de las proporciones de los componentes (Mendoza y Bautista, 2002; Martínez, 2012; Ortega, Bustamante, Gutiérrez y Correa, 2015; Gutiérrez y De La Vara, 2008; Statgraphics, 2006; Álvarez Guerrero, 2015).

Figura 3. Metodología de la toma de muestras



Nota: la figura muestra la metodología aplicada en la selección de las muestras de la materia prima utilizada por la empresa.

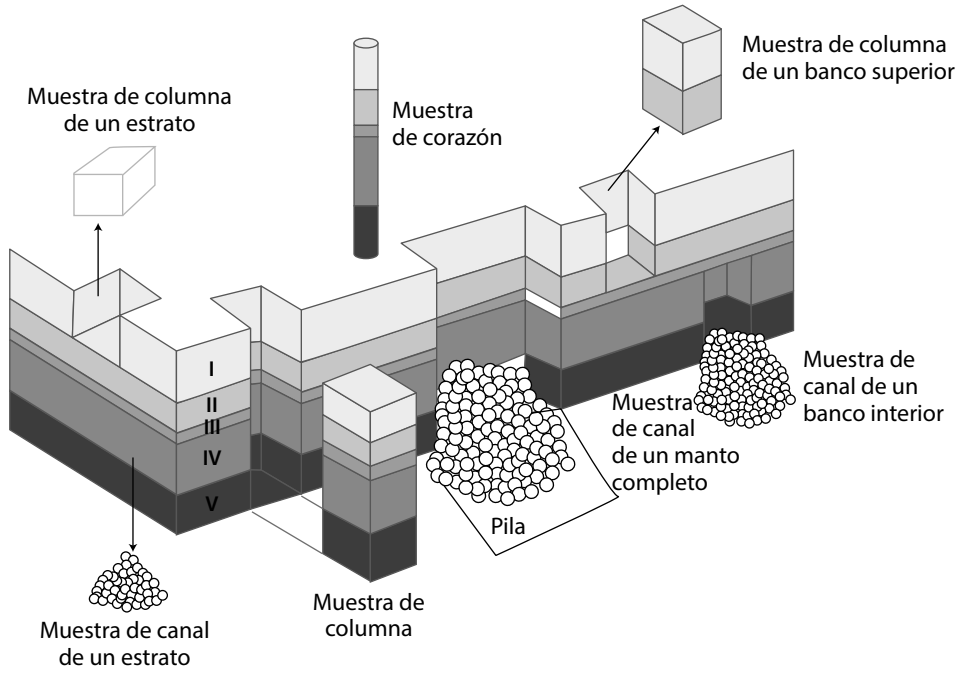
Fuente: elaboración propia.

Figura 4. Proceso de análisis de laboratorio

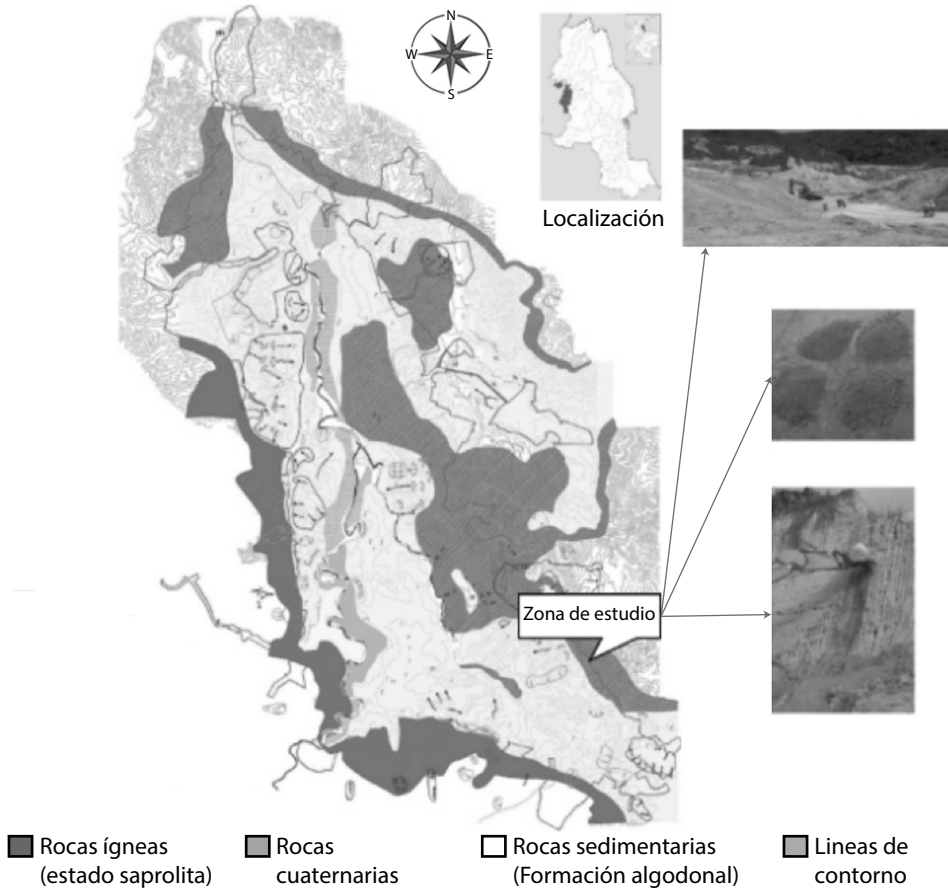
Nota: la figura muestra el procedimiento que se llevó a cabo para el cuarteo y toma de las muestras para la realización de cada uno de los ensayos tecnológicos.

Fuente: elaboración propia.

La población del experimento corresponde a las pilas de materia prima del patio de acopio de una de las ladrilleras objeto de estudio para la obtención y caracterización de la mezcla cerámica, mientras que el muestreo de pilas se hace para obtener muestras voluminosas y representativas de arcillas trituradas, las cuales se toman desde una pila de almacenamiento. Una vez identificadas las pilas, se procedió a realizar una toma de muestras tipo canal con prueba de volumen de arcilla triturada que incluye el espesor total de la pila tomada, de tal manera, que cada uno de los estratos constituyentes están representados en igual proporción a su espesor como se ve en la **figura 5** y **figura 6**:

Figura 5. Muestreo por pilas y región de recolección

Fuente: adaptado de Ecocarbón (1995).

Figura 6. Metodología aplicada en la selección de la materia prima y ubicación

Fuente: adaptado de García, Gómez y Jaramillo (2020).

La muestra tipo canal se obtuvo mediante un corte uniforme y continuo perpendicular a la pila. Se utilizó un muestreo probabilístico para poblaciones finitas mediante la estadística, teniendo en cuenta que cada pila tiene aproximadamente 4 toneladas. Con el fin de determinar la cantidad de muestra se utilizó la siguiente expresión:

$$X = \frac{N \times Z^2 \times p \times q}{E^2 \times (N - 1) \times Z^2 \times p \times q}$$

Donde N = Total de la población = 40.000 kilogramos = 40 toneladas, Z = Nivel de confianza de 1.96 para un nivel de confianza del 95 %, p = Probabilidad, variabilidad positiva (0.942), q = Porcentaje para que no se presente la acción, variabilidad negativa = $1 - p = (0.058)$, y E = Precisión – margen de error (0.065).

Con ello se obtiene el siguiente cálculo:

$$X = \frac{40.000 \times (1,96)^2 \times 0,98 \times 0,02}{(0,065)^2 \times (40.000 - 1) \times (1,96)^2 \times 0,98 \times 0,02}$$

$$X = 49,61 \approx 50 \text{ kg/muestra}$$

Luego se procedió a realizar el cálculo para poblaciones infinitas. La siguiente expresión fue utilizada para calcular el número mínimo de kg de materia prima que serán tomados del centro de acopio:

$$n = \frac{Z^2 \times p \times q}{E^2}$$

$$n = \frac{(1,96)^2 \times 0,98 \times 0,02}{(0,065)^2}$$

$$n = 49,67 \approx 50 \text{ kg/muestra}$$

Como se observa en los cálculos anteriores y según conceptos de expertos, para asegurar un nivel de confianza del 95 %, se determinó que el número mínimo de muestras era de 2, considerando el color de las pilas recolectadas por la empresa.

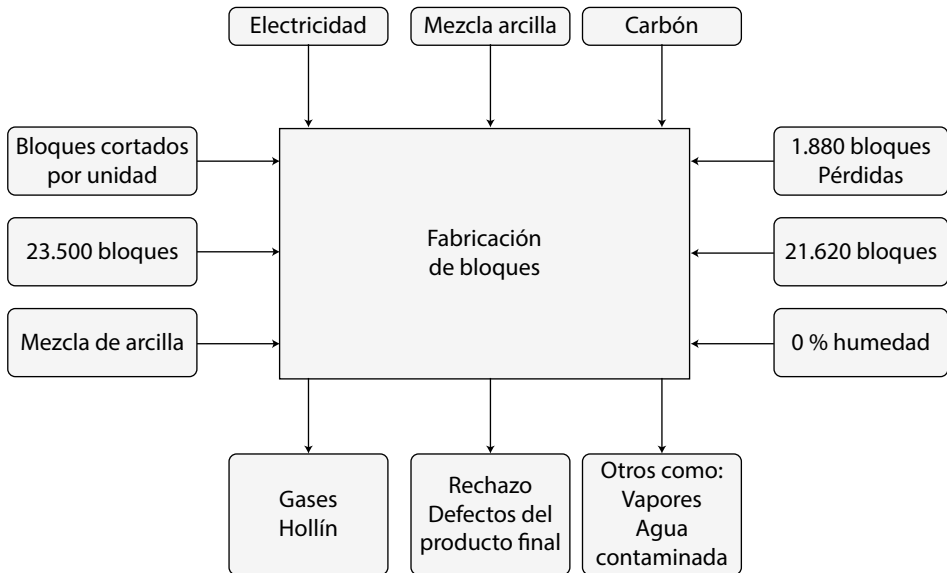
CAPÍTULO 2

PROCESO DE PRODUCCIÓN PARA LA FABRICACIÓN DE PRODUCTOS DE MAMPOSTERÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN

Este capítulo detalla de forma general las etapas que intervienen en el proceso de fabricación de productos cerámicos de mampostería para la construcción. Como punto de partida de cualquier proceso productivo, es de gran importancia determinar las variables de este y observar cómo están influyendo en las propiedades del producto final. Para establecer mejoras con lo que evidentemente se logrará optimizar el proceso productivo y por lo tanto, las propiedades físicas y mecánicas del producto final.

2.1 Detalles del proceso productivo

Con la finalidad de identificar las variables que influyen en un proceso productivo es importante realizar el diagrama de este. La **figura 7** muestra información en detalle en las etapas del proceso para la fabricación de productos de mampostería de arcilla, específicamente bloques (García y Flórez, 2016; García, *et al.*, 2019). Se realizó un análisis a detalle de cada etapa del proceso para identificar de forma adecuada errores que pudieran estar ocasionando bajo rendimiento en la obtención del producto cerámico final. Por otra parte, la **figura 8** describe de forma general las entradas, salidas y desechos generados en la fabricación del bloque H-10.

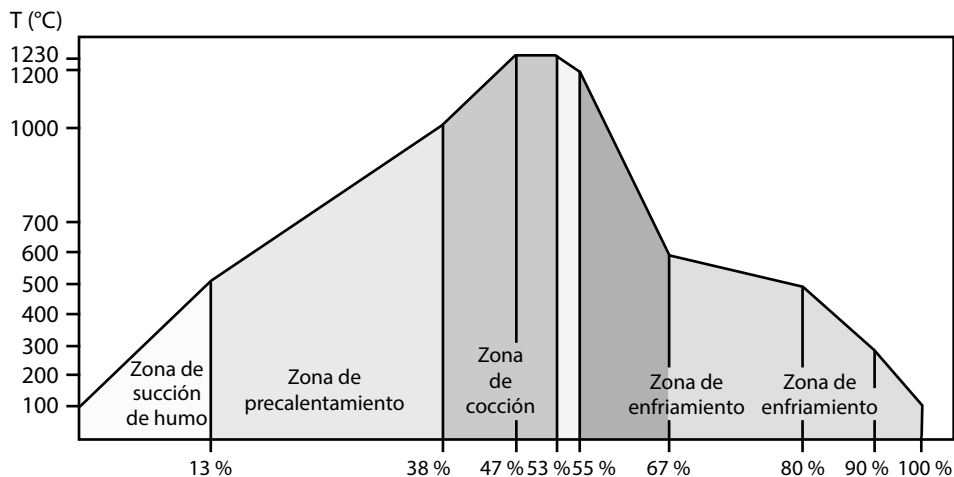
Figura 8. Entradas y salidas en la producción de bloques H-10

Nota: la figura describe de forma general las entradas, salidas y los desechos necesarios para la fabricación de un bloque.

Fuente: elaboración propia.

La **figura 9** detalla el proceso de cocción. Es la fase previa al resultado final donde se producen las mayores fallas. Aproximadamente se almacena en promedio entre 1.400 y 1.500 bloques en dos columnas de entre 620 y 650 bloques. El horno tiene una capacidad total de 30.000 bloques por día.

Al iniciar este proceso de cocción los bloques poseen entre 10 y 11 % de humedad, siendo ideal para que no se generen grietas en la superficie y, de esta manera, puedan alcanzar propiedades mecánicas adecuadas a las especificaciones de las normas NTC. En este tipo de horno se llegan a temperaturas de hasta 1200 °C en un proceso de cocción entre 20 y 22 horas. Además, es importante un sistema de control que permita manejar la temperatura en función del tiempo, es decir, acercarse lo más posible a la curva ideal de cocción para estos productos de mampostería.

Figura 9. Proceso de quema en un horno tipo Hoffman

Fuente: adaptado de Blanco (2011).

En el interior de estos hornos, durante el proceso de cocción, se pueden identificar las zonas térmicas críticas y sus resultados que son:

- Hasta un poco más de los 100 °C se elimina el agua higroscópica o la humedad residual después de un secado no perfecto, o la reabsorbida del ambiente por el almacenamiento.
- Hasta 200 °C se elimina el agua zeolítica o de cristalización, cuyas moléculas están ligadas por absorción en las estructuras cristalinas.
- Entre 350 °C y 650 °C la combustión de las sustancias orgánicas que pueden estar presentes en diferentes proporciones en las arcillas y en la disociación oxidante de los sulfuros minerales.
- Entre 450 °C y 650 °C se elimina el agua de constitución (deshidroxilación) y por consiguiente la destrucción del retículo cristalino arcilloso.
- A 573 °C se presenta la transformación alotrópica del cuarzo α en β , que genera un brusco aumento de volumen.
- Entre 800 °C y 950 °C se presenta la descarbonatación de la caliza y la dolomita con la liberación de CO_2 .
- A partir de 700 °C aparece la formación de nuevas fases cristalinas constituidas por el SiO_2 de los silicatos y silicoaluminatos.
- Aproximadamente a los 900 °C se presenta la disociación térmica de las otras sales presentes, como los sulfatos y fluoruros.
- Si se alcanzan temperaturas superiores a 1.000 °C se pueden evaporar algunos componentes de las pastas y los revestimientos como los óxidos alcalinos, el óxido de plomo, el óxido de cinc o el anhídrido bórico.

- Finalmente, en el transcurso del enfriamiento, se produce la solidificación del fundido que proporciona la cohesión y solidez a la masa de la mezcla cerámica, llevando a la formación de la estructura vítrea o cristalina.

2.2 Evaluación del proceso productivo

Teniendo presente el seguimiento y la descripción detallada que se llevó a cabo en cada etapa del proceso, se realizó la siguiente evaluación inicial como se muestra en la **tabla 3**:

Tabla 3. Matriz factores actuales de la calidad del bloque H-10

Etapa	Factores	Observación
Extracción	- Mezclado - Caracterización	No se definen las características de la pasta (composición de varias arcillas) por un procedimiento adecuado. El tamaño de las partículas de arena no posee la granulometría adecuada (menores a 2 mm) según los análisis realizados al proceso actual.
Secado	- Temperaturas - Apiles - Humedades	En la zona de secado natural no se tiene en cuenta la temperatura del medio con la finalidad de definir humedades, por lo que se realizan diferencias de densidades de los bloques en las etapas de secado natural y artificial para definir la pérdida de humedad.
Cocción	- Temperaturas - Apiles - Tiempos	Las variables dentro de este proceso (como la temperatura en diferentes partes del horno y tiempo) son bastante sensibles en relación a la calidad de la pieza final, pues no son controladas. Muchas veces entran productos con una humedad superior al 8 %, lo que evidentemente causa defectos en este.

Fuente: elaboración propia.

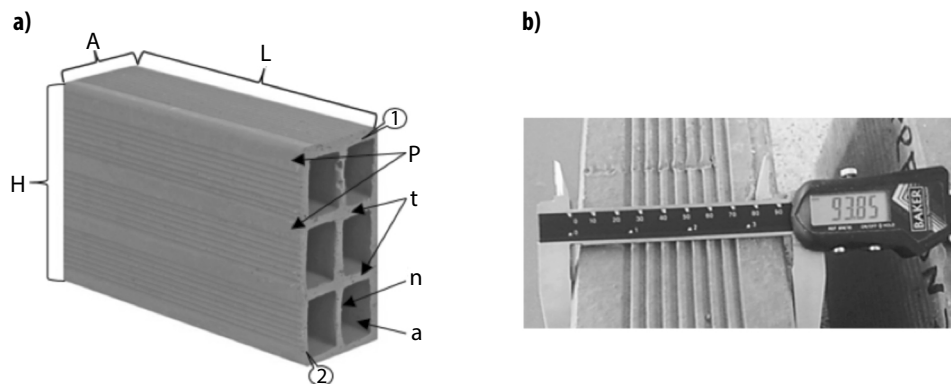
CAPÍTULO 3

EVALUACIÓN DEL PRODUCTO FINAL ACTUAL Y CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE ARCILLAS

En este capítulo se establecen las consideraciones y parámetros tenidos en cuenta bajo las normas técnicas colombianas (NTC), que rigen el comportamiento físico de las arcillas utilizadas en la fabricación de productos de mampostería para la construcción. La calidad de los productos obtenidos al final del proceso y su arcilla que es la materia prima principal, deben ser evaluados para garantizar su adecuado funcionamiento bajo diferentes condiciones de operación a los que podrían estar sometidos.

3.1 Características morfológicas del bloque H-10

La **figura 10** muestra las dimensiones promedio del bloque H-10 que son: largo, ancho, altura desde piso a la pieza, espesor y peso.

Figura 10. Dimensiones del bloque H-10 y toma de mediciones

Nota: se muestran las dimensiones promedio del bloque H-10 que son: L = Largo (mm), A = Ancho (mm), H = Alto (mm), P = Espesor más pequeño de las paredes (mm), T = Espesor más pequeño de los tabiques (mm), N = Espesor del nervio (mm), 1, 2, 3 y 4 = Tabiques (mm).

Fuente: Rozo, Sánchez y Álvarez (2014).

Las dimensiones de los bloques H-10 \times 30 varían dependiendo de la tecnología utilizada por la empresa. Los valores de largo oscilan entre 28.00 y 30.50 cm. Los valores del ancho entre 9.64 y 10.46 cm según la investigación realizada a los bloques en Cúcuta y su área metropolitana (Rozo *et al.*, 2014).

3.2 Preparación de muestras para ensayos físicos

Para la realización de ensayos físicos (absorción inicial y final de agua, morfología, compresión y flexión), los bloques fueron secados a 110 °C en la estufa marca Gabrielli, hasta eliminar humedad residual.

La evaluación de los bloques se realizó teniendo en cuenta los lineamientos de la Norma NTC 4017, la cual establece los procedimientos a seguir para el análisis de unidades de mampostería. Con 5 bloques para cada ensayo, los resultados fueron comparados con los datos establecidos en la Norma NTC 4205, que establece los valores permisibles de tabiques y espesores para unidades de mampostería.

3.3 Ensayos destructivos

Estas pruebas se realizaron a los bloques cerámicos que fabrica actualmente la empresa, con la finalidad de obtener una perspectiva de su comportamiento a cargas horizontales o verticales, teniendo en cuenta los parámetros de las normas NTC 4205 y NTC 4017, que aseguran la validez de los datos obtenidos en los ensayos (Díaz, 2018; García, Flórez y Rodríguez, 2019). A continuación en la **tabla 4**, se detalla la información de las muestras recolectadas:

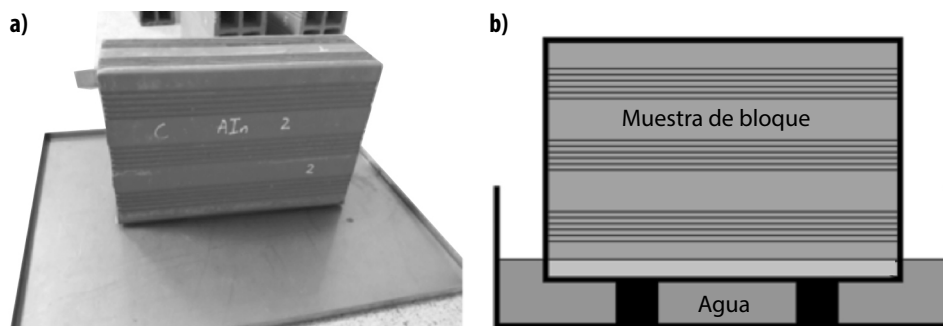
Tabla 4. Muestras de bloques H-10 recolectados

Identificación	Observaciones	Cantidad
Muestra #B1	Se escogieron 30 bloques aleatoriamente para los ensayos destructivos de compresión, flexión y absorción.	Son 5 para cada ensayo más unas muestras de reserva.

Fuente: elaboración propia.

3.3.1 Tasa de absorción inicial

Este ensayo se lleva a cabo con los bloques totalmente secos después de la cocción de 5 minutos como se muestra en la **figura 11**. Su unidad de medida se expresa en $\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}$ (ICONTEC, 1998; ICONTEC, 2005).

Figura 11. Representación de la prueba de absorción inicial

Nota: a) Vista experimental, b) Representación esquemática.

Fuente: elaboración propia.

Para calcular el porcentaje de humedad o absorción de agua se utiliza la siguiente expresión:

$$\text{T.I.A.} = \frac{G}{\frac{A}{\text{min}}}$$

Donde T.I.A. = Tasa inicial de absorción ($\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}$), G = Diferencia en gramos entre el pesaje inicial y final por cada minuto (g/min) y A = Área de contacto con el agua (cm^2).

La **tabla 5** presenta los resultados de las medidas de cada uno de los bloques y el valor de la tasa de absorción inicial, teniendo en cuenta los parámetros de la Norma NTC 4017.

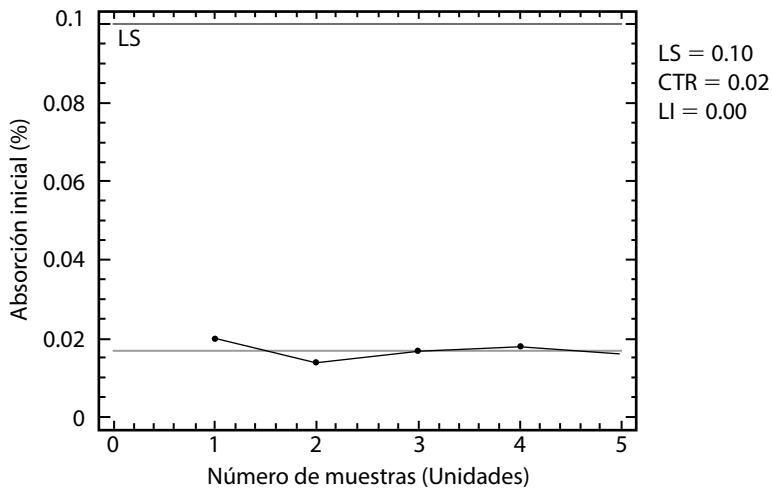
Tabla 5. Absorción inicial de agua

Absorción inicial											
N	Masa seca (Gramos)	Masa húmeda (Gramos)	Absorción de agua %	Ancho (mm)	Alto (mm)	Largo (mm)	Espesor de los lados (mm)				Tabique (mm)
							1	2	3	4	
1	4.809	4.864	0.020	93.02	192.98	292.42	12.10	11.90	12.15	12.80	10.20
2	4.592	4.632	0.014	92.78	193.15	296.20	12.60	12.20	13.02	11.76	9.80
3	4.663	4.711	0.017	94.51	194.20	291.01	13.50	13.61	12.75	12.50	9.75
4	4.706	4.757	0.018	95.00	194.88	294.90	12.40	14.01	12.80	12.78	11.01
5	4.629	4.675	0.016	94.37	195.10	295.35	13.70	12.70	12.92	12.90	9.91

Fuente: elaboración propia.

La **figura 12** muestra que el valor de la humedad está dentro del rango establecido por la norma NTC, por lo tanto, este tipo de producto cumple con uno de los requisitos establecidos por la norma.

Figura 12. Análisis estadístico para absorción inicial



Nota: la gráfica muestra que el valor de la humedad está dentro del rango establecido por la Norma NTC, por lo tanto, este tipo de producto cumple con uno de los requisitos establecidos.

Fuente: elaboración propia.

Estadísticamente los datos presentan una distribución normal con una media igual a 0.017 y una desviación estándar igual a 0.00223607. De los 5 puntos mostrados en el gráfico, todos se encuentran dentro de los límites de control teniendo en consideración el límite superior (LS), con un nivel de confianza superior al 95 %. Los resultados son resumidos en la **tabla 6**.

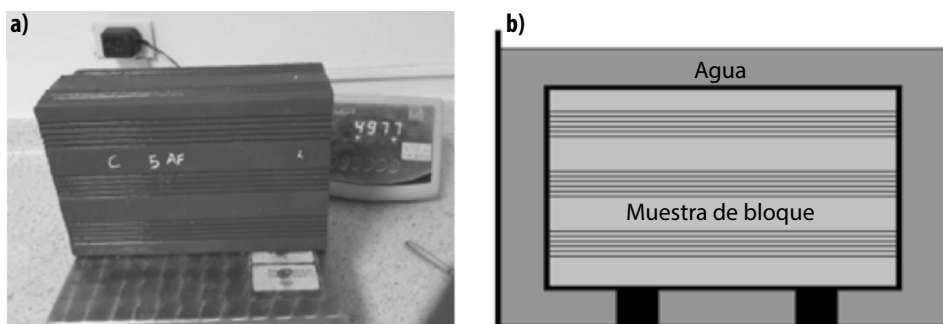
Tabla 6. Resumen estadístico para absorción inicial

Variable	Valor
Coefficiente de variación	13.15 %
Valor mínimo	0.014
Valor máximo	0.020
Rango	0.006
Sigma de proceso	0.025

Fuente: elaboración propia.

3.3.2 Tasa de absorción 24 horas

Con esta prueba se busca definir el incremento en la masa de un material seco al ser sumergido en agua durante 24 horas a temperatura ambiente, como se muestra en la **figura 13**.

Figura 13. Representación de la prueba de absorción final

Nota: a) Vista experimental, b) Representación esquemática.

Fuente: elaboración propia.

Para calcular el porcentaje de humedad o absorción de agua, se utiliza la siguiente expresión:

$$\% \text{ absorción} = \frac{(W_{ss} - W_s)}{W_s} \times 100$$

Donde W_s = Masa seca antes de la inmersión (g) y W_{ss} = Masa húmeda después de la inmersión (g).

La **tabla 7** presenta los resultados de las medidas de cada uno de los bloques y el valor de la tasa de absorción inicial, teniendo en cuenta los parámetros de la Norma NTC 4017.

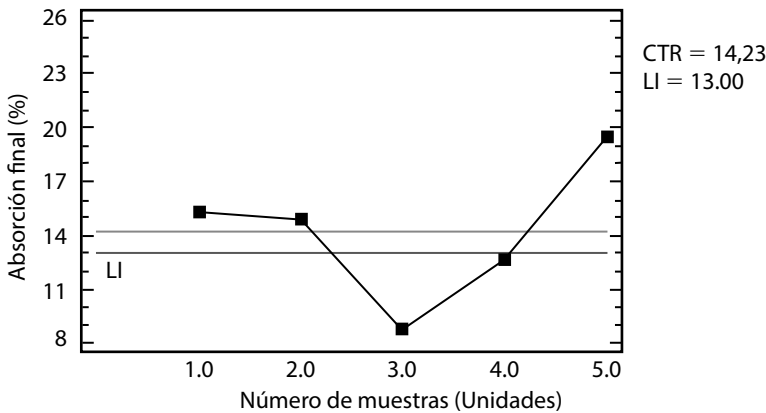
Tabla 7. Absorción final de agua

Absorción inicial											
N	Masa seca (Gramos)	Masa húmeda (Gramos)	Absorción de agua %	Ancho (mm)	Alto (mm)	Largo (mm)	Espesor de los lados (mm)				Tabique (mm)
							1	2	3	4	
1	4.598	5.301	15.29	93.69	194.03	296.42	12.60	11.60	12.02	12.60	9.77
2	4.754	5.463	14.91	95.60	194.44	296.96	13.30	14.52	13.25	11.40	9.70
3	4.792	5.209	08.70	94.31	193.73	291.70	13.82	12.31	12.37	12.81	9.12
4	4.762	5.367	12.70	94.34	194.35	294.57	13.80	11.37	12.14	12.56	11.03
5	4.539	5.427	19.56	94.92	195.20	296.71	12.64	12.74	12.45	11.83	10.24

Fuente: elaboración propia.

La **figura 14** presenta los valores máximos de absorción de agua comparados con las normas NTC.

Figura 14. Análisis estadístico para absorción final vs. Número de muestras



Nota: la gráfica muestra los valores máximos de absorción de agua comparados con las normas NTC.

Fuente: elaboración propia.

La **tabla 8** presenta los datos de una distribución normal con una media igual a 14.232 y una desviación estándar igual a 3.966. De los 5 puntos mostrados en el gráfico, dos se encuentran fuera de los límites de control, por lo que un 40 % cumple con el parámetro establecido por la Norma NTC 4205. Por lo anterior, el proceso se encuentra en estado de control estadístico con un nivel de confianza superior al 95 %, cumpliendo solo en un porcentaje, de modo que se debe aumentar el vacío de la extrusora para cumplir con este requisito en un mayor porcentaje según lo establecido.

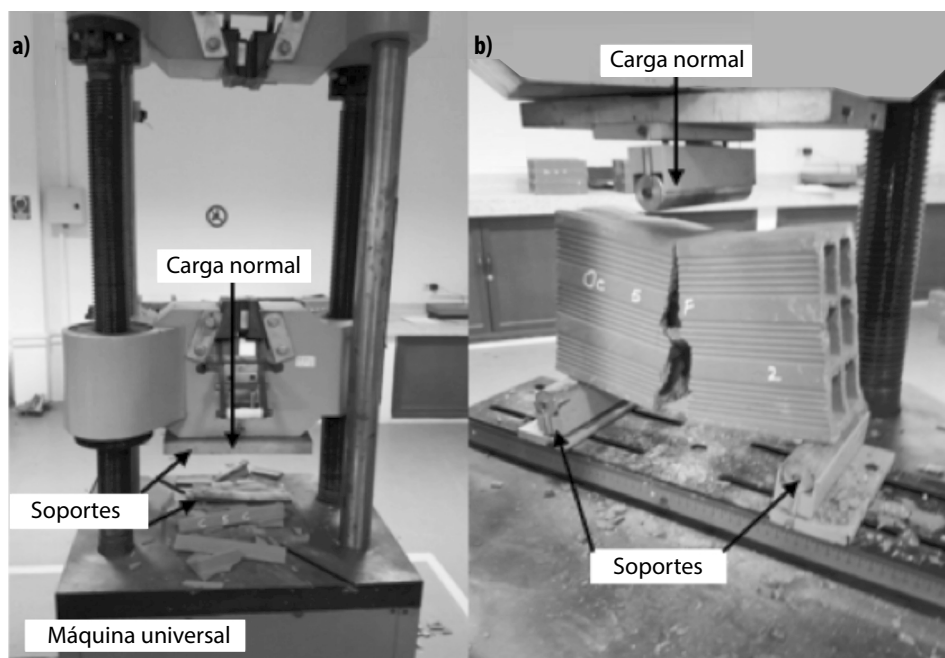
Tabla 8. Resumen estadístico para absorción final

Variable	Valor
Coefficiente de variación	27.86 %
Valor mínimo	8.7
Valor máximo	19.56
Rango	10.86
Sigma de proceso	3.86

Fuente: elaboración propia.

3.3.3 Resistencia mecánica a la compresión

Esta prueba estima la capacidad que tiene el producto de resistir una fuerza externa, y así, estimar su curva de esfuerzo-deformación propia. La **figura 15** muestra una representación esquemática de la prueba. Cabe señalar que la norma NTC 4207 no establece valores permisibles para productos de mampostería bajo flexión.

Figura 15. Pruebas de fuerza en el producto

Nota: a) Prueba de compresión, b) Prueba de flexión.

Fuente: elaboración propia.

Para realizar el cálculo de resistencia mecánica se utiliza la siguiente expresión. Cuyos resultados experimentales se muestran en la **tabla 9**.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Donde F = Carga (KgF) y A = Área transversal (cm²).

Tabla 9. Resistencia mecánica a la compresión

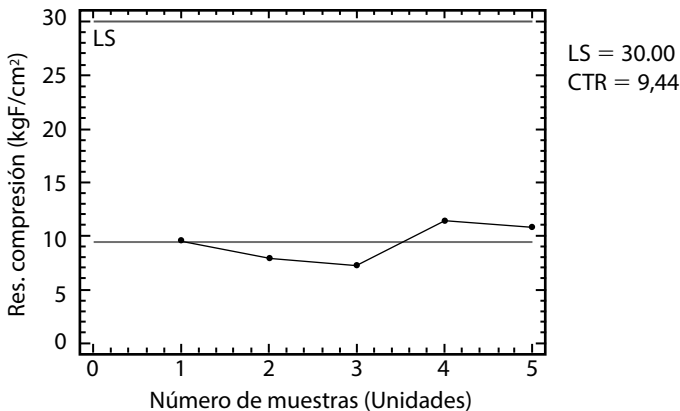
N	Ancho (mm)	Alto (mm)	Largo (mm)	Espesor de los lados (mm)				Tabique (mm)	Esfuerzo último (KgF/cm ²)
				1	2	3	4		
1	93.85	189.45	293.58	11.71	11.95	11.70	12.02	10.00	9.62
2	95.39	192.33	296.42	13.45	13.10	11.98	13.55	8.89	7.98
3	95.80	192.54	296.12	12.45	13.48	12.50	12.30	11.16	7.30
4	96.93	193.27	294.30	13.19	13.01	12.87	12.01	10.96	11.43
5	96.60	19.09	295.13	12.21	13.78	11.61	11.49	10.42	10.85

Nota: la tabla presenta los resultados de las medidas de cada uno de los bloques y el valor del esfuerzo último, teniendo en cuenta los parámetros de la Norma NTC 4017.

Fuente: elaboración propia.

Las muestras fueron ensayadas en la máquina universal marca Pinzuar, donde se obtuvo el valor promedio para los bloques de 9.436 KgF/cm². La **figura 16** presenta los resultados obtenidos en el *software Stargraphics*:

Figura 16. Tenacidad al aplastamiento vs. Número de muestras

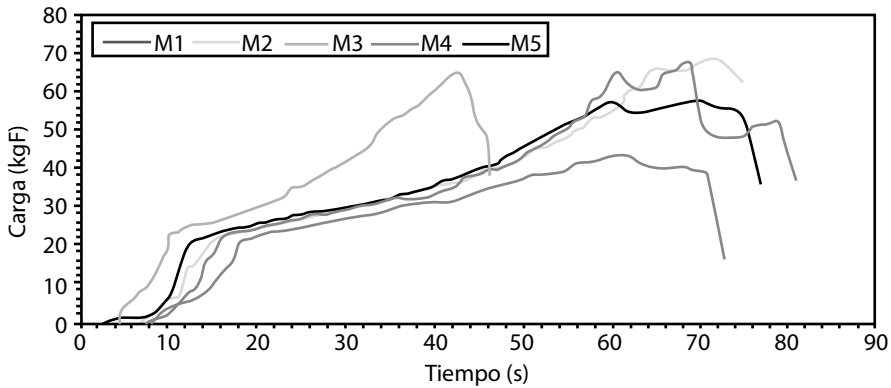


Fuente: elaboración propia.

La Norma NTC 4205 establece que la resistencia a la compresión mínima para el promedio de las cinco muestras debe ser mayor al límite superior (LS) igual a

30 KgF/cm² para unidades de mampostería de perforación horizontal. Por lo que se puede concluir que los bloques son poco resistentes y ninguno de ellos alcanza el valor mínimo requerido por la norma. La **figura 17** describe el resultado arrojado por la máquina universal, en donde se observa la carga en función del tiempo para cada uno de los bloques.

Figura 17. Carga vs. tiempo. Ensayo de compresión

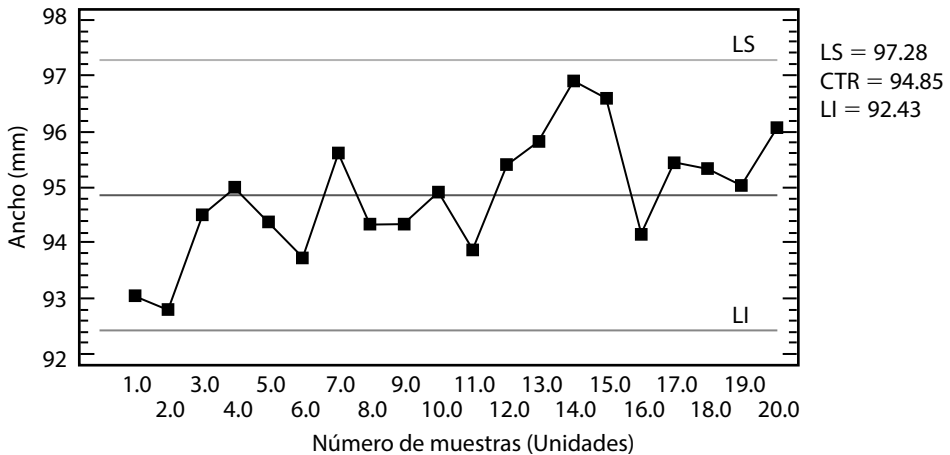


Fuente: elaboración propia.

3.4 Resultados estadísticos: tolerancia dimensional

Usando el *software Stargraphics* se hizo el análisis estadístico de los resultados. Cada una de las variables fueron comparadas con los parámetros establecidos con la Norma NTC 4205, como se muestra a continuación en la **figura 18**:

Figura 18. Análisis estadístico para el ancho



Fuente: elaboración propia.

Ancho: el ancho se tomó de las investigaciones realizadas por Rozo *et al.* (2014) y García, Bolívar y Flórez (2016). Como referencia se tuvieron en cuenta los valores que oscilan entre 92.43 – 97.28 mm, teniendo en cuenta que la Norma NTC 4205 no establece parámetros para comparar este tipo de variable.

La **figura 18** se construye bajo el supuesto de que los datos provienen de una distribución normal con una media igual a 94.855 mm y una desviación estándar igual a 1.09247. De los 20 puntos mostrados, todos se encuentran dentro de los límites de control —límite inferior (LI) y límite superior (LS)—. Los valores obtenidos se encuentran en control estadístico con un nivel de confianza superior al 95 % como se muestra en la **tabla 10**.

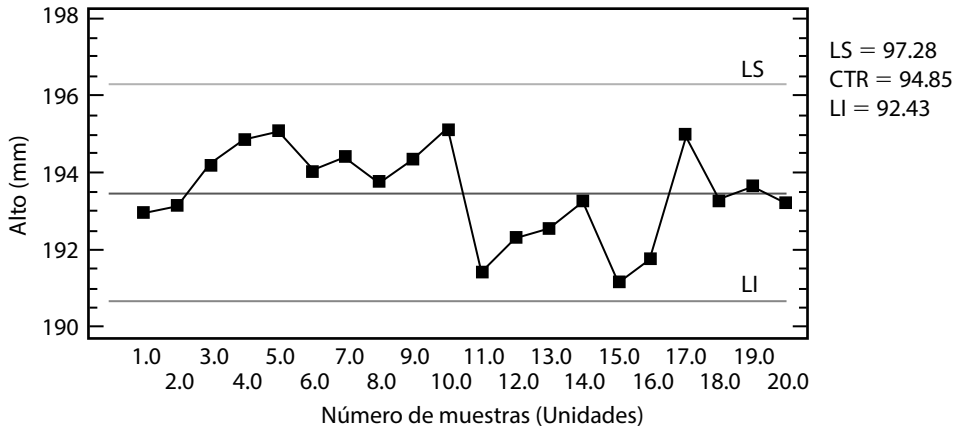
Tabla 10. Resumen de estadísticas para el ancho

Variable	Valor
Coefficiente de variación	1.15 %
Mínimo	92.78
Máximo	96.93
Rango	4.15
Sigma de proceso	0.80

Fuente: elaboración propia.

Alto: el alto de los productos varía en los bloques H-10 seis huecos para las muestras recolectadas. Teniendo en cuenta las investigaciones realizadas por Rozo *et al.* (2014) y García *et al.* (2016), se compararon los valores entre 190.69 – 196.28 mm como lo muestra la **figura 19**.

Figura 19. Análisis estadístico para el alto



Fuente: elaboración propia.

La **figura 19** se construye bajo la suposición de que los datos provienen de una distribución normal con una media igual a 193.487 mm y una desviación estándar de 1.20951. Los resultados son resumidos en la **tabla 11**.

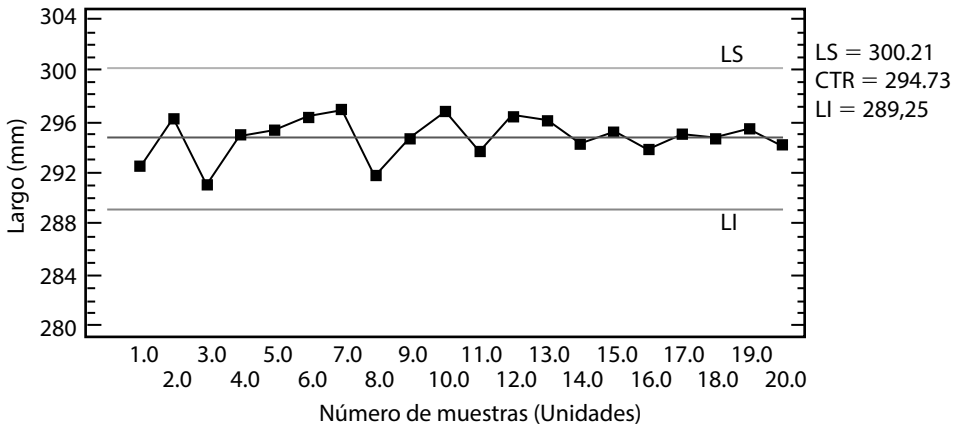
Tabla 11. Resumen de estadísticas para el alto

Variable	Valor
Coefficiente de variación	0.62 %
Valor mínimo	191.09
Valor máximo	195.20
Rango	4.11
Sigma de proceso	0.93

Fuente: elaboración propia.

Los productos de mampostería de perforación horizontal presentan en el largo gran rango de uniformidad en las diferentes muestras recolectadas como se muestra en la **figura 20**.

Figura 20. Análisis estadístico para el largo



Fuente: elaboración propia.

La **figura 20** se construye de acuerdo a los datos que provienen de una distribución normal con una media igual a 294.731 mm y una desviación estándar igual a 1.64162. Los 20 puntos mostrados se encuentran dentro de los límites de control —límite inferior (LI) y límite superior (LS)—. Por lo anterior, el proceso se encuentra en un nivel de confianza superior al 95 % como se muestra en la **tabla 12**.

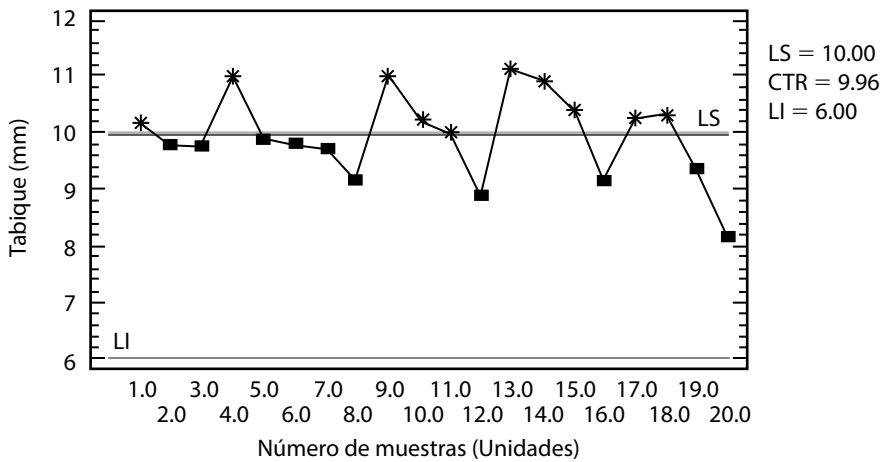
Tabla 12. Resumen de estadísticas para el largo

Variable	Valor
Coefficiente de variación	0.55 %
Valor mínimo	291.01
Valor máximo	296.96
Rango	5.95
Sigma de proceso	1.82

Fuente: elaboración propia.

Tabiques: la toma de los datos de tabiques y espesores se tuvieron en cuenta de los valores establecidos por la Norma técnica colombiana NTC 4205. El valor mínimo para el tabique debe ser de 10.00 mm. La **figura 21** muestra el análisis estadístico de los resultados.

Figura 21. Análisis estadístico para el tabique



Fuente: elaboración propia.

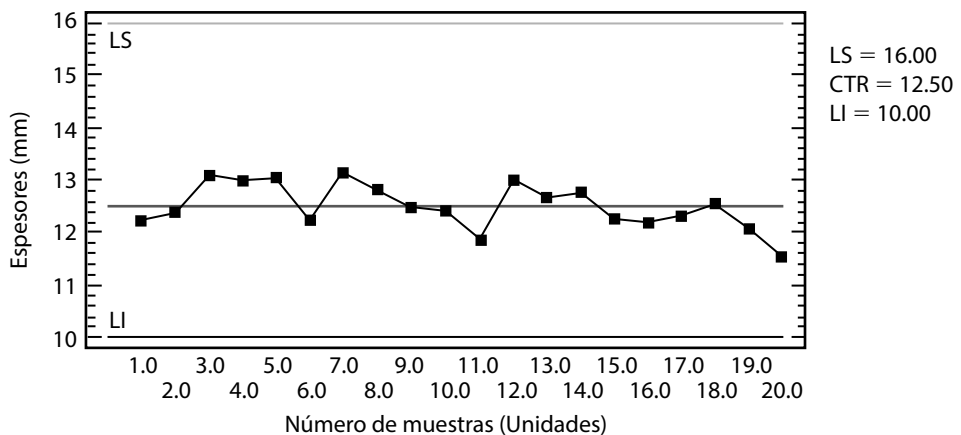
De los 20 puntos mostrados, 10 se encuentran fuera de los límites de control —límite inferior (LI) y límite superior (LS)—. Lo que equivale en un 50 % al cumplimiento de la Norma 4205 como se muestra en la **tabla 13**.

Tabla 13. Resumen de estadísticas para el tabique

Variable	Valor
Coefficiente de variación	7.83698 %
Valor mínimo	8.16
Valor máximo	11.16
Rango	3.0
Sigma de proceso	0.710153

Fuente: elaboración propia.

Espesores: la **figura 22** representa los resultados del análisis estadístico realizado para los espesores de las muestras ensayadas. La gráfica fue construida con los datos provenientes de una distribución normal (12.5025 mm) y una desviación estándar (0.444059). Todos los puntos se encuentran dentro de los límites de control, cumpliendo únicamente lo establecido para productos de mampostería no estructural.

Figura 22. Análisis estadístico para los espesores

Fuente: elaboración propia.

Por lo anterior, el proceso se encuentra en estado de control estadístico con un nivel de confianza superior 95 %, teniendo en cuenta lo establecido en la Norma NTC 4205, según los datos obtenidos en la **tabla 14**.

Tabla 14. Resumen de estadísticas para los espesores

Variable	Valor
Coefficiente de variación	3.55 %
Valor mínimo	11.51
Valor máximo	13.12
Rango	1.61
Sigma de proceso	0.35

Fuente: elaboración propia.

La **tabla 15** resume el análisis estadístico realizado a cada parámetro estimado para el bloque H-10, su observación y comparación con la norma técnica colombiana.

Tabla 15. Resumen de los análisis físicos al producto terminado actual

Análisis	Valor obtenido promedio	Valor norma	Observación	
			No estructural	Estructural
Tasa inicial de absorción (%)	1.06 ± 0.03	0.10	Cumple	Cumple
Absorción 24 horas (%)	14.23 ± 1.12	13 – 13.50	Cumple 40 %	No cumple
Resistencia a la compresión (KgF/cm ²)	9.44 ± 0.30	30	No cumple	No cumple
Ancho (mm)	94.85 ± 0.55	92.43 – 97.48	Cumple	Cumple
Alto (mm)	193.49 ± 1.34	190.69 – 196.28	Cumple	Cumple
Largo (mm)	294.73 ± 1.61	289.25 – 300.21	Cumple	Cumple
Tabiques (mm)	9.96 ± 0.29	10 – 6	Cumple	No cumple
Espesores (mm)	12.50 ± 0.33	16 – 10	No cumple	Cumple en un 50 %

Fuente: elaboración propia.

Los resultados anteriores muestran que los bloques presentan un comportamiento relacionado con la bibliografía, la cual establece que a mayor porosidad menor será la resistencia mecánica. Lo relacionado con la morfología presenta excelentes índices de uniformidad dimensional, comparados con lo establecido por la norma y el estudio realizado en Cúcuta y su área metropolitana (Rozo *et al.*, 2014; García-León *et al.*, 2016).

3.5 Evaluación de los resultados obtenidos

La Norma NTC 4205 establece que en los resultados de los ensayos de absorción y resistencia mecánica a la compresión, una de las cinco muestras ensayadas pueda superar o lograr el límite individual en un 10 %, siempre y cuando se cumpla el valor promedio señalado. En el caso de las muestras evaluadas ninguna cumple con la especificación.

El proceso de cocción es el más complicado debido a que la composición química de la materia prima no es homogénea; por otra parte, los espacios intersticiales entre las partículas son más grandes lo que genera mayor absorción de agua. Lo anterior se demuestra en los ensayos físicos basados en las especificaciones de la norma (Payares, 2014).

3.6 Caracterización de la materia prima

Durante esta etapa se llevaron a cabo análisis de granulometría (por hidrometría usando el método 152H), porcentajes de humedad retenida sobre tamiz (por malla 230), índice de plasticidad (por el método de Casagrande teniendo en cuenta los requisitos de las normas NTC 4630 e INVE-125-07), contracción lineal, fluorescencia y difracción de rayos X de las diferentes arcillas existentes en las minas de la empresa, con la finalidad de formular una mezcla optiman mediante la caracterización hidrométrica de las muestras. De esta forma se determinaron porcentajes de arena, limo y arcilla, cuyos porcentajes fueron ubicados en los diagramas de aptitudes de Winkler con la finalidad de establecer las características de la cerámica (tipo de producto y textura), y de esta manera poder definir la posible mezcla óptima.

3.6.1 Recolección de las muestras

Teniendo en cuenta el procedimiento para la toma de muestras se realizó un muestreo tipo canal, con la finalidad de recolectar material de todo el manto de la veta. Este procedimiento se hizo manualmente y con ayuda de la retroexcavadora en algunas zonas debido a la altura de las minas. Las muestras se identificaron como se detalla en la siguiente **tabla 16**.

Tabla 16. Muestras de las arcillas recolectadas para la empresa

Identificación		Observaciones	Cantidad
Muestra 1	1-1	Arcilla roja oscura + clara. A la izquierda de la entrada de los patios.	50 kg aproximadamente
	1-2		
	1-3		
	1-4 UFPSO		
Muestra 2	2-1	Arcilla roja oscura + oscura al lado de la muestra #1.	50 kg aproximadamente
	2-2		
	2-3		
	2-4 UFPSO		
Muestra 3	3-1	Arcilla verde en frente de la entrada de los patios.	50 kg aproximadamente
	3-2		
	3-3		
	3-4 UFPSO		
Muestra 4	4-1	Arcilla verde + roja = Naranja en frente de la entrada de los patios.	50 kg aproximadamente
	4-2		
	4-3		
	4-4 UFPSO		
Muestra 5	5-1	Arcilla gris = No se usa de la entrada a la derecha de los patios.	50 kg aproximadamente
	5-2		
	5-3		
	5-4 UFPSO		
Muestra 6	6-1	Pasta de producción.	10 kg aproximadamente
	6-2		
	6-3		
	6-4 UFPSO		

Fuente: elaboración propia.

También se recolectaron muestras de dos zonas arcillosas cercanas a la ladrillera para comparar los resultados de hidrometría de las muestras obtenidas. La **tabla 17** ilustra la identificación de estas muestras.

Tabla 17. Muestras de las arcillas recolectadas en las zonas cercanas

Identificación		Observaciones	Cantidad
Muestra 7	7-PP	Ladrillera artesanal de la zona Botadero de basura (pasta de producción y las arcillas blancas y rojas para la mezcla).	10 kg aproximadamente
	7-AB		
	7-AR		
Muestra 8	8-PP	Ladrillera artesanal de la zona Hatillo (Pasta de producción y las arcillas blancas y rojas para la mezcla).	10 kg aproximadamente
	8-AB		
	8-AR		
Muestra 9	9-PP	Ladrillera artesanal de la zona Hatillo (Pasta de producción y las arcillas blancas y rojas para la mezcla).	10 kg aproximadamente
	9-AB		
	9-AR		
Muestra 10	10 – U	Arcilla de la universidad con la finalidad de determinar la presencia de limos.	5 kg aproximadamente

Fuente: elaboración propia.

Posterior a la recolección, se procedió a homogenizar y cuartear cada muestra con la finalidad de obtener 4 sub-muestras que fueron utilizadas para realizar análisis de hidrometría, estas retenidas sobre tamiz e índice de plasticidad. Finalmente, fueron empacadas e identificadas para la realización de los ensayos posteriores.

3.6.2 Análisis tecnológicos

Los ensayos no destructivos que hacen parte de los análisis tecnológicos fueron realizados a las muestras seleccionadas como se contempla en la **tabla 18**, donde cinco corresponden a todas las muestras de materia prima y dos a las encontradas como mezclas óptimas.

Tabla 18. Tipo de ensayo y finalidad

Tipo de ensayo		Cantidad de muestras	Finalidad
Físicos	Retenido sobre tamiz	5	Obtener la distribución por tamaño de las partículas presentes en una muestra de la mezcla de arcilla.
	Análisis granulométrico por hidrómetro		Conocer los porcentajes de arena, limos y arcilla.
	Índice de plasticidad	2	Conocer las cantidades de agua que se le deben aplicar a la mezcla antes de la extrusión.
	Contracción lineal		Determinar las dimensiones de las probetas secas para calcular el porcentaje de contracción.
Físico - cerámico	Curva de gresificación	2	Determinar la temperatura de cocción que se requiere para un producto con determinadas características.
	Absorción de agua		Determinar el porcentaje de absorción de agua con la diferencia de peso.
	Resistencia a la flexión		Determinar la resistencia a la flexión y el módulo de rotura del material.
Químicos	Difracción de Rayos X DRX	2	Determinar la caracterización estructural e identificación de fases cristalinas, arcillosas y no arcillosas.
	Fluorescencia de Rayos X FRX	2	Determinar la composición de la muestra, tanto en los elementos que la conforman, como en la proporción en la que se encuentran. Además de los elementos que existen en su concentración.
Térmico	Diferencial ATD y ATG	2	Determinar los efectos endotérmicos y exotérmicos de las reacciones de las arcillas en el proceso de cocción e indicar cuáles son las temperaturas con las que se producen.

Fuente: elaboración propia.

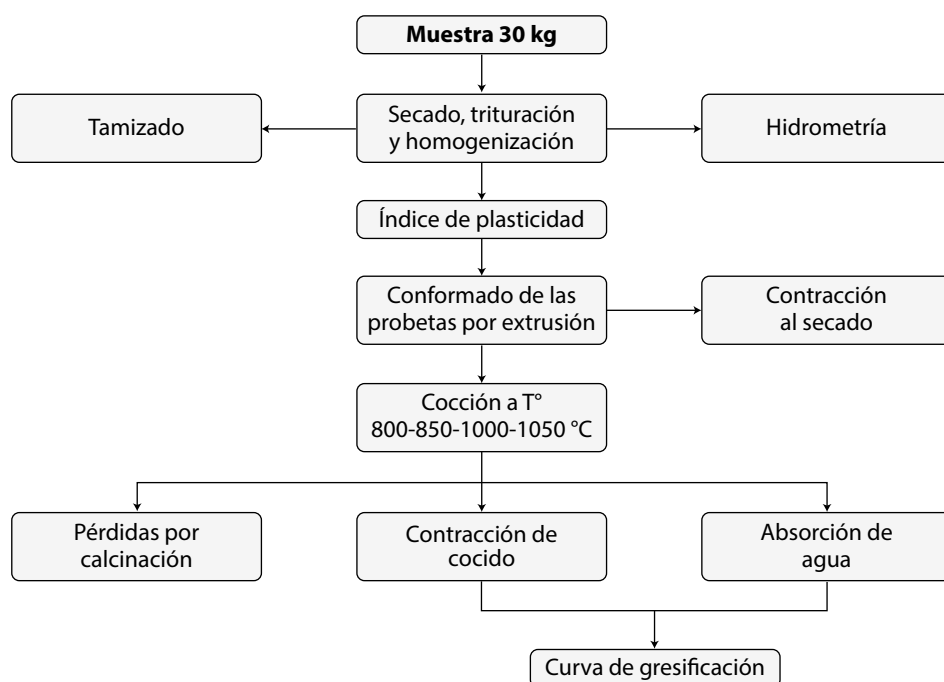
3.7 Caracterización física

El conocimiento del comportamiento físico-cerámico de las arcillas es de vital importancia en la industria cerámica, debido a que con los resultados se pueden tomar decisiones en la extracción de las materias primas, la inclusión o exclusión de determinados mantos en las mezclas, la realización de las mezclas óptimas adecuadas a la materia prima de la empresa, establecer el comportamiento en las

diferentes etapas del proceso y el comportamiento en función de la temperatura, todo esto para obtener un producto final con las características técnicas requeridas por las normas vigentes (García, Flórez y Acosta, 2015).

Las muestras recolectadas fueron analizadas en los laboratorios de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña y en el Centro de Investigación de Materiales Cerámicos (CIMAC) de la Universidad Francisco de Paula Santander Cúcuta, donde se le realizaron una serie de pruebas que permitieron caracterizar las arcillas desde sus propiedades físicas, basadas en las normas (Quintero y Gallardo, 2015; Sánchez y Álvarez, 2016), como se muestra en la siguiente **figura 23**:

Figura 23. Procedimiento de los análisis realizados



Fuente: elaboración propia.

3.7.1 Tamizado vía seca

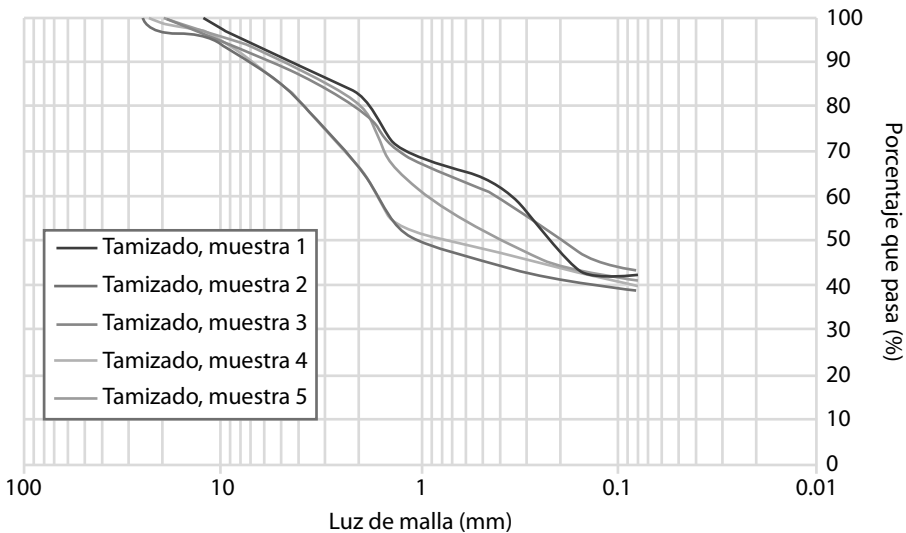
Este ensayo, es un indicador de la plasticidad de las muestras, determina la cantidad (en porcentaje) de las partículas más gruesas, en su mayoría gravas y arenas. El análisis se realizó teniendo en cuenta la Norma NTC 1522 y la INVE - 123. El tamaño de partícula fue determinado utilizando una muestra de 200 gramos. Se inició empleando una malla de apertura de tamiz seco ASTM D10 (2.000 μm), D30 (600 μm), D60 (250 μm), D80 (180 μm), D100 (150 μm), D120 (125 μm) y un colector (ICONTEC, 1979; INVE, 1998).

Los coeficientes de uniformidad y de curvatura fueron determinados utilizando las siguientes expresiones (Braja, 2001). De esta forma, el Coeficiente de uniformidad (CU) y el Coeficiente de curvatura (CC), fueron calculados utilizando las siguientes expresiones:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}, \text{ y } C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}}$$

Con los valores de tamizado en vía seca se obtuvo la **figura 24** que muestra el porcentaje de arenas gruesas de la materia prima analizada.

Figura 24. Resultados de los tamaños de grano para todas las muestras



Fuente: elaboración propia.

En la **figura 24** se observa que el material tiene una variabilidad alta en los porcentajes de partículas gruesas, por lo que se deduce son difíciles de extruir. Viendo esto se hace necesaria la adición de otras materias primas complementarias para corregir la granulometría de la muestra a fracciones más finas y de esta forma obtener una mezcla de arcilla con mejores propiedades. Los valores encontrados para cada muestra según los coeficientes CU y CC, fueron analizados teniendo en cuenta las clasificaciones que se muestran en la **tabla 19** y **tabla 20**.

Tabla 19. Clasificación según AASHTO

Clasificación según AASHTO											
Clasificación general	Materiales granulares (35 % o menos pasa por el tamiz N° 200)						Materiales limoso arcilloso (más del 35 % pasa el tamiz N° 200)				
Grupo:	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Porcentaje que pasa:											
N° 10 (2 mm)	50 máx.	-	-	-				-			
N° 40 (0.425 mm)	30 máx.	50 máx.	51 mín.	-				-			
N° 200 (0.075 mm)	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.				36 mín.			
Características de la fracción que pasa por el tamiz N° 40											
Límite líquido	-	-	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	41 mín. (2)
Índice de plasticidad	6 máx.		NP (1)	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Constituyentes principales	Fragmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Grava y arena arcillosa o limosa				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Características como sub-grado	Excelente a bueno						Aceptable a malo				

Fuente: adaptado de Bañón (2012).

Tabla 20. Clasificación uscs de los suelos

Clasificación Según uscs				
Divisiones principales			Símbolos del grupo	Nombres típicos
Suelos de grano grueso	Gravas Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el tamiz número 4 (4.76 mm)	Gravas limpias (sin o con pocos finos)	GW	Gravas bien graduadas, mezclas grava-arena. Pocos finos o sin finos.
			GP	Gravas mal graduadas, mezclas grava-arena. Pocos finos o sin finos.
		Gravas con finos (apreciable cantidad de finos)	GM	Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo.
			GC	Gravas arcillosas, mezclas grava-arena-arcilla.
Más de la mitad del material retenido en el tamiz número 200	Arenas Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por el tamiz número 4 (4.76 mm)	Arenas limpias (pocos o sin finos)	SW	Arenas bien graduadas, arenas con grava. Pocos finos o sin finos.
			SP	Arenas mal graduadas, arenas con grava. Pocos finos o sin finos.
		Arenas con finos (apreciable cantidad de finos)	SM	Arenas limosas, mezclas de arena y limo.
			SC	Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla.
Suelos de grano fino	Limos y arcillas: Límite líquido menor de 50		ML	Limos inorgánicos y arenas muy finas, limos limpios, arenas finas, limosas o arcillosas, o limos arcillosos con ligera plasticidad.
		Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas.		
		Limos orgánicos y arcillas orgánicas limosas de baja plasticidad.		

Continúa

Clasificación Según uscs			
Divisiones principales		Símbolos del grupo	Nombres típicos
Más de la mitad del material pasa por el tamiz número 200	Limos y arcillas: Límite líquido mayor de 50	MH	Limos inorgánicos, suelos arenosos finos o limosos con mica o diatomeas, limos elásticos.
		Arcillas inorgánicas de plasticidad alta.	
		Arcillas orgánicas de plasticidad media a elevada. Limos orgánicos.	
Suelos muy orgánicos		PT	Turba y otros suelos de alto contenido orgánico.

Fuente: adaptado de Bañón (2012).

Basados en las tablas anteriores, las muestras se encuentran clasificadas en sus siglas como suelos MS-SC y 4a como arenas-limosas-arcillosas, en su mayoría como limos. Este análisis se utiliza para determinar la eficiencia del proceso de molienda y la facilidad de molturación de la materia prima durante la etapa de preparación del proceso de fabricación de los materiales y su compactación en el momento del conformado.

Adicionalmente se realizó el retenido sobre tamiz con el procedimiento que se usa actualmente por la empresa en donde solo tiene en cuenta el porcentaje de arenas. Se tomaron 50 gr de cada muestra completamente seca, a la que se le adicionó agua, luego se le sometió a agitación durante 10 minutos. Una vez realizada esta operación se vertió la mezcla y se pasó en el tamiz ASTM 230 (Sánchez, Álvarez, 2016; Amariz, 2016; Navarro, Góngora, Rodríguez y Martínez, 2004).

Los resultados de esta prueba son resumidos en la **tabla 21** y **tabla 22**.

Tabla 21. Retenido sobre tamiz en malla ASTM 230. Datos para la empresa

Muestra	Tamiz		Wi (gr)	Wf (gr)	Arena (%)
	Malla	Abertura (μm)			
1	230	63	50	24	48
2				26	52
3				19	38
4				23	46
5				22	44
6-PP				25	50

Nota: el peso inicial = Wi y el peso final = Wf.

Fuente: elaboración propia.

Las muestras presentaron una granulometría gruesa, como se puede observar en la **tabla 21**, donde se aprecian rangos de arena en porcentaje entre 38 y 52 % de arenas: por lo que son consideradas arcillas de baja plasticidad. Adicionalmente se realizó el procedimiento para las muestras recolectadas de las fábricas artesanales, zonas cercanas que producen ladrillos macizos. En la **tabla 22** se encontraron suelos con partículas finas casi al 100% en su mayoría como limos y arcillas debido a que poseen 4% de arena. Lo cual indica que estas muestras son consideradas de alta plasticidad y las demás muestras como suelos arenosos por sus porcentajes de arena que oscilan entre 30 y 63 %.

Tabla 22. Retenido sobre tamiz en malla ASTM 230. Datos de las fábricas artesanales cercanas

Muestra	Tamiz		Wi (gr)	Wf (gr)	Arena (%)
	Malla	Abertura (μm)			
7-PP	230	63	50	16	32
7-AB				31	62
7-AR				2	4
8-PP				18	36
8-AB				18	36
8-AR				5	10
9-PP				17	34
9-AB				15	30
9-AR				2	4
10-U				27	54

Nota: PP = Pasta de producción, AB = Arena blanca, AR = Arena roja, el peso inicial = Wi y el peso final = Wf. Datos de las fábricas artesanales cercanas.

Fuente: elaboración propia.

3.7.2 Análisis del tamaño de grano por medio del hidrómetro

El análisis se realizó siguiendo la metodología propuesta por la norma INVE-124-1 y la norma ASTM D422-63. Las muestras de arcillas fueron cernidas por malla N° 200 para obtener 50 gramos de muestra tamizada y seca, a esta se le adicionaron 200 ml de agua y 50 ml de Hexametáfosfato (agente defloculante). La suspensión resultante se dejó reposar durante un tiempo mínimo de 1 hora. La mezcla se transfirió a una agitadora eléctrica por 10 minutos, después se pasó al hidrómetro y se aforó a 1000 ml. Se agitó durante 60 segundos para finalmente dejarlo reposar. Transcurrido este tiempo se tomaron lecturas con el hidrómetro a los tiempos de 4, 8, 15 y 30 minutos y posteriormente después de 1, 2, 4 y 24 horas. El hidrómetro usado en la toma de lecturas es el tipo 152 H. Las lecturas de temperatura y del hidrómetro que se tomaron fueron corregidos con los parámetros establecidos para este tipo de equipo (Amariz, 2006; INVÍAS, 2007).

La prueba busca hallar el porcentaje de partículas finas (limos y arcillas) presentes en una muestra de suelo, dato que no es posible determinarse por medio de la granulometría por tamizado, y es indispensable analizar su comportamiento. Al tabular los datos se encontró el porcentaje de limo y arcilla de la muestra de suelo, es decir, las partículas con diámetro entre 0.08 y 0.005 mm correspondientes a limo y las partículas con diámetro entre 0.005 hasta 0 mm correspondientes a arcilla.

En la **tabla 23** se muestran los resultados de los análisis en donde se detalla el tipo de tamiz utilizado, la abertura de los espacios y la granulometría para cada una de las muestras con su correspondiente porcentaje que pasa.

Tabla 23. Distribución granulométrica por hidrometría para todas las muestras

Tamiz	Abertura del tamiz (mm)	Granulometría 1 Pasa (%):		Granulometría 2 Pasa (%):		Granulometría 3 Pasa (%):	
		% Retenido	% Pasa	% Retenido	% Pasa	% Retenido	% Pasa
4''	100	0.0396227	41.1	0.0478874	35.2	0.0482543	16.6
13/4''	80	0.0299940	41.0	0.0345065	29.2	0.0348878	12.6
21/2''	63	0.0255476	40.9	0.0281745	29.2	0.0288957	10.6
2''	50	0.0225200	40.0	0.0243998	29.2	0.0251123	9.6
1 - 1/2''	40	0.0167342	39.2	0.0173170	28.2	0.0177571	9.6
1''	25	0.0123168	37.2	0.0126466	28.2	0.0131481	7.6
3/4	20	0.0088433	31.8	0.0089753	27.8	0.0093287	6.6
1/2	12.5	0.0063000	29.2	0.0063696	25.2	0.0066408	5.6
3/8	10	0.0045365	23.2	0.0045688	21.2	0.0046957	5.9
#4	5	0.0031654	21.8	0.0031765	19.2	0.0032749	4.9
#10	2	0.0021416	19.8	0.0021713	15.8	0.0022152	3.9
#20	1.25	0.0013465	13.8	0.0013555	12.6	0.0013780	2.9
#40	0.4	0.0011661	13.8	0.0011739	11.8	0.0011933	2.6
#100	0.160	0.0009521	13.8	0.0009585	11.8	0.0009775	1.9
#200	0.080	0.0007826	11.2	0.0007878	9.2	0.0007981	1.9

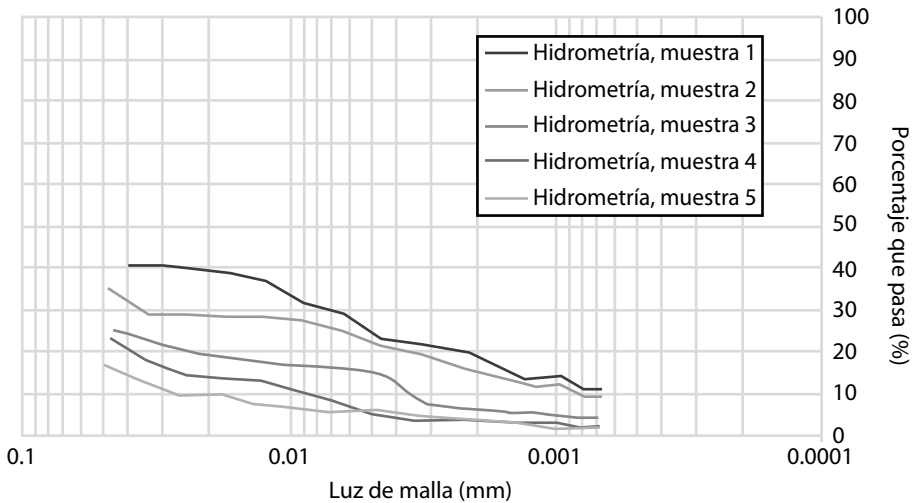
Continúa

Tamiz	Abertura del tamiz (mm)	Granulometría 4 Pasa (%):		Granulometría 5 Pasa (%):	
		% Retenido	% Pasa	% Retenido	% Pasa
4''	100	0.0463905	22.6	0.0454299	25.6
13/4''	80	0.0338615	17.6	0.0328030	22.6
21/2''	63	0.0279650	15.6	0.0271109	20.6
2''	50	0.0243998	14.6	0.0236658	19.6
1 - 1/2''	40	0.0173806	13.6	0.0168655	18.6
1''	25	0.0127392	12.9	0.0123645	17.6
3/4	20	0.0091376	10.9	0.0088100	16.6
1/2	12.5	0.0065740	7.9	0.0062532	15.9
3/8	10	0.0047269	4.6	0.0044548	14.6
#4	5	0.0032857	3.6	0.0031986	8.6
#10	2	0.0022152	3.9	0.0021787	6.9
#20	1.25	0.0013780	2.9	0.0013555	5.9
#40	0.4	0.0011933	2.9	0.0011739	5.9
#100	0.160	0.0009744	2.9	0.0009649	4.9
#200	0.080	0.0007981	1.9	0.0007878	4.9

Fuente: elaboración propia.

La **figura 25** muestra la distribución del tamaño de partículas finas (limo y arcilla) por hidrometría. Todas las muestras presentan bajos porcentajes de partículas finas con valores de entre 41 y 19 % que pasa.

Figura 25. Resultados de hidrometría para las muestras

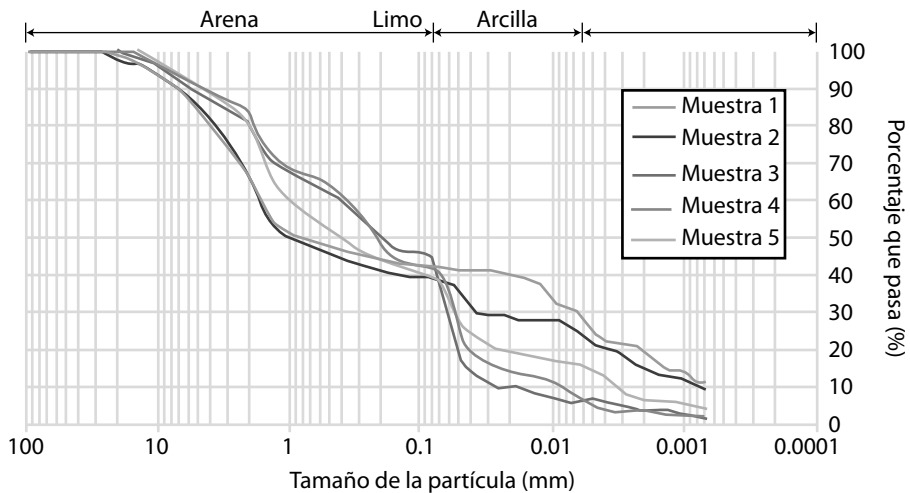


Fuente: elaboración propia.

La **figura 26** define los porcentajes de arenas (limos y arcillas), al unir los resultados de la **figura 24** y **figura 25** en un solo diagrama. La figura indica la curva de distribución

de tamaño de partículas por tamizado en seco para luego obtener una gráfica completa con los valores del hidrómetro. Todas las muestras presentan altos porcentajes de arenas de entre 40 y 42 %, con lo que se demuestra que contienen altos porcentajes de materiales desengrasantes y arcillosos. Teniendo en cuenta los parámetros de la clasificación AASHTO y USCS, las muestras se encuentran clasificadas en sus siglas como suelos MS-SC y 4a respectivamente, las cuales están definidas como arenas-limosas-arcillosas, en su mayoría como limos.

Figura 26. Gráfica de los resultados globales de las muestras de arcillas



Fuente: elaboración propia.

La **tabla 24** resume los resultados encontrados de la caracterización del tamaño de las partículas de la materia prima:

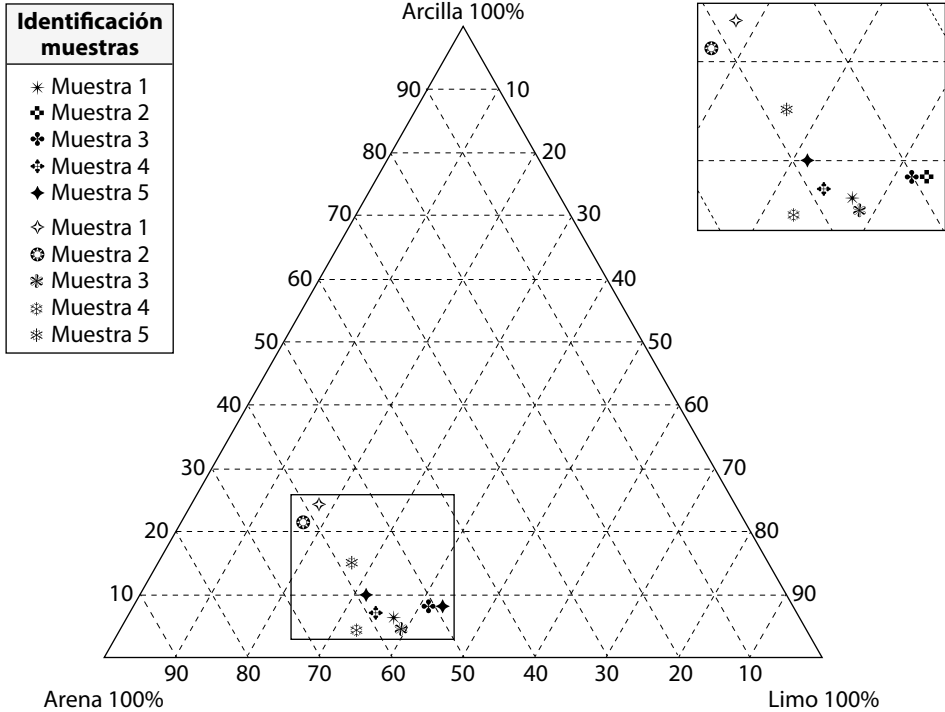
Tabla 24. Hidrometría por granulometría

Muestra	% Arenas Tamiz: 100 mm – 0.08 mm	% Limos Tamiz: 0.08 mm – 0.005 mm	% Arcillas Tamiz: 0.005 mm – 0 mm
#1	58.0	18.0	24.0
#2	61.0	17.8	21.2
#3	56.3	38.1	5.9
#4	59.7	31.1	4.6
#5	58.0	27.0	15.0

Fuente: elaboración propia. Datos tomados de la UFPSO.

La **figura 27** muestra que el uso de los suelos Franco-Areno-Arcillosos son gran medida para la fabricación de ladrillos macizos y bloques perforados.

Figura 27. Gráfica de los puntos de hidrometría en el diagrama de Winkler

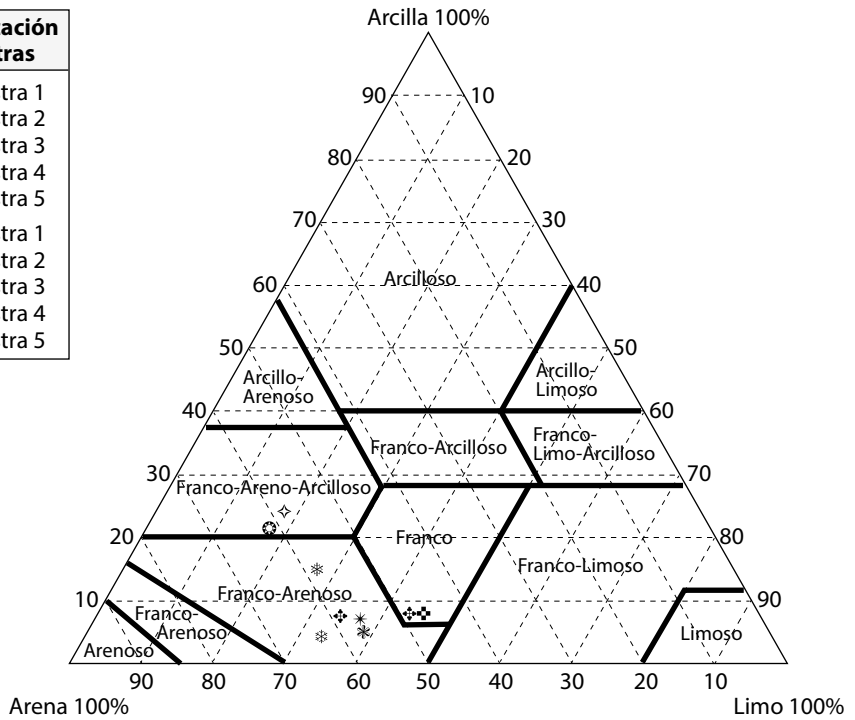


Fuente: elaboración propia.

Se evidencia notoriamente que los resultados obtenidos en los análisis de hidrometría con las mismas muestras pero realizados en los diferentes laboratorios (empresa y universidad) tienen puntos distintos. Los que están en forma de cuadros (■) representan los resultados de análisis realizados en los laboratorios de la empresa y los puntos en forma de triángulos (▲) representan los resultados de los análisis realizados en los laboratorios de la UFPSO. Esto sucede debido a los instrumentos de laboratorio utilizados además del proceso en la toma de datos. La **figura 28** muestra que el diagrama de producto de Winkler se usa con la finalidad de determinar el tipo de textura y la **figura 29** muestra el tipo de producto que se puede fabricar en función del contenido de arena, limo y arcilla.

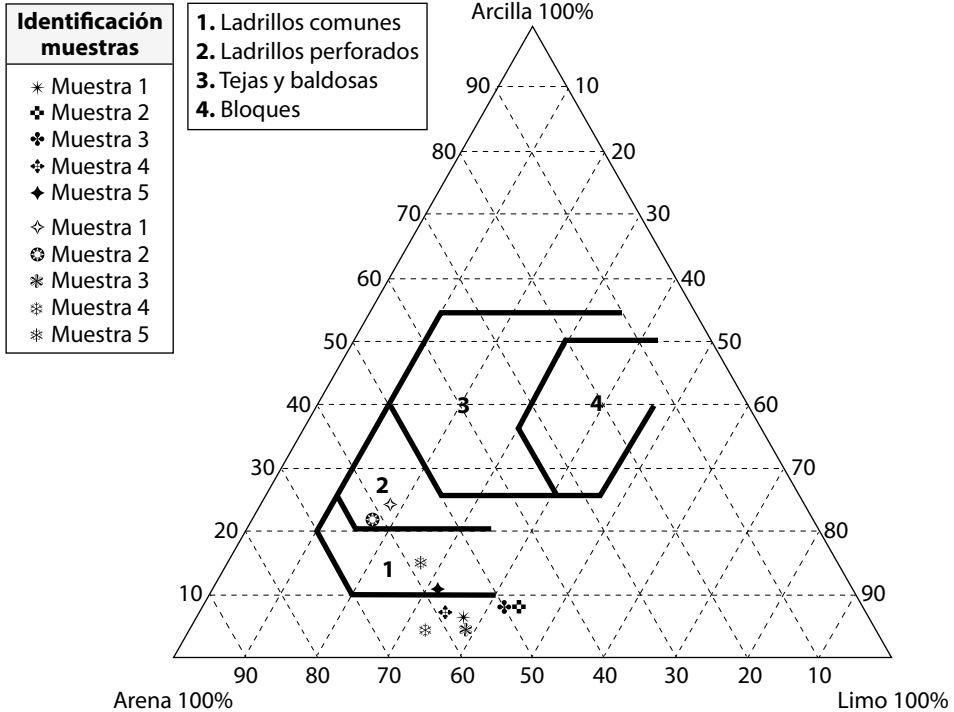
Figura 28. Diagrama de Winkler para tipos de textura

Identificación muestras	
*	Muestra 1
⊕	Muestra 2
⊗	Muestra 3
⊖	Muestra 4
◆	Muestra 5
◇	Muestra 1
⊙	Muestra 2
*	Muestra 3
⊗	Muestra 4
*	Muestra 5



Fuente: adaptado de Mintec Ceramic (2015).

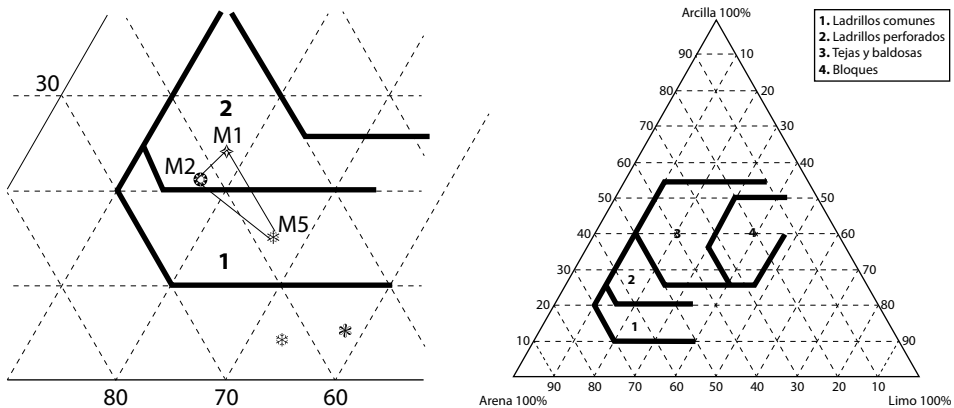
Figura 29. Diagrama de Winkler. Zonas para el tipo de producto



Fuente: adaptado de Mintec Ceramic (2015).

La región óptima para la fabricación (especialmente) de bloques H-10 (**figura 30**), se basó en la materia prima identificada como M1 y M2, teniendo en cuenta esto se procedió a realizar los siguientes análisis respectivos de diseño de mezclas.

Figura 30. Posible región óptima para la mezcla de arcilla



Fuente: elaboración propia.

3.8 Evaluación de los resultados obtenidos

Según la comparación de los dos análisis de hidrometría realizados (laboratorio empresa y universidad), se pudo evidenciar que no se está realizando de la mejor manera el cálculo de los porcentajes de arenas limos y arcillas debido a que en la empresa no tienen en cuenta la distribución granulométrica por tamizado, esta se debe empalmar con los resultados del análisis por hidrómetro y así calcular los porcentajes correctos presentes en la muestra, lo que lleva a que en ocasiones se puedan tomar malas decisiones en cuanto a la formulación de la mezcla de arcilla. Se recomienda realizar estos análisis en un laboratorio que cumpla con lo establecido en las normas con la finalidad de obtener un análisis bajo estándares de calidad. Teniendo en cuenta lo anterior, en el resultado de los análisis respectivos se tuvieron presentes los realizados en el laboratorio de la UFPSO.

Evidentemente el problema en el proceso de fabricación de bloques se encuentra en el tamaño de las partículas de arena que son hasta de 2.0 mm. Quizás esto se deba a que en el proceso de trituración y lamido estos equipos no estén realizando una buena pulverización de la materia prima haciendo que el producto final posea características de alta absorción de agua que debilita la resistencia a la compresión como se evidenció en los ensayos tecnológicos realizados. En conclusión, no existen arcillas con propiedades inadecuadas, sino mezclas mal formuladas en producción. Para que un proceso productivo sea eficiente y de calidad, es necesario diseñar mezclas que cumplan con las exigencias requeridas por las normas técnicas colombianas. Para el caso estudiado las mezclas posibles tienen bajos porcentajes de arcilla, siendo esto una limitante durante el proceso de extrusión de la pasta cerámica.

3.9 Índice de plasticidad

Este análisis se realizó mediante el método de Pfefferkorn sin olvidar el procedimiento mencionado en el manual para el control de la calidad de materias primas arcillosas (Gines, Feliy, García, 1997). Se tomaron 1.000 gramos de muestra pasante malla ASTM No 40 (425 μm) y se subdividieron en cuatro muestras de 150 y 200 gramos cada una. Se amasó cada sub-muestra con la cantidad de agua necesaria para que la consistencia de la masa resultante fuera la adecuada para comenzar el ensayo con el objetivo de completar su homogenización. La masa se dejó en reposo durante 24 horas y una vez transcurrido dicho periodo de tiempo, se amasó nuevamente cada submuestra durante dos minutos y se inició el ensayo. Con la realización de este se determinó la cantidad de agua necesaria a añadir a la mixtura en el proceso de mezclado antes de ingresar a la extrusora (Morales Güeto, 2005).

Para determinar el índice de plasticidad del suelo fue necesario determinar el límite líquido y el límite plástico de las muestras, el cual sería la diferencia entre estos dos valores. En caso de que el resultado fuera un valor decimal se aproximó al entero

más cercano. Si llegaba a ser 0 o menor, la muestra de suelo se asumiría como “no plástica”. Para actividades de construcción la condición ideal deseada sería un límite plástico (LP) elevado y un límite líquido (LL) bajo.

La **tabla 25** refleja los valores obtenidos en el estudio de suelo para calcular el índice de plasticidad y demás variables que se pueden obtener a través de esta caracterización. Se evidencia la presencia de bajos valores de índice de plasticidad (IP), los cuales provocan un cambio rápido en términos de agua adicional, pasando de un comportamiento semi-sólido a uno líquido, afectando al conformado del producto en la extrusora. Este resultado se determina por la cantidad de partículas mayores a 2 mm en aproximadamente un 51 % de la composición de la mezcla. Teniendo en cuenta esta información para la formulación de una mezcla óptima, se seleccionaron las muestras M1, M2, y M5 para llevar a cabo el diseño de experimentos.

Tabla 25. Cálculo del índice del tipo de suelo para todas las muestras

Cálculo	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Límite líquido LL (%)	27.42	27.32	22.71	21.25	25.82
Límite plástico LP (%)	21.91	20.91	23.00	21.00	20.83
Índice de plasticidad IP (%)	5.51	6.41	-0.29	-0.11	4.99
Humedad natural H (%)	22.79	23.41	27.00	26.29	26.20
Densidad seca (gr/cm ³)	1.81	1.84	1.80	1.81	1.79
Colapsabilidad	No colapsable	No colapsable	No colapsable	No colapsable	No colapsable
	1.52	1.52	1.63	1.59	1.56
Índice de consistencia $I_c =$	0.840	0.610	14.793	13.989	-0.076
Índice de liquidez $I_L =$	0.160	0.390	-13.793	-12.989	1.076
Índice de fluencia $I_F =$	-26.924	-7.561	-3.436	-2.874	-1.855
Índice de compresión $C_c =$	0.157	0.156	0.114	0.105	0.142
Contracción lineal CL (%) =	2.587	3.009	-0.136	-0.131	2.343

Fuente: elaboración propia.

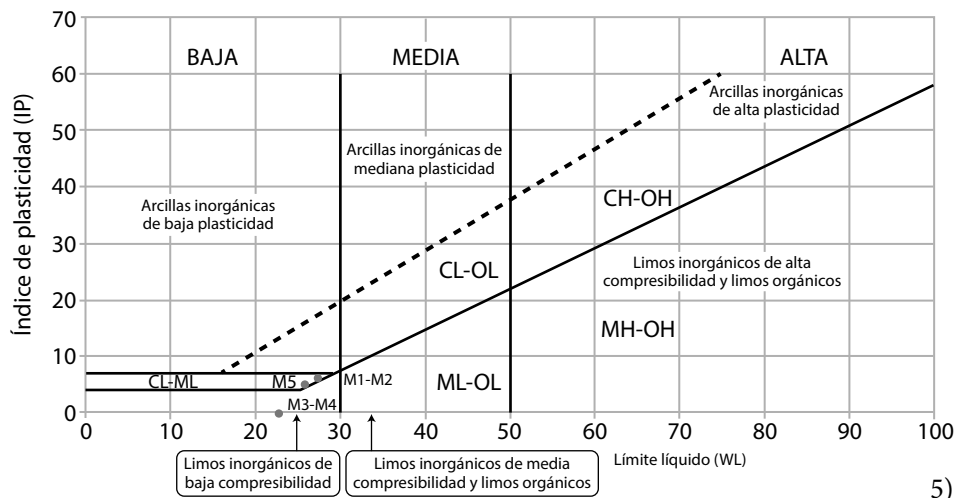
Teniendo en cuenta lo anterior, las muestras analizadas presentan bajos porcentajes de plasticidad (límite líquido aproximadamente entre 25.82 y 27.42 %), demos-

trando propiedades desgrasantes en la mezcla de arcilla que concuerdan con los resultados granulométricos de las muestras para fabricación de bloques. Cuanto más pequeñas son las partículas y su estructura es imperfecta, la mezcla se hace más plástica. El porcentaje de agua para el conformado de las muestras evaluadas está dentro de los rangos permisibles (valor del LP) para la fabricación de productos extruidos (entre 20.83 y 23.00 %), teniendo en cuenta que se consideran rangos normales entre el 18 y 28 % de agua.

Por otro lado, el porcentaje de agua de conformado para las muestras seleccionadas está dentro de los rangos establecidos para las arcillas en la fabricación de productos extruidos. Según el índice de plasticidad se consideran rangos normales entre el 15 y 22 %. Por lo anterior se considera que las arcillas varían en sus características físicas y químicas, debido a que las partículas son finas (menores a 0.008 mm), pero algunas de estas se pueden expresar en términos de plasticidad utilizando pruebas estandarizadas de laboratorio como tamizado e hidrometría (Holtz & Kovacs, 1987), con la finalidad de seleccionar suelos adecuados que posean las propiedades óptimas que faciliten el tratamiento de la muestra.

A continuación, la **figura 31** muestra la representación gráfica del índice de plasticidad (IP) y límite líquido (LL), teniendo en cuenta los índices de Atterberg. Este diagrama demuestra el porcentaje de agua que debe ser aplicada a la pasta cerámica para su conformación:

Figura 31. Plasticidad de las muestras (M1, M2, M3, M4 y M)



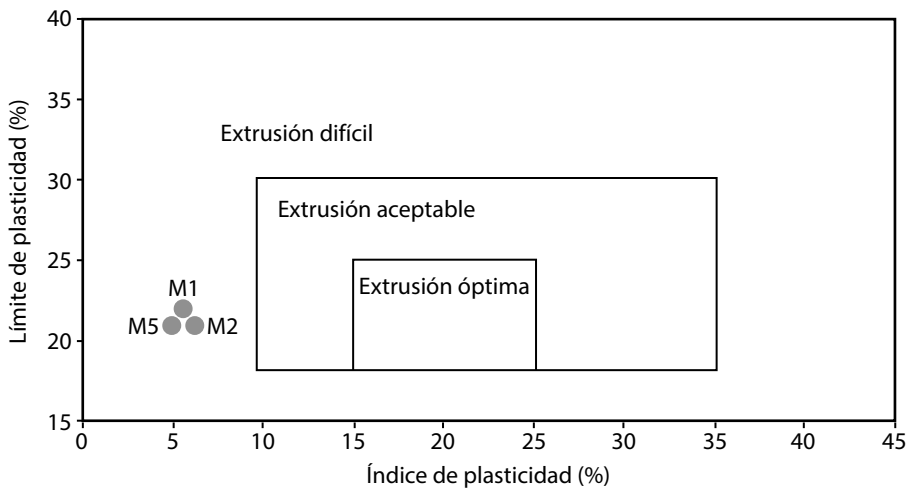
Fuente: elaboración propia.

En la **figura 31** se pueden observar seis zonas y tres secciones las cuales representan la nomenclatura del tipo suelo y la calidad de la plasticidad que influye en el conformado del producto. Por lo que el índice de plasticidad (IP) evidencia que las muestras

son arcillas de baja plasticidad (mimos con trazas de arcillas entre 4-15, según la información obtenida en las referencias). Siendo muestras que se encuentran en la zona de arcillas marnosas, ferríticas, tierras rojas y arcillas de descalcificación (Blanco Álvarez, 2011; Vieira, Sánchez y Monteiro, 2008).

Viendo el índice y límite de plasticidad, se puede predecir la calidad de la extrusión de las muestras (Marsigli y Dondi, 1997; Quintero y Gallardo, 2015), como se muestra en la **figura 32**. Se puede concluir que las muestras M1, M2, M3, M4 y M5 se consideran de compleja extrusión a causa de que ningún punto del diagrama se encuentra en las zonas establecidas de la relación del límite plástico y el índice de plasticidad.

Figura 32. Diagrama de predicción de la extrusión



Fuente: elaboración propia.

CAPÍTULO 4

DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE LA MEZCLA ÓPTIMA DE ARCILLA

Según la información obtenida en los ensayos de laboratorio sobre la caracterización física de las arcillas, se propuso una ventana de proceso para cada mezcla, es decir, los valores mínimos y máximos de las variables que influyen en las propiedades adecuadas para la fabricación del bloque H-10. Estas variables son: la proporción en los componentes de la mezcla, granulometría, humedad, temperatura de secado, cocción y curva de calentamiento. Con la información obtenida en los análisis por hidrometría, se realizaron los diseños experimentales de dos y tres factores (muestras) considerando la cantidad de muestras viables para la formulación de la mezcla óptima.

4.1 Determinación de las composiciones mejoradas con base en dos muestras de arcilla

Teniendo en cuenta el análisis físico realizado a la materia prima de arcilla utilizada en la fabricación de bloques, se determinaron las mezclas de las arcillas plásticas (M1 y M2) con la arcilla arenosa (M5). De todas las mezclas posibles se seleccionaron las muestras M1 y M5 ya que su composición de arenas, limos y arcillas se encuentran dentro de la región 2 (basado en el análisis del diagrama de Winkler), donde el centroide de la región es la composición 58.5 % arena – 20.1 % limo – 21.4 % arcilla, como se mostrará en la **tabla 26** de resultados, la cual fue obtenida con la ayuda del *Software StarGraphics* y su módulo diseño de mezclas.

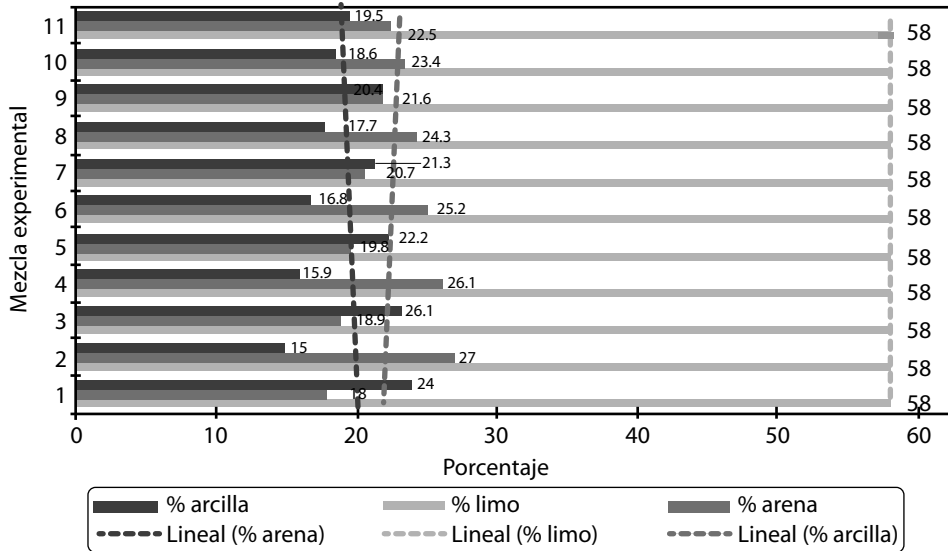
Tabla 26. Diseño de dos mezclas de arcilla para muestras M1 y M5

Mezclas	Muestra 1	Muestra 5	% Arena	% Limo	% Arcilla	Mezcla de arcilla
1	100	0	58	18	24	Pura
2	0	100	58	27	15	Pura
3	90	10	58	18.9	23.1	Combinada
4	10	90	58	26.1	15.9	Combinada
5	80	20	58	19.8	22.2	Combinada
6	20	80	58	25.2	16.8	Combinada
7	70	30	58	20.7	21.3	Combinada
8	30	70	58	24.3	17.7	Combinada
9	60	40	58	21.6	20.4	Combinada
10	40	60	58	23.4	18.6	Combinada
11	50	50	58	22.5	19.5	Combinada

Fuente: elaboración propia.

En la **figura 33** se detallan los resultados del diseño experimental de las mezclas.

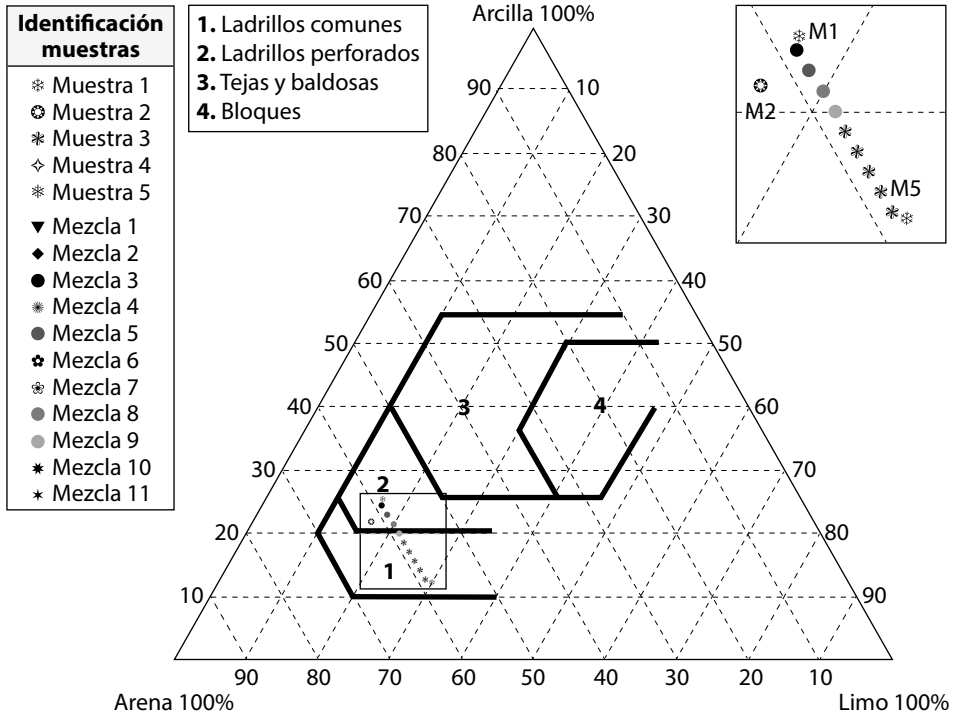
Figura 33. Resultados gráficos de la tabla 26 para (M1 y M5)



Fuente: elaboración propia.

La **figura 34** posiciona las muestras seleccionadas, las cuales fueron graficadas en el diagrama ternario.

Figura 34. Muestras seleccionadas para el diseño experimental (M1 y M5)



Las mezclas M3, M5 y M9 son recomendables por su relación (90-10), (80-20) y (60-40) respectivamente, pero no se tienen en cuenta porque no mantendrían un equilibrio entre las pilas de materia prima, y además, se encuentran en los límites de la región 2, lejos del centroide. Es por esto que se deben garantizar las reservas de materia prima de la empresa con la finalidad de obtener productos de óptima calidad.

4.2 Determinación de las composiciones mejoradas con base en tres muestras de arcilla

Teniendo en cuenta lo encontrado en la sección anterior, una tercera muestra para el diseño de la mezcla también está próxima a los valores del centroide de la región 2 como se muestra en la **tabla 27**, con una composición 58.5 % Arena - 20.1 % Limo - 21.4 % Arcilla. El diseño de experimentos se realizó en el *software estadístico Stargraphics Centurion*.

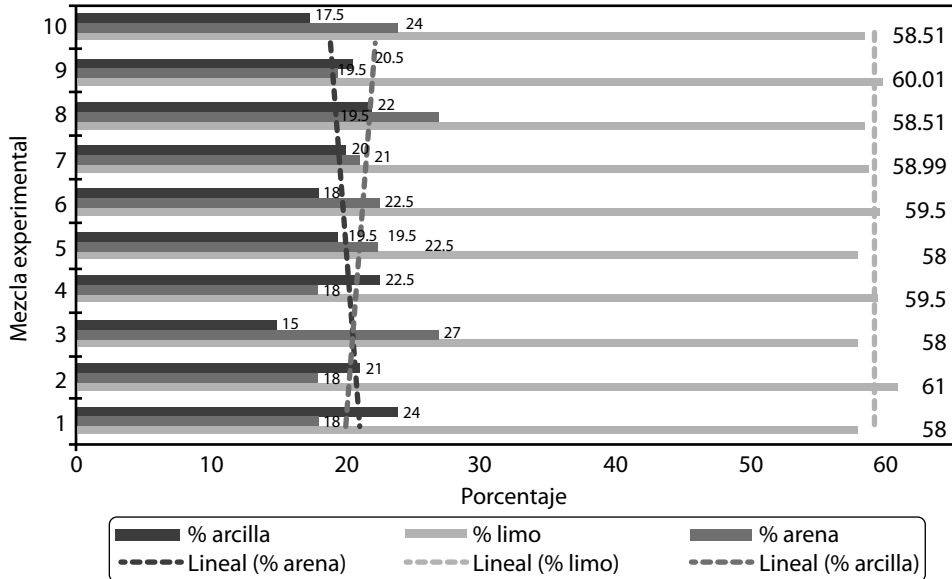
Tabla 27. Diseño de tres mezclas de arcilla para tres muestras (M1, M2 y M5)

Mezclas	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 5	% Arena	% Limo	% Arcilla	Mezcla de arcilla
1	100.00	0.00	0.00	58.00	18.00	24.00	Pura
2	0.00	100.00	0.00	61.00	17.00	21.00	Pura
3	0.00	0,00	100,00	58.00	27.00	15.00	Pura
4	50.00	50.00	0,00	59.50	18.00	22.50	2 combinadas
5	50.00	0.00	50.00	58.00	22.50	19.50	2 combinadas
6	0.00	50.00	50.00	59.50	22.50	18.00	2 combinadas
7	33.33	33.33	33.33	58.49	21.00	20.51	3 combinadas
8	66.67	16.67	16.67	58.00	20.00	22.00	3 combinadas
9	16.67	66.67	16.67	60.01	19.50	20.50	3 combinadas
10	16.67	16.67	66.67	58.51	24.00	17.50	3 combinadas

Fuente: elaboración propia.

En la **figura 35** se muestra la gráfica de resultados de las mezclas seleccionadas.

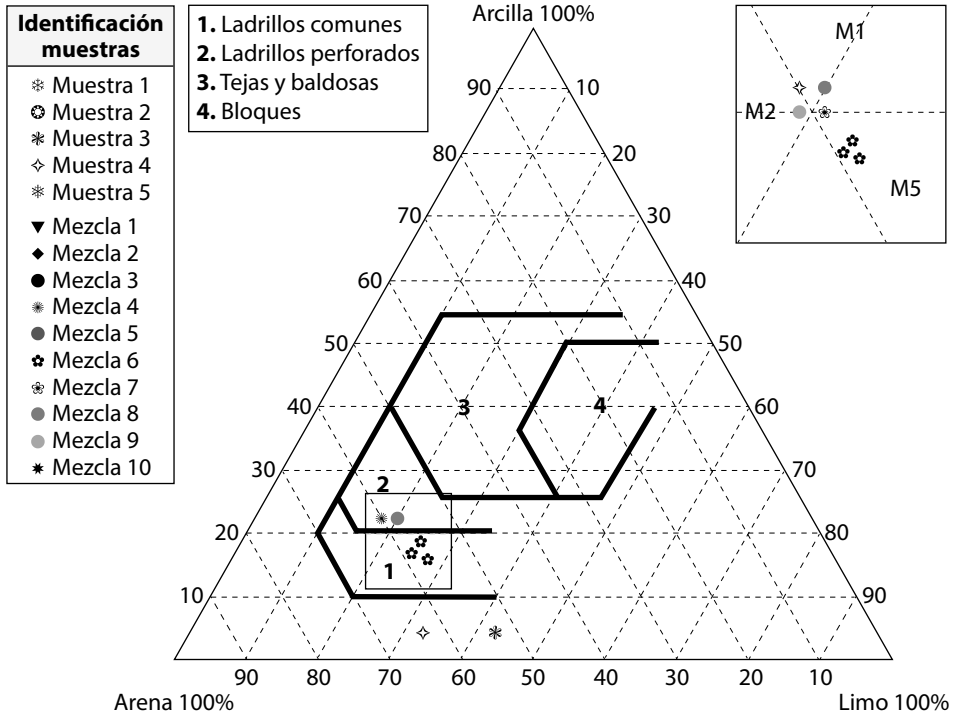
Figura 35. Representación gráfica de los resultados (M1, M2 y M5)



Fuente: elaboración propia.

La **figura 36** muestra las mezclas seleccionadas en el diagrama Winkler, teniendo en cuenta el diseño experimental planteado.

Figura 36. Resultado de las mezclas de las muestras (M1, M2, M5)



Fuente: elaboración propia.

4.3 Evaluación de los resultados obtenidos

Es importante mencionar que la arena se comporta como una variable independiente debido a sus porcentajes entre el 50 y 60 % basado en los resultados de los análisis de tamizado e hidrometría, haciendo difícil establecer una correlación entre las tres variables que son arena, limos y arcillas.

4.4 Caracterización físico-cerámica

En esta etapa se usaron probetas para el proceso de extrusión, pasando por las diferentes etapas a nivel de laboratorio, simulando el proceso industrial de fabricación de un producto cerámico tradicional. En la realización de los análisis las muestras seleccionadas fueron determinadas según las proporciones del diseño de experimentos, teniendo en cuenta la **tabla 28**.

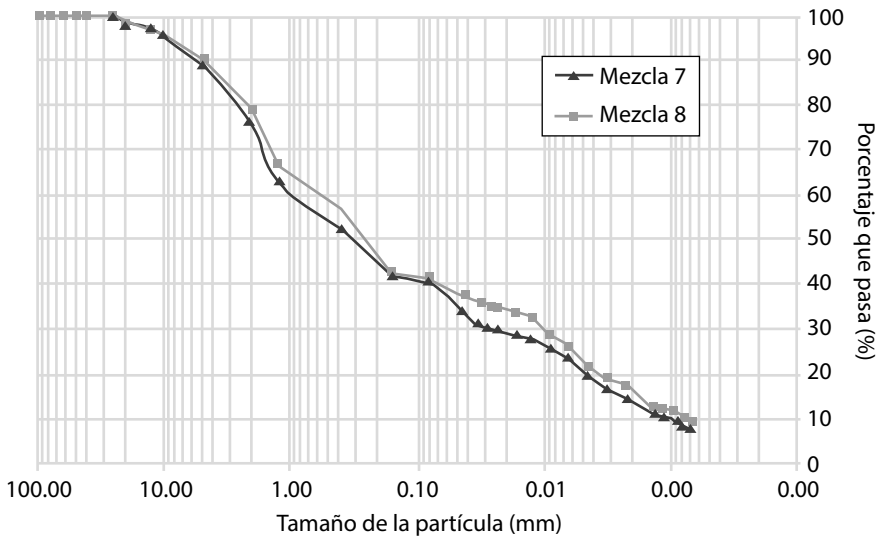
Tabla 28. Preparación de las muestras según lo obtenido en el diseño estadístico

Muestras	M1	M2	M5	Total
M7	10 kilogramos	10 kilogramos	10 kilogramos	30 kilogramos
	33.33 %	33.33 %	33.33 %	
M8	20 kilogramos	5 kilogramos	5 kilogramos	30 kilogramos
	66.67 %	16.66 %	16.66 %	

Fuente: elaboración propia.

4.4.1 Retenido sobre tamiz e hidrometría

Una vez seleccionadas las posibles mezclas óptimas basadas en la materia prima de la empresa, se procedió a realizar el análisis de retenido de tamiz e hidrometría (caracterización física), para calcular los porcentajes de arena, limos y arcillas de las mezclas seleccionadas, al igual el cálculo del índice de plasticidad, como se muestra en la **figura 37**.

Figura 37. Gráfica del tamaño de grano en tamizado e hidrometría de las composiciones M7 y M8

Fuente: elaboración propia.

De la **figura 37** se obtuvo la **tabla 29** que son los resultados esperados:

Tabla 29. Datos hidrometría por granulometría para las mezclas M7 y M8

Mezcla	% Arenas Tamiz: 100 mm – 0.08 mm	% Limos Tamiz: 0.08 mm – 0.005 mm	% Arcillas Tamiz: 0.005 mm – 0 mm
#7	58.99	20.93	20.06
#8	58.49	19.46	22.03

Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta la **tabla 29**, se concluyó que las mezclas pertenecen al tipo de suelo Franco-Arcillo-Limoso debido a su composición de arenas, limos y arcillas, además, las muestras se encuentran en la región dos (fabricación de productos perforados). La siguiente **tabla 30** muestra el cálculo del índice de plasticidad de las mezclas seleccionadas M7 y M8.

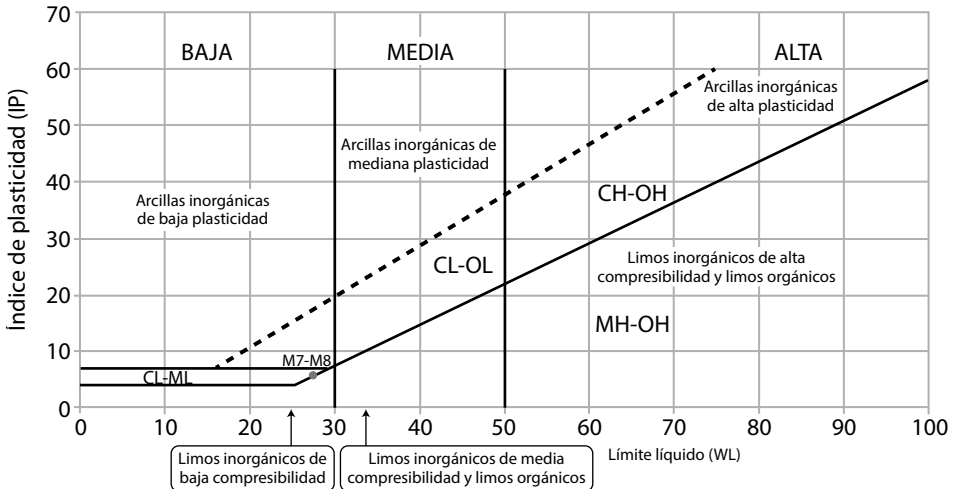
Tabla 30. Cálculo del índice de plasticidad de las mezclas M7 y M8

Cálculo	Mezcla M7	Mezcla M8
Límite líquido LL (%)	26.85	27.13
Límite plástico LP (%)	21.21	21.56
Índice de plasticidad IP (%)	5.64	5.57

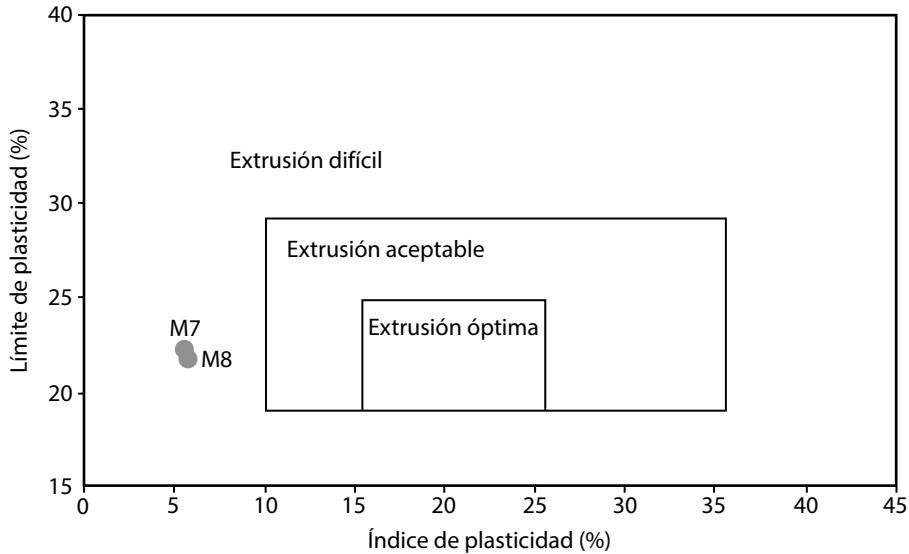
Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, la **figura 38** muestra la gráfica del diagrama de Casagrande, basados en los resultados de la **tabla 30**. Los valores del límite líquido e índice de plasticidad se utilizan para determinar el porcentaje de agua que debe ser aplicada a la pasta cerámica para su conformación en el proceso de producción y asimismo, la predicción de extrusión se muestra en la **figura 39**. Es posible que las mezclas de arcilla sean de compleja extrusión debido a su bajo índice de plasticidad que además se encuentra en la zona CL-ML.

Figura 38. Plasticidad en el diagrama Casagrande para las mezclas M7 y M8



Fuente: elaboración propia.

Figura 39. Comportamiento en extrusión de las mezclas M7 y M8

Fuente: elaboración propia.

4.4.2 Conformado del material

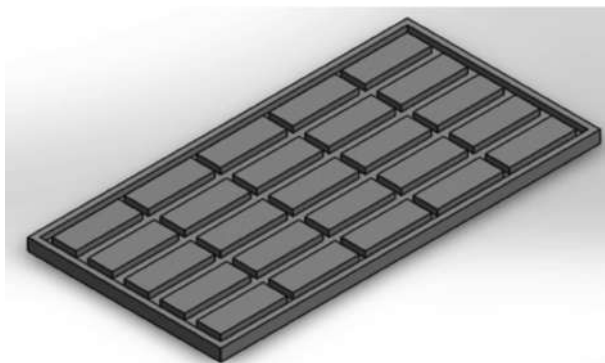
El conformado de las mezclas M7 y M8 se realizó con el método de extrusión, al ser lo recomendable, debido a que este es utilizado por la mayoría de las empresas de la región. En la **tabla 31** se pueden apreciar los parámetros obtenidos en el laboratorio:

Tabla 31. Condición de las composiciones para el conformado

Parámetro	Valor para M7	Valor para M8
Humedad inicial (%)	3.60	2.68
Masa de agua (gr)	3.871	3.523
Masa de la muestra (gr)	15,800	15.800
Presión de extruido (mmHg)	35	35
Arena malla ASTM 230 (%)	51.57	53.58

Fuente: elaboración propia.

La masa plástica se homogenizó durante 12 horas con el fin de conseguir una buena humectación. Posteriormente se moldearon muestras de forma rectangular de 11 cm de longitud por 4 cm de ancho y 1 cm de espesor, como se muestra en la **figura 40**.

Figura 40. Conformación de las probetas en el laboratorio

Nota: análisis y conformación de las muestras realizadas en el laboratorio.
Fuente: elaboración propia.

El secado se realizó durante 12 horas a temperatura ambiente, y después en estufa de secado desde 60 ± 5 °C hasta 110 ± 5 °C, con una velocidad de calentamiento de 10 °C/hora. Una vez alcanzada esta temperatura se mantuvo durante 24 horas de secado.

4.4.3 Contracción lineal

La contracción se midió por diferencia de peso y dimensiones en secado y en cocido. La contracción en secado se realizó a 110 °C aproximadamente durante 24 horas obteniendo los resultados mostrados en la **tabla 32** y **tabla 33**, para las mezclas M7 y M8 respectivamente.

Tabla 32. Datos de encogimiento lineal para las probetas extruidas de la composición M7

Probeta	Temperatura (°C)	Condición seca		Condición cocida		Contracción		Pérdidas de masa		Absorción de agua (%)
		Longitud (mm)	Masa (g)	Longitud (mm)	Masa (g)	Seca (%)	Cocida (%)	Seca (%)	Cocida (%)	
1	1,050	112.18	70.58	112.03	67.47	6.059	0.138	26.284	4.406	19.505
2	1,000	110.80	70.59	111.67	67.23		0.112		4.760	19.569
3	950	110.62	70.68	110.57	67.59		0.045		4.372	19.611
4	900	111.69	70.73	111.89	67.70		-0.179		4.277	19.764
5	850	112.14	71.49	112.63	68.60		-0.437		4.043	19.913
6	800	113.19	71.09	113.80	68.50		-0.539		3.636	20.117

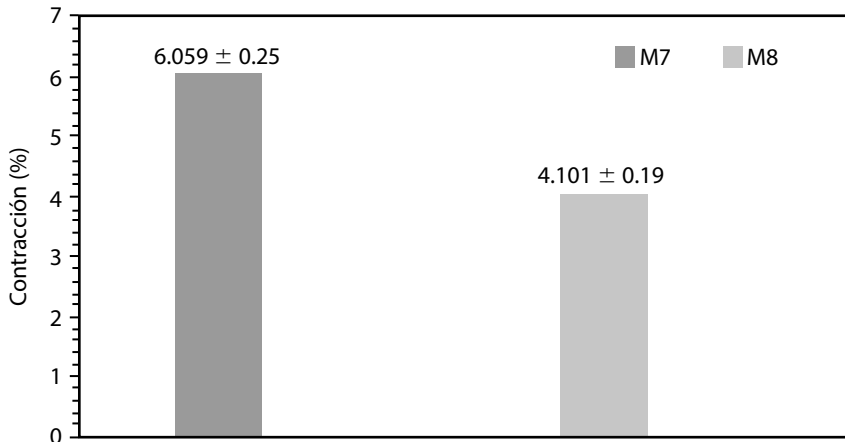
Fuente: elaboración propia.

Tabla 33. Datos de encogimiento lineal para las probetas extruidas de la composición M8

Probeta	Temperatura (°C)	Condición seca		Condición cocida		Contracción		Pérdidas de masa		Absorción de agua (%)
		Longitud (mm)	Masa (g)	Longitud (mm)	Masa (g)	Seca (%)	Cocida (%)	Seca (%)	Cocida (%)	
1	1.050	112.52	72.27	113.47	69.03	4.101	-0.849	24.608	4.490	20.934
2	1.000	110.67	70.51	111.52	67.47		-0.764		4.311	21.165
3	950	113.47	73.73	114.22	70.56		-0.661		4.306	21.260
4	900	113.30	72.03	113.84	68.93		-0.477		4.311	21.509
5	850	112.86	72.80	113.37	69.81		-0.456		4.107	21.653
6	800	113.37	72.22	113.80	68.50		-0.093		3.932	21.663

Fuente: elaboración propia.

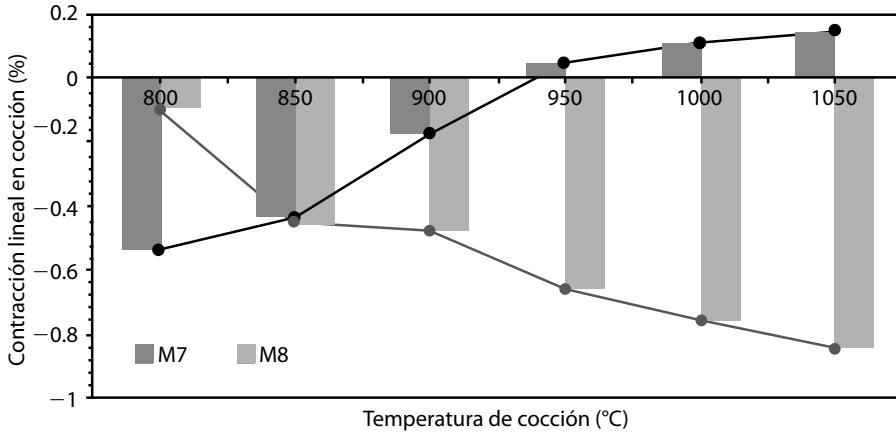
Con base en las anteriores tablas se elabora la **figura 41**:

Figura 41. Contracción al secado de las mezclas óptimas

Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta el parámetro representado, las dos mezclas cumplen con la especificación, es decir, que las contracciones sean menores al 10 %, por lo que estas mezclas se pueden usar en ciclos rápidos de secado.

Posteriormente se obtuvo la **figura 42** con la finalidad de validar los porcentajes de contracción en función de la temperatura.

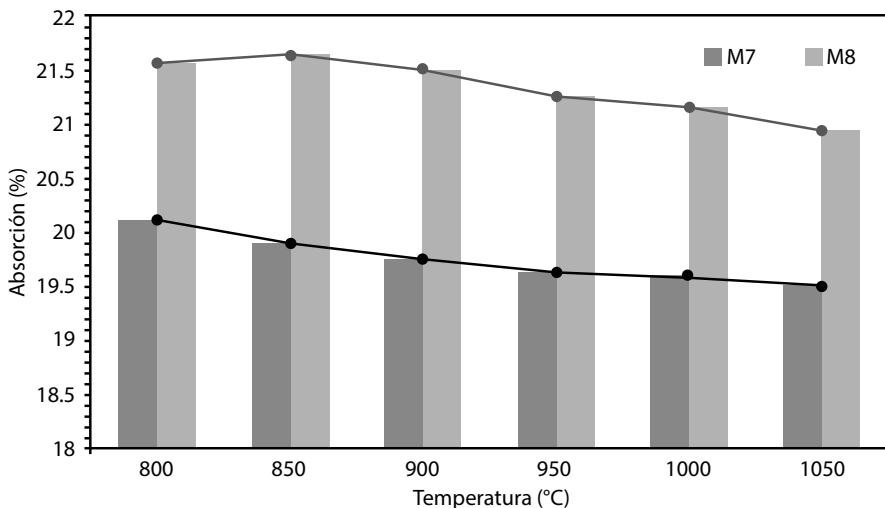
Figura 42. Contracción lineal en cocción vs. temperatura

Fuente: elaboración propia.

La contracción en cocido no es superior al 2.0 % de las temperaturas evaluadas, por lo que no se deben presentar problemas como fracturas o deformaciones en la etapa de cocción para el caso de la mezcla M7. Las pérdidas por calcinación son menores al 10 %, lo que no significa un problema en esta etapa del proceso. Asimismo, el porcentaje de contracción a una temperatura de 850 °C es igual para las dos muestras con un valor de -0.456 %.

4.4.4 Absorción de agua

En la **figura 43** se observa el porcentaje de absorción de agua en función de la temperatura de cocción en el laboratorio para las mezclas M7 y M8.

Figura 43. Absorción de agua vs. temperatura

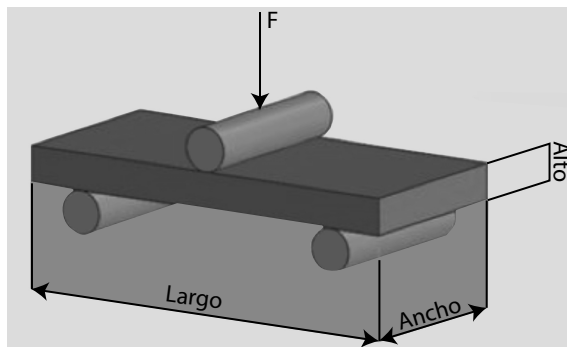
Fuente: elaboración propia.

En la **figura 43** se observan porcentajes altos de absorción de agua, esto se debe a que existe una porosidad abierta de la pieza que varía en función de la temperatura. Según los valores establecidos por la norma NTC 4205, que indica máximo de 13.5 %, ninguna de las muestras cumple esta especificación. Esto sucede porque las partículas de arena son de gran tamaño. En el proceso de triturado no se obtienen los tamaños de las partículas de arena idóneos (> 2 mm), por lo que se tienen altas porosidades y por consiguiente altos porcentajes de absorción de agua. Además se observa que a los 950 °C la absorción de agua tiende a ser estable a medida que aumenta la temperatura, siendo la mezcla M7 la más óptima, pero no es suficiente para cumplir con las especificaciones de la norma NTC 4205.

4.4.5 Resistencia mecánica a la flexión en la quema

Este análisis permite conocer si los productos fabricados cumplen con los estándares mínimos establecidos en las normas nacionales e internacionales vigentes para productos de mampostería para la construcción, y es usado como control de calidad en las piezas fabricadas. Todo esto se realizó bajo lo establecido por la norma NTC 4321-4. (ICONTEC, 1998; García *et al.*, 2018).

Figura 44. Resistencia mecánica a la flexión y carga de rotura



Fuente: elaboración propia.

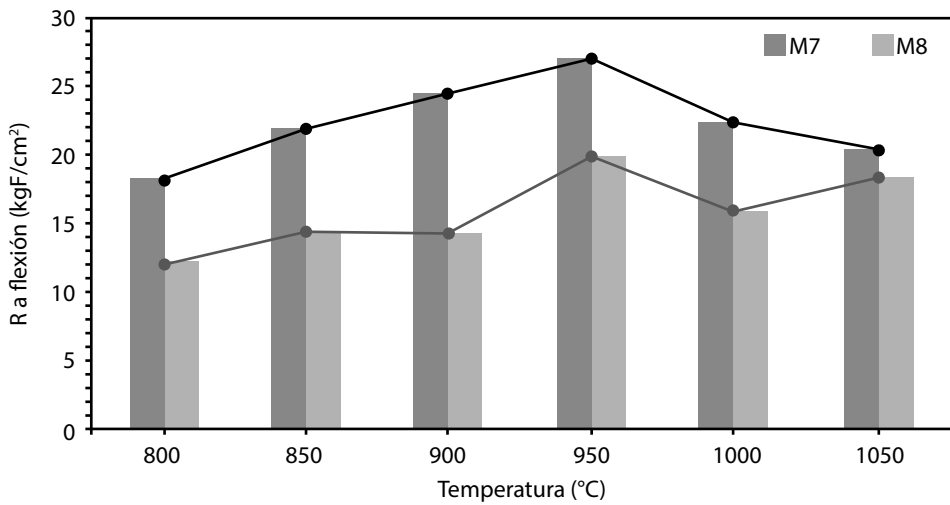
La resistencia a la flexión fue determinada en las probetas obtenidas a diferentes temperaturas. La carga fue fijada en dos apoyos y posteriormente se realizaron las conversiones necesarias ($\text{N/mm}^2 \rightarrow 10.2 \times \text{KgF/cm}^2$), como se muestra en la **figura 44**. Los resultados son resumidos en la siguiente **tabla 34**:

Tabla 34. Esfuerzo último a flexión en función de la temperatura

Temperatura (°C)	Esfuerzo último (KgF/cm ²)	
	M7	M8
800	18.36	12.24
850	21.93	14.28
900	24.48	14.28
950	27.03	19.89
1000	22.44	15.81
1050	20.40	18.36

Fuente: elaboración propia.

De la tabla anterior resulta la **figura 45** para las dos mezclas seleccionadas.

Figura 45. Temperatura vs. Resistencia a la flexión

Fuente: elaboración propia.

Las propiedades mecánicas en los materiales cerámicos están influenciadas por la porosidad, y a la vez, relacionadas con la resistencia mecánica a la flexión y al disminuir esta porosidad del material, inevitablemente se aumenta la resistencia mecánica y mejorando las características del producto final. De esta manera es que se determina que el tamaño de las partículas de arena juegan un papel importante en las propiedades de resistencia y absorción de los productos base arcilla.

4.4.6 Curva de Bigot

El proceso de secado se llevó a cabo en dos temperaturas de 60 ± 5 °C y 80 ± 5 °C, de la cual se promedió la temperatura inicial de 30 ± 5 °C. De los datos obtenidos del análisis físico cerámico resultan los siguientes valores para la curva de Bigot, atendiendo al porcentaje de contracción y la pérdida de masa en relación con la temperatura presentes en la **tabla 35**.

Tabla 35. Datos promedios de la curva de Bigot para las muestras seleccionadas

Ciclo térmico Contracción seca		Promedios		
		Pérdidas de masa	Velocidad de contracción	
Temperatura °C	Mezcla	%	%	(%/Mín)
± 30	M7	0.760	0.445	0.050
	M8	1.005	1.865	0.060
± 60	M7	0.414	1.036	0.027
	M8	0.028	0.056	0.0186
± 80	M7	0.379	1.116	0.025
	M8	0.286	0.712	0.019

Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos en la **tabla 35** para los diferentes ciclos de secado, demuestran una variación significativa entre las dos mezclas (M7 y M8), debido a que la velocidad de contracción disminuye a medida que aumenta la temperatura. Las curvas realizadas a las diferentes temperaturas muestran un comportamiento similar, pero se deduce que el mejor comportamiento se obtiene a temperatura ambiente (± 30 °C). La velocidad de contracción es menor a esta temperatura, lo que significa un bajo riesgo de rotura durante el proceso.

Existen otras variables que intervienen en el momento del secado del producto, como lo son la humedad relativa, temperatura del ambiente, velocidad del secado, y la más importante, la velocidad de la contracción, debido a que si no se controla esta variable se pueden producir deformaciones y defectos internos que no serían visibles durante las varias etapas de secado que se presentan en el proceso de fabricación de bloques. Este comportamiento fue validado con las figuras obtenidas del análisis por termogravimetría.

4.5 Determinación química y mineralógica

Esta caracterización se realizó mediante fluorescencia de rayos X (FRX) y difracción de rayos X (DRX) (Swisscontact, 2011; Rozo, Sánchez y Gelves, 2015; Selmani *et al.*, 2015). Para la realización de estos análisis se usaron 20 gramos de las mezclas seleccionadas (M7 y M8).

4.5.1 Fluorescencia de rayos X (FRX)

Es un ensayo no destructivo en el que se analiza un espectro de rayos X emitido por la muestra, conocido como la fluorescencia (Roquet, 2012; Rozo *et al.*, 2015; Perales y Barrera, 2013; Ramírez, Andrade, José, Juárez y Carmen, 2002). La fluorescencia de rayos X, también conocida como espectrografía de rayos X, es un método físico para el análisis de los materiales arcillosos, su objetivo es determinar cualitativa y cuantitativamente la composición química de una muestra. La importancia del conocimiento de la composición química y materiales arcillosos radica en principio como método complementario en identificación de minerales arcillosos.

Tabla 36. Fluorescencia de rayos X para ambas mezclas óptimas (M7 y M8)

Elemento		Mezcla 7	Mezcla 8
Fórmula química	Nombre	Composición %	
Al ₂ O ₃	Óxido de aluminio	20.67	20.56
Ba	Bario	0.078	0.075
CaO	Óxido de calcio	1.845	1.274
Co	Cobalto	0.006	0.000
Cr	Cromo	0.007	0.002
Cu	Cobre	0.000	0.001
Fe ₂ O ₃	Óxido de hierro	6.567	6.691
K ₂ O	Óxido de potasio	2.926	3.301
MgO	Óxido de magnesio	0.898	0.803
Mn	Manganeso	0.058	0.064
Na ₂ O	Óxido de sodio	0.626	0.388
Ni	Níquel	0.001	0.001
P ₂ O ₅	Óxido de fósforo	0.448	0.452
Pb	Plomo	0.020	0.000
Rb	Rubidio	0.050	0.065
SiO ₂	Óxido de silicio	54.74	56.58
Sr	Estroncio	0.826	0.077
TiO ₂	Óxido de titanio	0.871	0.930
V	Vanadio	0.067	0.009
Zn	Zinc	0.059	0.060
Zr	Circonio	0.047	0.061
LOI	Pérdidas por ignición	9.187	8.599
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	Relación molar	2.648	2.751
Total		100.00	100.00

Nota: resultados obtenidos para las mezclas óptimas. Fuente: elaboración propia.

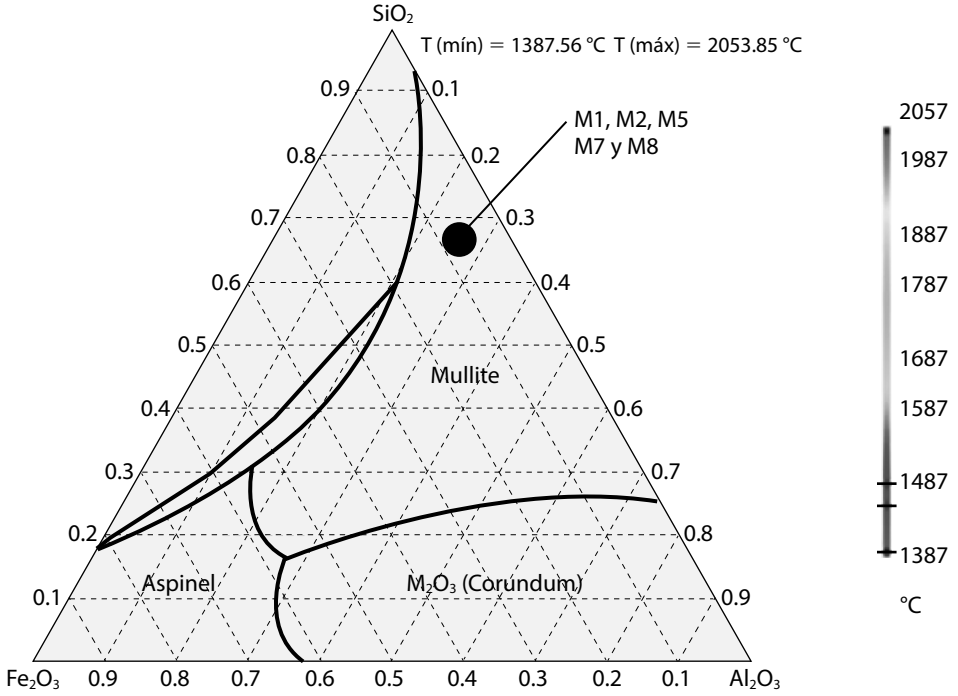
La **tabla 36** representa altos porcentajes de algunos compuestos que causan una influencia específica en las propiedades como se explica a continuación:

- Sílice (SiO_2) de 54.743 y 56.582 % para las dos mezclas respectivamente, lo que causa un rápido proceso de secado. En cocción un descenso en la contracción. La alúmina también se encuentra en altos porcentajes para ambas mezclas teniendo en cuenta qué características químicas son recomendadas para la construcción son de 50 a 60 %.
- Alúmina (Al_2O_3) de 20.670 y 20.565 % para las dos mezclas, confiriéndole una resistencia a altas temperaturas y una disminución de roturas en cocción. Teniendo en cuenta las características químicas recomendadas para la construcción es 20 a 30 %.
- Arcillas montmorilloníticas debido a que su composición química es: SiO_2 : 48 – 56 %, Al_2O_3 : 11 – 22 %, MgO : 0.3 – 0.8 %.
- Óxido de hierro (Fe_2O_3) de 6.567 y 6.691 % para las dos mezclas respectivamente. Son normales por ser menores al 10 %. Este óxido le conferirá un color rojo después de la quema (Vieira *et al.*, 2008) y debido a su porcentaje posiblemente no aparezca el efecto de corazón negro.
- Los bajos contenidos de óxidos alcalinos (sodio y potasio) y de óxidos alcalinotérreos (magnesio y calcio), hace posible que la arcilla genere la fase vítrea a temperaturas relativamente altas (mayor a 900 °C), confiriéndole propiedades de semi refractariedad.
- La presencia de un alto contenido de óxido de potasio (K_2O) de 2.926 y 3.301 %, por encima de los demás óxidos alcalinos y alcalinotérreos, lo clasifica como un material illítico. Los demás elementos se encuentran en bajas proporciones que no afectarán la estructura del producto final (Amado, Villafrades y Tuta, 2011; Cely, 2012).

4.5.2 Diagramas de fases

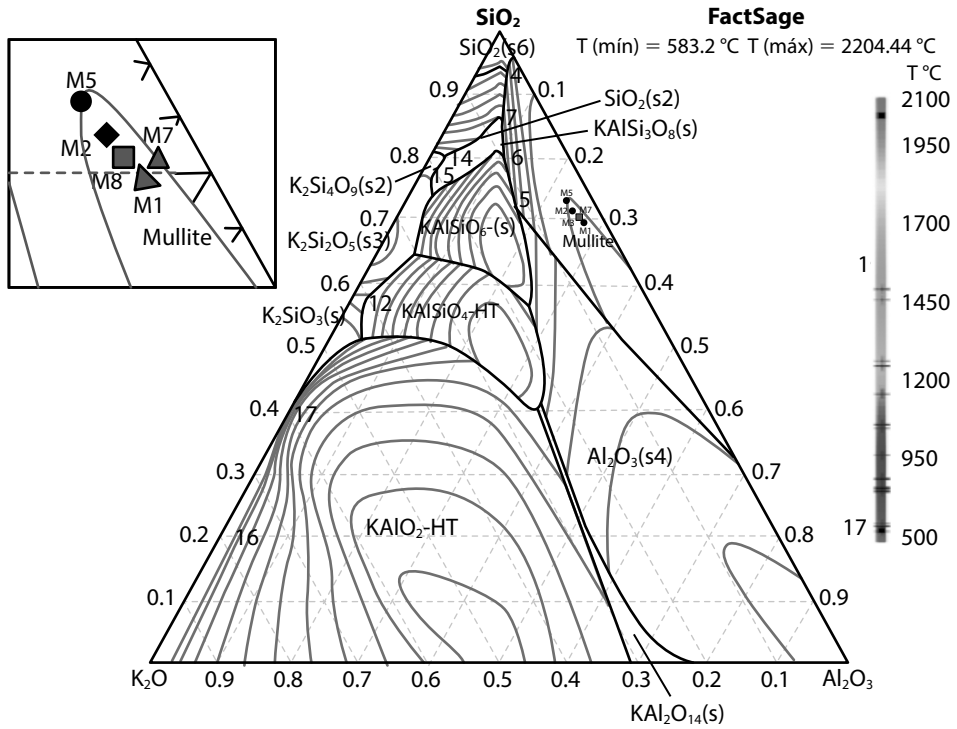
Los diagramas de fases ternarios (A-B-C) fueron realizados con la finalidad de determinar las temperaturas con las que se obtiene la fase mullita en función de los componentes de porcentajes más altos (se tomaron tres de estos de las mezclas M7 y M8 y M1), también M2 y M5, con porcentajes elevados como SiO_2 - Al_2O_3 - SiO_2 y SiO_2 - Al_2O_3 - K_2O . Se determinó según los resultados de FRX que el óxido de hierro es uno de los compuestos más abundantes junto con el óxido de potasio. En la **figura 46** y **figura 47**, se observa que los puntos de las mezclas y las muestras están muy cercanos.

Figura 46. Diagrama ternario de SiO_2 , Fe_2O_3 y Al_2O_3



Fuente: elaboración propia.

Figura 47. Esquema ternario FactSage SiO₂, Al₂O₃ y K₂O, para las dos mezclas óptimas (M7 y M8), y las muestras (M1, M2 y M5)



Fuente: elaboración propia.

Para encontrar la temperatura se deben usar las variables de los diagramas ternarios. Se interpolan los valores de la **tabla 37**, establecidos por el *software FactSage*.

Tabla 37. Valores de A = SiO₂, B = K₂O y C = Al₂O₃, para encontrar la temperatura de cocción

No	X(A)	X(B)	X (C)	°C
1	0.41019	0.23426	0.35555	1,660.58
2	0.40017	0.24474	0.35510	1,655.19
3	0.56491	0.17404	0.26105	1,526.40
4	0.93808	0.01660	0.04531	1,465.37
5	0.72478	0.11082	0.16440	1,403.74
6	0.80082	0.08948	0.10970	1,144.31
7	0.86099	0.06444	0.07458	972.92
8	0.64754	0.29596	0.05650	910.94
9	0.51392	0.43949	0.04659	891.00
10	0.82919	0.11931	0.05150	866.94
11	0.74352	0.22523	0.03225	761.32
12	0.57363	0.40602	0.02035	752.41
13	0.76654	0.21234	0.02113	706.23
14	0.80372	0.17513	0.02115	703.73
15	0.76654	0.21234	0.02113	692.62
16	0.20402	0.79580	0.00018	615.56
17	0.39415	0.60548	0.00037	583.38

Fuente: elaboración propia.

4.5.3 Difracción de rayos X (DRX)

La difracción de rayos en una muestra permite abordar la identificación de fases cristalinas tanto arcillosas como no arcillosas debido a que todos los sólidos cristalinos poseen un difractograma característico. Su análisis, tanto en su aspecto cualitativo como cuantitativo, puede arrojar conclusiones acerca de polimorfismo, transiciones de fase, soluciones sólidas, medida del tamaño de partícula y determinación de diagramas de fase (Roquet, 2012; Środon, 2006; Rozo, Sánchez y Gelves Díaz, 2014; Duitama, Espitia, Mojica, Quintero y Romero, 2004; Zeballos-Velásquez, Melero, Trujillo, Mejía y Ceroni, 2014). La técnica de DRX identifica las caracterizaciones estructurales y de fases cristalinas (Illera, Illera y Contreras, 2015; Peña y Ortega, 2014). También halla los minerales cristalinos presentes en una muestra, dado que los minerales arcillosos corresponden a este tipo. En su mayoría las mezclas de arcillas presentan una composición por ejemplo: 50 % de caolinita + 30 % de cuarzo + 20 % de feldespato potásico (Rendón Ríos, 2009).

Con este análisis se lograron identificar las fases presentes en los especímenes seleccionados de las muestras antes de cocción, utilizando los perfiles de difracción reportados en la base de datos pdf-2 del *International Centre for Diffraction Data* (ICDD), además del análisis cuantitativo sin determinación de amorfo.

La **tabla 38** muestra los resultados obtenidos para la mezcla M7 y su gran similitud presentada en el análisis de FRX. Se determinó que el mejor comportamiento en cuanto a propiedades químicas lo presentaba esta mezcla. Por otra parte, la **figura 48** presenta el difractograma característico para la mixtura.

Tabla 38. Disposiciones mineralógicas del análisis DRX, para la mezcla M7

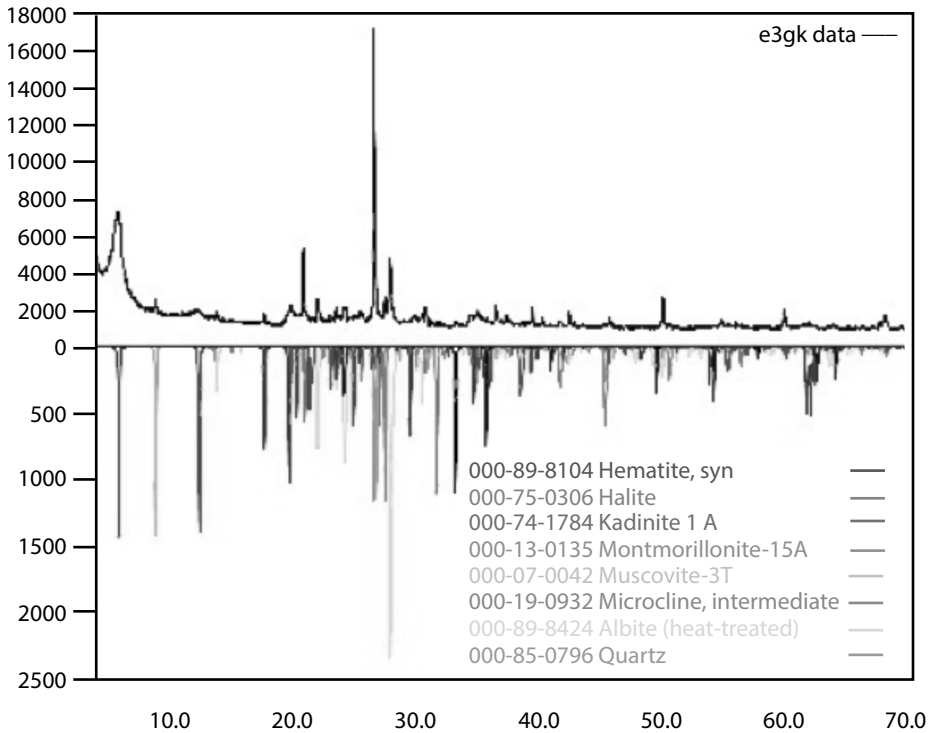
Código de referencia ICDD	Nombre del mineral	Fórmula química	Porcentaje (%)	Caracterización cristalográfica
000-89-8934	Cuarzo	SiO ₂	38.1	Sistema cristalino hexagonal
				A = 4.91523 B = 4.91523 C = 5.40597
000-86-1385	Moscovita	K _{0.86} Al _{1.94} (Al _{0.965} Si _{20.895} O ₁₀) ((OH) _{1.744} F _{0.256})	19.1	Sistema cristalino monoclinico
				A = 5.20888 B = 8.98997 C = 20.0848
000-78-1996	Caolinita	Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄	16.2	Sistema cristalino triclinico
				A = 5.25985 B = 8.98283 C = 7.47797
000-70-3752	Albita	(Na _{0.98} Ca _{0.02}) (Al _{1.02} Si _{2.98} O ₈)	13.7	Sistema cristalino triclinico
				A = 8.14327 B = 12.7973 C = 7.15759
000-77-0135	Microclina	K(Si _{0.75} Al _{0.25}) ₄ O ₈	10.3	Sistema cristalino triclinico
				A = 8.61779 B = 12.9766 C = 7.20946
000-13-0135	Montmorillonita	Ca _{0.2} (Al.nMg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ !4 H ₂ O	2.6	Sistema cristalino triclinico
				A = 6.5627 B = 9.89515 C = 15.61

Continúa

Código de referencia ICDD	Nombre del mineral	Fórmula química	Porcentaje (%)	Caracterización cristalográfica	
000-85-0795	Cuarzo	SiO ₂	40.9	Sistema cristalino hexagonal	
				A = 4.9152 B = 4.9152 C = 5.40609	α = 90 β = 90 φ = 120 P3221 (154)
000-74-1784	Caolinita	Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄	21.4	Sistema cristalino triclinico	
				A = 5.09041 B = 8.70644 C = 7.45328	α = 94.9067 β = 106.4 φ = 88.3301 C-1
000-77-0135	Microclina	K(Si _{0.75} Al _{0.25}) ₄ O ₈	9.1	Sistema cristalino triclinico	
				A = 8.65321 B = 12.959 C = 7.2016	α = 90.0574 β = 115.622 φ = 90.2709 C-1
000-89-6427	Albita	Na (Al Si ₃ O ₈)	8.7	Sistema cristalino triclinico	
				A = 8.14327 B = 12.7973 C = 7.15759	α = 94.2205 β = 116.597 φ = 87.8905 C-1
000-13-0135	Montmorillonita	Ca _{0.2} (Al.nMg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ !4 H ₂ O	1.5	Sistema cristalino triclinico	
				A = 4.99985 B = 9.83294 C = 15.4904	α = 79.4753 β = 97.8045 φ = 113.059 C-1

Fuente: elaboración propia.

Figura 48. Difractograma para la mezcla M7



Fuente: elaboración propia.

La composición de feldespatos constituyentes de rocas corresponde a un sistema ternario compuesto de cuarzo, moscovita y caolinita del que se obtiene el difractograma de la **figura 48** (Crespo, García y Afanador, 2020) corresponde a un sistema ternario compuesto de cuarzo (SiO_2), albita ($\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$) y caolinita ($\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$).

Tabla 39. Disposición mineralógica de las observaciones DRX para mezcla M7

Código de referencia ICDD	Nombre del mineral	Fórmula química	Porcentaje (%)
000-85-0795	Cuarzo	SiO_2	27.5
000-89-6427	Albita	$\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	18.6
000-74-1784	Caolinita	$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$	16.7
000-77-0135	Microclina	$\text{K}(\text{Si}_{0.75}\text{Al}_{0.25})_4\text{O}_8$	9.4
000-13-0135	Montmorillonita	$\text{Ca}_{0.2}(\text{AlMg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1.5
000-86-1385	Moscovita	$\text{K}_{0.86}\text{Al}_{1.94}(\text{Al}_{0.965}\text{Si}_{20.895}\text{O}_{10}((\text{OH})_{1.744}\text{F}_{0.256}))$	5.9
000-75-0306	Halita	NaCl	<1
000-87-1166	Hematita	Fe_2O_3	<<1

Fuente: elaboración propia.

4.6 Evaluación de los resultados obtenidos

En el análisis por DRX se indica que los minerales arcillosos están constituidos principalmente por sílice y aluminosilicatos hidratados, también hay presencia de algunas impurezas, tales como Na, Fe, K y Ca. Los difractogramas reflejan las fases presentes en los materiales y destaca el alto contenido de microclina y moscovita, justificando así su color amarillo (Linares *et al.*, 2008). Este tipo de análisis es fundamental para determinar la calidad de las mismas en función del contenido de SiO₂ y Al₂O₃.

En la **tabla 40** se reflejan las propiedades de los elementos presentes en los difractogramas, con lo que se determinaron sus propiedades más importantes.

Tabla 40. Propiedades de las fases

Elemento	Fórmula química	Categoría	Propiedades	Elemento
Caolinita	Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄	Filosilicatos	Es higroscópico. Plasticidad baja. Resiste altas temperaturas	Caolinita
Moscovita o Illita	K _{0,86} Al _{1,94} (Al _{0,965} Si _{20,895} O ₁₀) (OH) _{1,744} F _{0,256}	Filosilicatos	Inestables. Inexpansibles Plasticidad media.	Moscovita o Illita
Montmorillonitas	(Na,Ca) _{0,3} (Al, Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ · nH ₂ O	Filosilicatos	Expansivas. Tiropoxico. Inestable.	Montmorillonitas

Fuente: elaboración propia.

Los resultados indican un sistema ternario de feldespatos por la presencia de albita, anortita y feldespato potásico. La albita es alta debido a la poca ordenación de Al-Si, que aparece a temperaturas entre 700 y 980 °C (Illera, 2012).

El análisis químico de FRX realizado a la materia prima usada para la mezcla de la pasta se indica en la **tabla 38**. Teniendo en cuenta la bibliografía, las arcillas aptas para la fabricación de ladrillo cerámico deben contener SiO₂ entre el 64.1-83.1 %, Al₂O₃ entre el 21.6-27.1 % y Fe₂O₃ entre 3.0-6.1 % según Duitama, Espitia y Mojica (2004). Los resultados se encuentran entre 54.73-56.52 % de SiO₂, Al₂O₃ y 20.56-20.67 % y Fe₂O₃ entre 6.56- 6.61 %, siendo así similares.

La composición de estas dos arcillas no se aleja mucho del rango óptimo, además dicha composición puede alcanzarse fácilmente con la mezcla de las arcillas. Por otro lado la mezcla M1, por su composición química, podría utilizarse sin unirla a otras. El contenido de alúmina en las mezclas repercute directamente en la resistencia mecánica del producto de mampostería. También se evidencia en las mezclas la presencia de contenido de óxido de hierro necesario para la impermeabilidad, durabilidad, resistencia y dureza.

Los análisis obtenidos por DRX para las mezclas óptimas seleccionadas (M7) demostraron que la composición mineralógica estaba constituida por cuarzo (38.1-40.9 %), albita (8.7-13.7 %), microclina (9.1-10.3 %), montmorillonita (1.5-2.6 %), moscovita (18.4-19.4 %) y caolinita (16.1-21.4 %). Los resultados en conjunto con los análisis experimentales, permiten concluir que la empresa utiliza sedimentos naturales que pueden ser considerados como arcillas de buena a mediana calidad plástica para preparar sus productos de mampostería para la construcción.

Se halló presencia significativa de sílice libre ya que en el pico de intensidad del cuarzo y la relación molar $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ es baja.

Según los resultados del análisis químico por fluorescencia, mostrando un contenido de K_2O en las muestras alcanzando un valor de 2.926 y 3.301 %, hecho que sugiere la existencia de micáceos en proporciones relativamente elevadas pero la existencia de otros minerales en capas no puede ser descartada. El Fe_2O_3 contenido indica la presencia de óxidos de hierro y el bajo contenido de óxidos alcalinos como el sodio y el potasio que dan la posibilidad a la arcilla de generar la fase de vidrio a temperaturas relativamente altas teniendo en cuenta el difractograma.

4.7 Caracterización térmica

Esta prueba se llevó a cabo para dar con las posibles variaciones en cuanto a dimensiones y características morfológicas de la arcilla, bajo el análisis termogravimétrico (ATG), y análisis térmico diferencial (ATD) mediante una termobalanza Q600 de alta sensibilidad, en los laboratorios de la Universidad de Pamplona.

4.7.1 Análisis térmico diferencial (ATD)

Este análisis mide la diferencia de temperatura entre la muestra y el material de referencia de la temperatura alcanzada en cada instante. Las medidas se pueden realizar en condiciones ambientales o bajo una atmósfera controlada, lo importante es determinar los efectos endotérmicos y exotérmicos que acompañan a las reacciones de la muestra en la cocción (Douglas, Skoog, Holler y Timothy, 2001; Sáenz, 2014; Rendón, 2009).

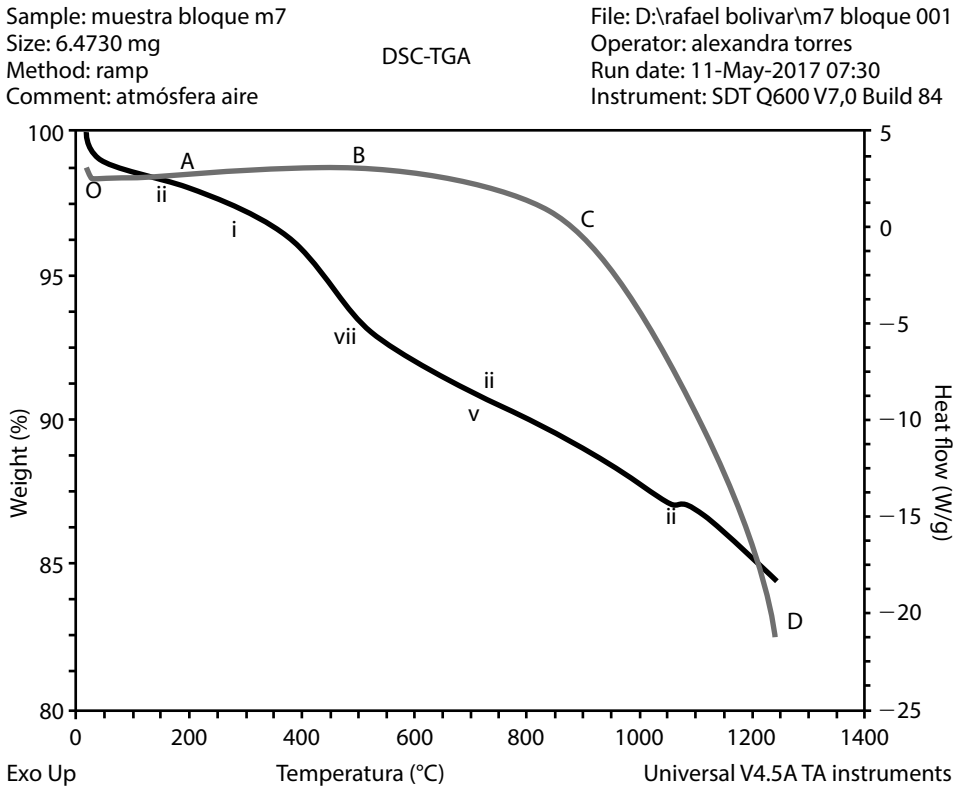
4.7.2 Análisis termogravimétrico (ATG)

Es una técnica en la que la masa de la muestra se controla con una temperatura programada. Su función es determinar la pérdida de peso de las muestras que son generadas en la etapa de cocción, es decir, la descomposición térmica de los materiales. Este análisis se complementa con los análisis obtenidos en el ATD (Ramírez, 2012; Flórez, 2015; Cely y Bolívar, 2015).

Los análisis se realizaron sobre una muestra en polvo de las mezclas M7, en un rango de temperatura entre 20 y 1,200 °C y en presencia de una atmósfera controlada de oxígeno, en un ciclo térmico de 5 °C/min. Las curvas ARD y ATG obtenidas permitieron observar los picos endotérmicos y exotérmicos acompañadas de las pérdidas de peso que sufre el material. Todo realizado con el *software Data Analysis* que posee el equipo para el ensayo (García, Flórez y Espinel, 2017).

La **figura 49** muestra las curvas antes mencionadas y la **tabla 41** describe el comportamiento de las curvas ATD (azul) y ATG (verde), donde se podría presentar la mezcla M7 durante el proceso de cocción de los productos de mampostería para la construcción.

Figura 49. Termograma de los análisis térmicos de atd y atg para la mezcla M7



Fuente: elaboración propia.

Tabla 41. Análisis de las gráficas ATD y ATG para la mezcla M7

Temperatura °C	Curva	
	ATD (azul)	ATG (verde)
0-50	Cambio endotérmico, asociado a procesos de desorción o secado. Entre los puntos O-A	Pérdida de peso del 1.25 % relacionada con la pérdida de agua higroscópica libre, o la humedad residual de la muestra. Se presenta una curva característica tipo II.
50-200	Entre los puntos O-A se aprecia una ligera estabilización, debido a que no se generan reacciones químicas.	Se presenta una pérdida de masa de 1.30 %, producto de la evaporación de agua ligada a las estructuras de las muestras.
200-450	Entre los puntos A-B se produjo una reacción exotérmica. Por la disociación oxidante de los hidróxidos de hierro (Fe_2O_3).	Se presenta una pérdida de masa de 3.5 %. Entre los 250 °C aparece la curva característica tipo I relacionada con la presencia de montmorillonita (desorción de agua).
400-650	Entre los puntos B-C, se observa una reacción exotérmica relacionada con la transformación alotrópica del cuarzo α a β , común a temperaturas de 573 °C.	Se presenta la expulsión del agua cristalizada, como también la curva característica tipo VII, con una pérdida de peso del 3.75 %.
600-1050	En el punto C a los 950 °C aproximadamente se presenta la reacción endotérmica. Este efecto podría corresponder a la deshidroxilación (dilución de los gases combustibles por el agua formada) de la arcilla que se prolongaría hasta la temperatura de fusión.	La curva presenta un descenso gradual y progresivo, con curvas características de tipo II y V, con una pérdida de peso del 5 %, en donde se pudo haber presentado la liberación de CO_2 .
1050-1250	Entre los puntos C-D, se observa el descenso progresivo constante de la curva, probablemente resultado de que el material ya se haya fusionado y no se estabilice debido a que la fase encontrada para la muestra M7 está a los 1500 °C, que es donde se obtiene mullita (esta se comienza a formar a los 980 °C aproximadamente).	Se presenta una curva característica de tipo I, con una pérdida de peso del 4 %. En total se obtiene a esta temperatura una pérdida de peso del 17 %

Fuente: elaboración propia.

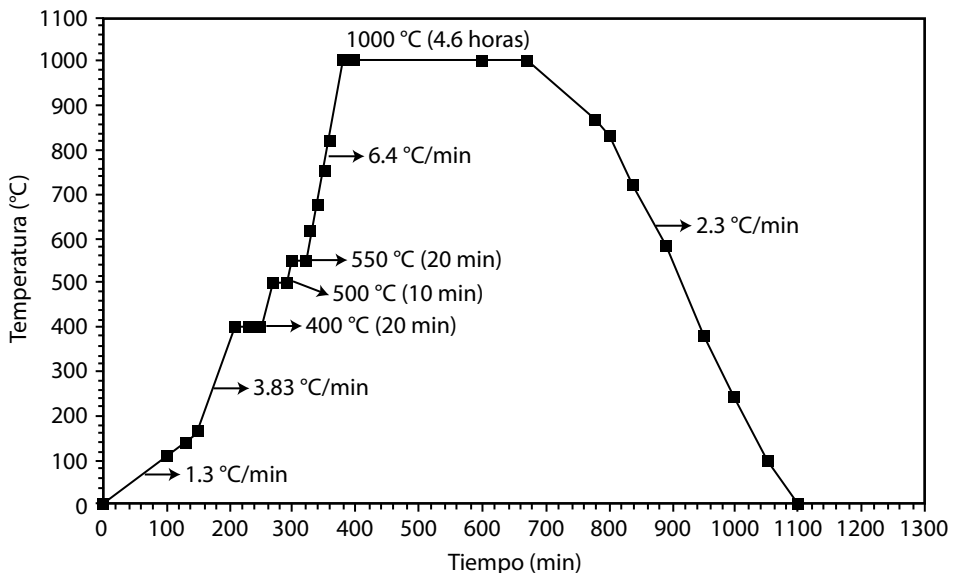
4.8 Caracterización de la gráfica de quema para las mezclas estudiadas

La optimización del proceso de cocción debe comenzar con el establecimiento de la curva ideal de temperatura y que esta evite las roturas de precalentamiento, cocción o enfriamiento en el bloque.

El bloque responde a las temperaturas de cocción deformándose elásticamente, pero tiene un límite, se puede sobrepasar si el calentamiento o enfriamiento son muy rápidos, la pieza queda sometida a tensión y se deforma. En otras ocasiones si dichas tensiones son superiores a la resistencia que el material es capaz de oponer a las mismas, se producirán grietas de cocción. Conociendo la resistencia y elasticidad de la pieza a cada temperatura de cocción, se podría establecer una velocidad de calentamiento óptima para el bloque. Actualmente las investigaciones sobre materiales cerámicos no poseen datos precisos sobre los valores apuntados acerca del comportamiento de las arcillas en todo su proceso productivo.

La **figura 50** muestra la curva óptima de cocción establecida de acuerdo a los resultados obtenidos bajo la caracterización tecnológica de la mezcla M7 propuesta.

Figura 50. Observación de la quema óptima del horno en estudio



Fuente: elaboración propia.

CAPÍTULO 5

DETERMINACIÓN DE LA MEZCLA ÓPTIMA ENCONTRADA EXPERIMENTALMENTE

En esta fase final del proyecto se compararon los resultados obtenidos anteriormente para establecer las mejoras pertinentes al proceso productivo actual, como también estimar la ventana del proceso productivo para obtener bloques con la calidad adecuada y acordes a las normas colombianas actuales vigentes.

5.1 Determinación de los resultados obtenidos

La **tabla 42** muestra los resultados de los análisis físicos cerámicos realizados en los laboratorios. El proceso fue comparar los resultados con los obtenidos en los ensayos destructivos, estudiando principalmente la resistencia mecánica y la absorción de agua.

Tabla 42. Relación de los resultados del laboratorio y la resistencia mecánica para las mezclas M7 y M8

Muestra	Absorción de agua (%)	Resistencia mecánica (kgf/cm ²)
	Máximo	Mínimo
Valor NTC	13.50	30.00
Mezcla 7	19.50	27.03
Mezcla 8	20.90	19.89
Producto actual	19.56	11.43

Fuente: elaboración propia.

Cabe resaltar que no se mejoró el producto en cuanto a absorción de agua debido al tamaño y la cantidad de partículas de arena en forma de esmectita. Se sugiere que la empresa realice un rediseño del triturador o haga inversión en la compra de un equipo más potente el cual logre tamaños de partículas de arenas inferiores a 1 milímetro para garantizar la mejora del producto final en cuanto a absorción de agua. Otra solución para mejorar la calidad de la mezcla es utilizar arcillas como las analizadas en las zonas cercanas, que poseen granulometría fina que mejoraría las propiedades de la pasta y por consiguiente reduce los desperdicios.

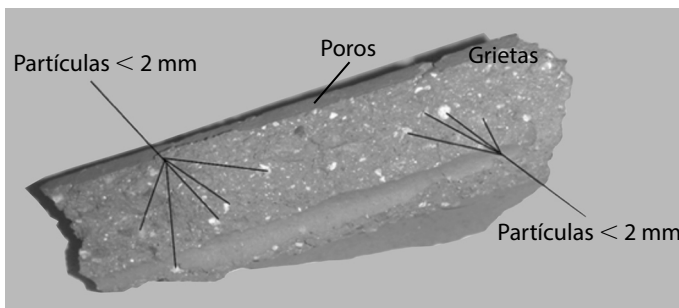
Comparando la mezclas óptimas encontradas (mezclas M7 y M8), la primera posee mejores características relacionadas con el bloque H-10, así que se seleccionó como la óptima para la materia prima. La M7 funciona en óptimas condiciones teniendo en cuenta la tecnología actual de la empresa, sin olvidar que el parámetro de temperatura de cocción es de 950 °C y la composición mineralógica es la ideal, obtenida desde hidrometría, encajando perfectamente para las condiciones de la zona 2 del diagrama de Winkler.

Cabe recordar que los análisis arrojaron que se debe mejorar el proceso de triturado para encontrar parámetros cercanos a los establecidos por la Norma técnica colombiana.

5.2 Evaluación de los resultados obtenidos

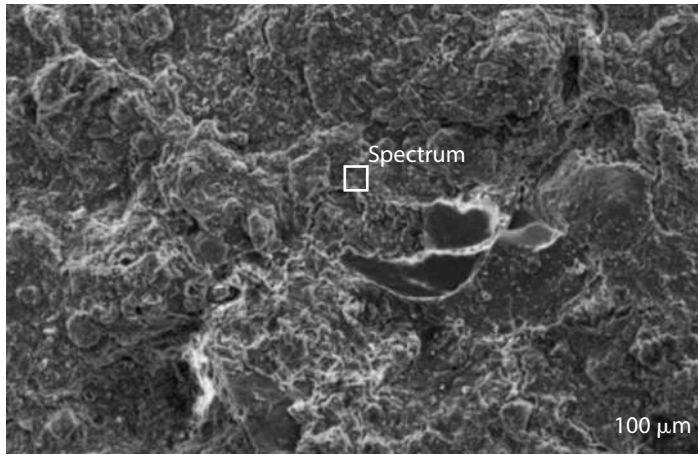
Teniendo en cuenta el análisis de la línea de producción y los resultados de los análisis tecnológicos, se determinó que el proceso presenta inconsistencias en cuanto al tamaño de las partículas que se conforman en el triturado y laminado, por lo que no se obtienen las dimensiones adecuadas menores 2 mm (véase en **figura 51**, **figura 52**, **figura 53**), por lo que se propuso cambiar el tipo de trituración o rediseñar el existente a base de martillos. Otra propuesta es hacerlo a base de bolas, con esto se obtendrían las características idóneas en cuanto al tamaño de las partículas de arena y así se lograría que las partículas se acoplen mejor en el laminado, mezclado y extruido, donde además en cocción las partículas conseguirán más rápidamente el punto de fusión.

Figura 51. a) Defectos de los bloques



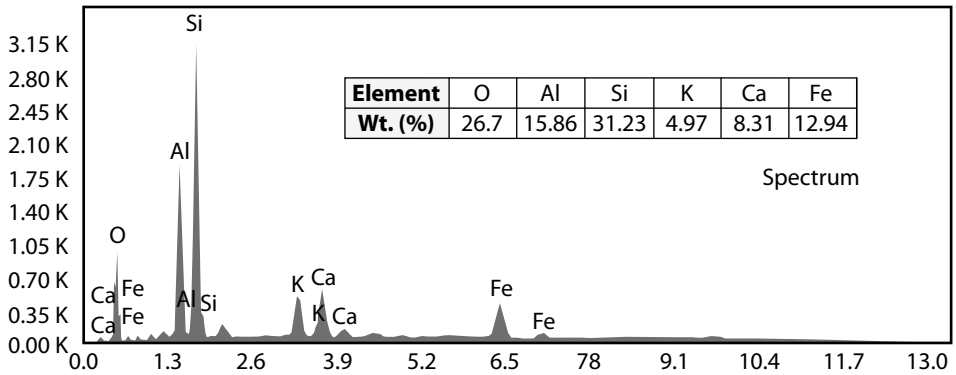
Fuente: elaboración propia.

Figura 52. b) Microestructura obtenida por SEM



Fuente: elaboración propia.

Figura 53. Elementos principales en la superficie obtenida por SEM-EDS



Fuente: elaboración propia.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, S. (2015). *Optimización del proceso de mezcla de arcilla para la producción de ladrillos, en el sector artesanal*. (Tesis para el título de Ingeniería Química). Universidad de Cuenca.
- Amado, J., Villafrades, P. y Tuta, E. (2011). Caracterización de arcillas y preparación de pastas cerámicas para la fabricación de tejas y ladrillos en la región de Bari-chara, Santander. *DYNA (Colombia)*, 78(167), 50–58. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-83155172913&partnerID=tZOtx3y1>
- Amariz, D. (2016). Influencia del hollín sobre la resistencia a la compresión de ladrillos cerámicos. *Inge Cuc*, 12(2), 97–102. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5763354.pdf>
- Andrade, L., Covelo, E. y Vega, F. (2005). Uso de Arcillas Especiales para Depuración de Aguas Residuales. *Información Tecnológica*, 16(1), 1–15. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642005000100002>
- ASTM D422-63. (2007). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. *ASTM International*, 1-63. <https://www.doi.org/10.1520/D0422-63R07E02>
- Augusto, C., García, M. y Vaca, M. (2013). Resistencia mecánica de ladrillos preparados con mezclas de arcilla y lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales. *Tecnura*, 17(38), 68–81. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2013.4.a05>

- Bañón, L. (2012). *Manual de carreteras*, (Tomo 2). Ortiz e Hijos, Contratista de Obras, S.A.
- Barranzuela, J. (2014). *Proceso productivo de los ladrillos de arcilla producidos en la Región Piura*. (Tesis para el título de Ingeniería civil). Universidad de Piura.
- Blanco, F. (2011). Cerámicos lección 6. Universidad de Oviedo. *Plasticidad*. Universidad de Oviedo (pp. 1–11).
- Blanco, F. (2011). Cerámicos lección 7. Universidad de Oviedo. *Cocción*. In Universidad de Oviedo (pp. 1–26).
- Braja, M. (2001). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. Cengage Learning.
- Cely, L. (2012). *Comportamiento térmico y mecánico de una arcilla de la región de Norte de Santander*. Universidad Francisco de Paula Santander.
- Cely, L. y Bolívar, R. (2015). Materia prima para la industria cerámica de Norte de Santander II. *Respuestas*, 20(1), 84–94. <https://doi.org/10.22463/0122820X.260>
- Cisternas, L. (2009). *Diagramas de fases y su aplicación*. Editorial Reverté.
- Crespo, M., García, R. y Afanador, N. (2020). Caracterización tecnológica de una arcilla utilizada en la fabricación de productos de mampostería para la construcción. *Respuestas*, 25(2), 43-43. <https://doi.org/10.22463/0122820X.2327>
- Díaz, L. y Torrecillas, R. (2002). Arcillas cerámicas: Una revisión de sus distintos tipos, significados y aplicaciones. *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 41(5), 459-470. <https://digital.csic.es/handle/10261/4676>
- Díaz, E. (2018). *Diagnóstico del cumplimiento de la calidad de los bloques H-10 fabricados por la ladrillera Hora limitada en Ocaña Norte de Santander*. (Tesis de pregrado en Ingeniería Mecánica). Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña.
- Douglas, A., Skoog, F., Holler, J. y Timothy A. (2001). *Principios de análisis instrumental* (5a edición). McGraw-Hill.
- Duitama, L., Espitia, C., Mojica, J., Quintero, J. y Romero, F. (2004). Composición mineralógica y química de las arcillas empleadas para cerámica roja en las zonas de Medellín. *Revista Académica Colombiana de Ciencia*, 34(109), 555-564.
- Ecocarbon. (1995). *Muestreo y análisis*. (Número 1). Ecocarbon.
- Espinel, E., Flórez, E. y García, R. (2020). Caracterización físico-química de un material arcilloso proveniente de la región nororiental de Colombia, para la fabricación de bloques H-10. *Respuestas*, 25(4), 20-28.

- Flórez Arenas, A. (2016). *Caracterización de arcillas y preparación de pastas cerámicas para la fabricación de ladrillos en la ladrillera Mariscal Robledo S.A.* Universidad Tecnológica de Pereira. <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/handle/11059/6338>
- García, R., Acevedo, C. y Rojas, J. (2019). *Metodología para la fabricación del bloque H-10 para la industria cerámica del Norte de Santander.* ECOE Ediciones.
- García, R., Acosta, M. y Flórez, E. (2015). Análisis del comportamiento de los frenos de disco de los vehículos a partir de la aceleración del proceso de corrosión. *Tecnura*, 19(45), 53–63. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.3.a04>
- García, R. y Bolívar, R. (2017). Caracterización hidrométrica de las arcillas utilizadas en la fabricación de productos cerámicos en Ocaña, Norte de Santander. *INGE CUC*, 13(1), 53–60. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.17981/ingecuc.13.1.2017.05>
- García, A., Bolívar, R. y Flórez, E. (2016). Validación de las propiedades físico-mecánicas de Bloques H-10 fabricados en Ocaña Norte de Santander y la región. *Ingenio UFPSO*, 10(2011– 642X), 17-26.
- García, R., Flórez, E. y Acevedo, C. (2018). Clay surface characteristics using atomic force microscopy. *Revista Facultad de Ingeniería*, 87(1), 23-34. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.n87a04>
- García, R., Flórez, E., y Acevedo, C. (2018). Physical-ceramic characterization of clays used in the manufacture of masonry products for construction. *Respuestas*, 23(2), 12-21. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7071455>
- García, R., Flórez, E., y Espinel, E. (2017). Conductividad térmica de polvos de arcillas utilizadas en la industria cerámica en Ocaña Norte de Santander y la región. *Ingenio UFPSO*, 13(1), 29-37.
- García, R., Flórez, E. y Rodríguez, M. (2019). Application of the procedure of the iso 50001:2011 standard for energy planning in a company ceramic sector. *DYNA*, 86(209), 120-126.
- García, R., Flórez, E. y Acosta, M. (2015). Análisis estructural de una máquina prensadora para producción de ladrillo macizo para las pequeñas industrias artesanales de materiales cerámicos en Ocaña Norte de Santander y en la región. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 1(25), 104-109.
- García, R. y Flórez, E. (2016). Determinación de la ventana del proceso productivo en la fabricación de bloques H-10 en Ocaña Norte de Santander y la región. *Ingenio UFPSO*, 9(2011–642X), 35-43.
- García, R., Gómez, J. y Jaramillo, H. (2020). Physical, chemical and thermal characterization of a Colombian clay. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, 20(5), 225-234. http://ijens.org/Vol_20_I_05/203905-4646-IJMME-IJENS.pdf

- García, E. y Suárez, M. (2004). *Las arcillas (propiedades y usos)*. Universidad de Castilla-La Mancha. https://previa.uclm.es/_users/higueras/yymm/Arcillas.htm
- Gines, F., Feliu, C. y García, J. (1997). Análisis de los métodos tradicionales utilizados para evaluar la plasticidad. *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica Y Vidrio*, 36(1), 25–30. <http://boletines.secv.es/upload/199736025.pdf>
- Gutiérrez, H. y De La Vara Salazar, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. Mc Graw Hill.
- Holtz, R. y Kovacs, W. (1987). *An introduction to geotechnical engineering*. Prentice Hall.
- ICONTEC. (1979). *Suelos. Ensayo para determinar la granulometría por tamizado*. (NTC 1522). ICONTEC.
- ICONTEC. (1998). *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*. (NTC 4321-3). ICONTEC.
- ICONTEC. (1998). *Ingeniería Civil y Arquitectura. Baldosas Cerámicas. Método de ensayo para determinar la resistencia a la abrasión profunda en baldosas cerámicas no esmaltadas*. (NTC 4321-6). ICONTEC.
- ICONTEC. (2005). *Métodos para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla. Norma Técnica Colombiana*. (NTC-4017). ICONTEC.
- Illera, L., Illera, C. y Contreras, K. (2015). Raw material for the ceramic industry in Norte de Santander. III. Assessment of the technological properties when the residue test of deep abrasion is added. *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 54(2), 77-83. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2015.03.005>
- INVE-123. (1998). Análisis granulométrico de suelos por tamizado. *Erosión*, <http://www.erosion.com.co/presentaciones/category/23-normas-de-ensayo-de-materiales-para-carreteras.html?download=261:889-e-123>
- INVE-124. (2013). Análisis granulométrico por medio de Hidrómetro, *Erosión*, <http://www.erosion.com.co/presentaciones/category/23-normas-de-ensayo-de-materiales-para-carreteras.html?download=262:890-e-124>
- Jácome, S. (2012). *Evaluación termodinámica del proceso de cocción y análisis de gases en hornos a cielo abierto y Hoffman en Ocaña*. Repositorio UFPSO.
- Marsigli, M. y Dondi, M. (1997). *Plasticità delle argille italiane per laterizi e previsione del loro comportamento in foggatura*. L'Industria di laterizi.
- Martínez, C. (2012). *Estadística y Muestreo*. ECOE Editores.

- Mendoza, H. y Bautista, G. (2002). *Diseño experimental*. Universidad Nacional de Colombia. <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ciencias/2000352/>
- Mintec Ceramic, L. (2015). *Resultados Caracterización Tecnológica de Materias Primas Honduras y Desarrollo de Nuevas Alternativas de Pastas de Producción*. <https://www.quiminet.com/shr/es/mintec-ceramic-8263151873.htm>
- Morales, J. (2005). *Tecnología de los Materiales Cerámicos*. Díaz de Santos.
- Morales, Y. y Niño Cáceres, Z. (2006). *Estudio de los efectos térmicos en velocidad y tiempo durante la etapa de cocción de las arcillas en San José de Cúcuta para estudiar los requerimientos energéticos*. Universidad Industrial de Santander.
- Muñoz, R., Muñoz, J., Mancilla, P. y Rodríguez, J. (2007). Caracterización fisicoquímica de arcillas del municipio de Guapi, Costa Pacífica Caucana (Colombia). *Química*, 31 (121), 537-544.
- Navarro, D., Góngora, E., Rodríguez, A. y Martínez, O. (2004). Evaluación de mezclas de arcillas de la región de Centeno, Moa, Cuba. *Ingenierías*, VII (22), 45-54.
- Ortega Pérez, D. C., Bustamante Rúa, M. O., Gutiérrez Rôa, D. F., & Correa Espinal, A. A. (2015). Mixture experiments in industrial formulations Diseño de mezclas en formulaciones industriales. *DYNA (Colombia)*, 82(189), 149-156. <http://ingenierias.uanl.mx/22/evaluacion.PDF>
- Payares, C. (2014). *Estudio de la relación entre las propiedades físicas finales de los bloques cerámicos para mampostería y los perfiles de temperatura presentados en el horno durante su cocción en la ladrillera Ocaña*. Repositorio UFPSO.
- Peña, G. y Ortega, L. (2014). Caracterización morfológica y estructural de polvos de cenizas volantes. *I+D*, 14(2), 14-19. Dialnet- <http://CaracterizacionMorfologicaYEstructuralDePolvosDeCe-6096183.pdf>
- Perales, N. y Barrera, M. (2013). Análisis estructural por DRX de una arcilla natural colombiana modificada por polarización. *Revista de Investigaciones - Universidad Del Quindío*, 24(1), 100-106. http://blade1.uniquindio.edu.co/uniquindio/revistainvestigaciones/adjuntos/pdf/9ada_Art%2010.%20Galera.pdf
- Quintero, L. y Gallardo, R. (2015). Caracterización mineralógica de arcillas expansivas con fines de estabilización. *Ingenio UFPSO*, 8(1), 83-92. <https://doi.org/10.22463/2011642X.2050>
- Ramírez, R., Andrade, G., José, J., Juárez, S. y Carmen, M. (2002). Caracterización de arcillas del Estado de Guanajuato y su potencial aplicación en cerámica. *Acta Universitaria*, 12(1), 23-30. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=41612102>

- Ramírez, Y. (2012). *Determinación de las fases presentes en pisos y revestimientos cerámicos a base de arcilla cocidos a diferentes temperaturas y su influencia en las propiedades técnicas*. Universidad Nacional de Colombia.
- Rendón, C. (2009). *Uso de materias primas colombianas para el desarrollo de baldosas cerámicas con alto grado de gresificación*. (Tesis de maestría en Ingeniería - Materiales y Procesos). Universidad Nacional de Colombia.
- Rodríguez, G. (2009). *Desarrollo de cerámicos refractarios Sílico-Aluminosos a partir de arcillas caoliníticas de Barichara Santander*. (Tesis de pregrado en Ingeniería Metalúrgica). Universidad Industrial de Santander.
- Rodríguez, T. (2007). *Los minerales industriales en Castilla y León*. Junta de Castilla y León.
- Roquet, B. (2012). Métodos analíticos en geoquímica (DRX-FRX) y Pegmatitas, *XII Jornadas Argentinas de Tratamiento de Minerales*. San Luis, Argentina.
- Rozo, S., Sánchez, J. y Álvarez, D. (2014). Propiedades físico mecánicas de bloques H10 fabricados en el área metropolitana de Cúcuta. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 24(1), 67-78.
- Rozo, S., Sánchez, J. y Gelves Díaz, J. (2014). Evaluación de minerales aluminosilicatos de Norte de Santander para fabricar piezas cerámicas de gran formato. *Facultad de Ingeniería*, 24(38), 53-61. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-11292015000100005&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- Sáenz, H. (2014). *Caracterización fisicoquímica de ultrafinos de arcillas y su efecto sobre comportamiento reológico*. (Tesis de maestría en Ingeniería - Materiales y Procesos). Universidad Nacional de Colombia.
- Sánchez, J. y Álvarez Rozo, D. (2016). Evaluación de materias primas utilizadas en la fabricación de baldosas de gres en el sector cerámico de Norte de Santander (Colombia). *Respuestas*, 21(2), 48-56.
- Selmani, S., Essaidi, N., Gouny, F., Bouaziz, S., Joussein, E., Driss, A. y Rossignol, S. (2015). Physical-chemical characterization of Tunisian clays for the synthesis of geopolymers materials. *Journal of African Earth Sciences*, 103, 113-120. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2014.12.009>
- Śródon, J. (2006). Identification and Quantitative Analysis of Clay Minerals. *Developments in Clay Science*, 1(C), 765-787. [https://doi.org/10.1016/S1572-4352\(05\)01028-7](https://doi.org/10.1016/S1572-4352(05)01028-7)
- Statgraphics. (2006). Diseño de Experimentos - Diseños de Mezclas. *Statgraphics*. <https://www.statgraphics.net/tutoriales/>

-
- Swuisscontact. (2011). *Mejoramiento de la materia prima para la producción de ladrillos de calidad*. Swuisscontact.
- Vieira, C., Sánchez, R. y Monteiro, S. (2008). Characteristics of clays and properties of building ceramics in the state of Rio de Janeiro, Brazil. *Construction and Building Materials*, 22(5), 781-787. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.006>
- Zeballos, E., Melero, P., Trujillo, A., Mejía, M. y Ceroni, M. (2014). Estudio estructural de arcillas de Chulucanas por difracción de rayos-X y método de Rietveld. *Revista Materia*, 19(2), 159-170.

Este libro fue compuesto en caracteres Minion
a 11 puntos, impreso sobre papel Bond de 75
gramos y encuadernado con el método hot melt,
en diciembre del 2020, en Bogotá, Colombia.

DETERMINACIÓN DE LA MEZCLA ÓPTIMA DE ARCILLA DEL BLOQUE H-10 PARA LA INDUSTRIA CERÁMICA

Estudiar la materia prima utilizada en la fabricación de bloques H-10 es de gran importancia debido a que intervienen diferentes variables durante el proceso, una de ellas es la mezcla de arcilla que debe ser caracterizada en todos los aspectos tecnológicos para evitar defectos durante las etapas del proceso productivo. En el libro se propone un método para el análisis de materias primas utilizadas en la región nortesantandereana.

Este libro aborda, con lenguaje sencillo, cómo caracterizar física, química y térmicamente la materia prima de las empresas del sector cerámico para la fabricación de diferentes unidades de mampostería, principalmente bloques, tejas y ladrillos. Además, brinda herramientas, procedimientos y análisis de los cálculos necesarios para evaluar el comportamiento de cualquier tipo de arcilla durante las etapas del proceso productivo.

La obra está dirigida a estudiantes y profesionales de ingeniería mecánica, industrial, de materiales, metalúrgica, química, civil o interesados en el campo de la ingeniería de materiales y metalúrgica.

Incluye

- ▶ Metodología para la caracterización física, química y térmica de materia prima utilizada al fabricar bloques H-10 y unidades de mampostería de cerámica.
- ▶ Análisis de un caso práctico en una empresa para seleccionar una mezcla óptima.
- ▶ Resultados de la obtención de productos de mampostería a base arcilla.
- ▶ Fuentes bibliográficas de alto impacto nacional e internacional.

Ricardo Andrés García-León

Ingeniero Mecánico de la Universidad Francisco de Paula Santander, Magíster en Ingeniería Industrial de la Universidad de Pamplona. Candidato a Doctor en Ciencias en Ingeniería Mecánica del Instituto Politécnico Nacional en México, adscrito al Grupo Ingeniería de Superficies. Investigador Asociado de Colciencias y Coordinador de la línea de investigación Materiales, Procesos Industriales, Diseño Mecánico y Tribología en el Grupo de Investigación INGAP de la Facultad de Ingenierías de la Universidad Francisco de Paula Santander.

Eder Flórez-Solano

Ingeniero Mecánico, Magíster en Ingeniería egresado de la Universidad Nacional Experimental de Táchira. Candidato a Doctor en Ingeniería de la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín. Docente del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Francisco de Paula Santander. Investigador Junior en el grupo INGAP de la Facultad de Ingenierías de la Universidad Francisco de Paula Santander.

Gustavo Guerrero-Gómez

Ingeniero Mecánico de la UFPS, Especialista en Práctica docente Universitaria de la Universidad Francisco de Paula Santander, Magíster en Sistemas Energéticos Avanzados de la UDES. Docente e Investigador del grupo GITYD de la Facultad de Ingenierías de la Universidad Francisco de Paula Santander.