

**DETERMINACIÓN DE LA MEZCLA ÓPTIMA DE ARCILLA PARA EL
MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DEL BLOQUE H-10 EN LA INDUSTRIA
CERÁMICA**

**Autor:
RICARDO ANDRÉS GARCÍA LEÓN**



**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**

PAMPLONA

19 de Julio 2017

**DETERMINACIÓN DE LA MEZCLA ÓPTIMA DE ARCILLA PARA EL
MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DEL BLOQUE H-10 EN LA INDUSTRIA
CERÁMICA**

**Autor:
RICARDO ANDRÉS GARCÍA LEÓN**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
MAGISTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**

Director: RAFAEL BOLÍVAR LEÓN
Dr(c).- M.Sc.- Ing.- Procesos metalúrgicos y reciclaje de metales.
Email: rbolivarl@unipamplona.edu.co

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**

To God for His perfect time
And all the angels
Which kept me firm in the purpose

Você vive em minha mente e em meu coração

AGRADECIMIENTOS

A mi jefe Eder Flórez Solano por su apoyo durante el proceso de formación como maestrante.

A la División de Investigación y Extensión de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.

A mi tutor por su paciencia y a los jurados por sus recomendaciones durante el desarrollo del proyecto de investigación.

A todos aquellos que fueron partícipes de alguna u otra manera muchas gracias.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. RESUMEN	13
2. INTRODUCCIÓN	14
3. JUSTIFICACIÓN	15
4. OBJETIVOS	16
4.1. Objetivo general.....	16
4.2. Objetivos específicos	16
5. ESTADO DE ARTE Y MARCO TEÓRICO	17
5.1. Antecedentes históricos a nivel mundial	17
5.2. Antecedentes históricos a nivel nacional	18
5.3. Marco teórico	19
5.3.1. Proceso de fabricación del bloque H-10.....	19
5.3.2. Diagramas ternarios.....	20
5.3.3. Clasificación de las arcillas.	21
5.4. Diseño de experimentos	24
5.4.1. Medición de los experimentos	24
5.4.2. Selección del diseño experimental	24
5.4.3. Diseño experimental de mezclas.....	25
6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	26
6.1. Tipo de estudio.....	26
6.2. Metodología	27
6.3. Población y muestra.....	27
6.3.1. Población	27
6.3.2. Muestra	27
7. ANÁLISIS DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN	30
7.1. Características de la industria cerámica.....	30
7.2. Ladrillera Hora Ltda.....	30
7.2.1. Descripción de las tapas del proceso.....	31
7.2.2. Evaluación del proceso productivo.....	54
8. EVALUACIÓN DEL PRODUCTO FINAL ACTUAL Y CARACTERIZACIÓN DE ARCILLAS.	56
8.1. Evaluación del producto final actual (Ensayos destructivos).....	56
8.1.1. Características morfológicas del bloque H-10.....	57
8.2. Caracterización de la materia prima (Ensayos no destructivos).....	69
8.2.1. Recolección de las muestras	70
8.2.2. Análisis tecnológicos.....	72

9. DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE LA MEZCLA ÓPTIMA.	88
9.1. Obtención de la mezcla a nivel laboratorio	88
9.2. Determinación de las mezclas óptimas con base a dos muestras de arcilla.	88
9.3. Determinación de las mezclas óptimas con base a tres muestras de arcilla.	90
9.4. Evaluación de los resultados obtenidos	93
9.5. Caracterización físico cerámica	93
9.5.1. Retenido sobre tamiz e hidrometría.	94
9.5.2. Conformado del material.	96
9.5.3. Contracción lineal	97
9.5.4. Absorción de Agua	99
9.5.5. Resistencia mecánica a la flexión en Cocción.	100
9.5.6. Curva de Bigot	102
9.6. Caracterización química y mineralógica	103
9.6.1. Fluorescencia de Rayos X (FRX)	103
9.6.2. Difracción de Rayos X (DRX)	110
9.6.3. Caracterización Térmica	118
9.6.4. Determinación de la curva ideal de cocción para las mezclas estudiadas	123
10. ANÁLISIS DE LA MEZCLA ÓPTIMA ENCONTRADA EXPERIMENTALMENTE.	126
10.1. Análisis de los resultados obtenidos	126
10.1.1. Evaluación de los resultados obtenidos.	127
11. CONCLUSIONES	128
12. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	131
13. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y ELECTRÓNICAS	132
14. ANEXOS	140

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Caracterización Química de Arcillas.....	23
Tabla 2. Composición Química del Carbón.	47
Tabla 3. Matriz factores actuales de la calidad del Bloque H-10.	55
Tabla 4. Muestras de Bloques H-10 recolectados en la ladrillera Ocaña.....	57
Tabla 5. Absorción inicial de agua.	59
Tabla 6. Resumen Estadístico para Absorción Inicial.	60
Tabla 7. Absorción final de agua.	60
Tabla 8. Resumen estadístico para absorción final.	61
Tabla 9. Resistencia mecánica a la compresión.....	62
Tabla 10. Resumen estadístico para el ancho.	64
Tabla 11. Resumen estadístico para el alto.	65
Tabla 12. Resumen estadístico para el largo.	66
Tabla 13. Resumen Estadístico para el Tabique.	67
Tabla 14. Resumen Estadístico para los Espesores.	68
Tabla 15. Resumen de los análisis físicos al producto terminado actual.	68
Tabla 16. Muestras de las vetas de arcillas recolectadas en la ladrillera Ocaña.....	70
Tabla 17. Muestras de las vetas de arcillas recolectadas en las zonas cercanas.....	71
Tabla 18. Tipo de ensayo y finalidad.	72
Tabla 19. Retenido sobre tamiz en malla ASTM 230. Datos ladrillera Ocaña.	76
Tabla 20. Retenido sobre Tamiz en malla ASTM 230. Datos de las fábricas artesanales de las zonas cercanas.	76
Tabla 21. Datos Hidrometría por granulometría. Datos UFPSO.....	78
Tabla 22. Promedios de hidrometría método de la empresa. Datos Hora Ltda.....	79
Tabla 23. Porcentajes (Arena-Limo-Arcilla) del diagrama del Winkler.....	79
Tabla 24. Región óptima para la fabricación de bloques.....	83
Tabla 25. Cálculo del Índice del tipo de suelo para todas las muestras.	85
Tabla 26. Diseño de dos mezclas de arcilla para dos muestras (M1 y M5).	89
Tabla 27. Diseño de tres mezclas de arcilla para tres muestras (M1, M2 y M5).	91
Tabla 28. Preparación de las muestras según lo obtenido en el diseño estadístico.	94
Tabla 29. Datos Hidrometría por Granulometría para las mezclas m7 y m8.	94
Tabla 30. Cálculo del índice del tipo de suelo para las mezclas m7 y m8.	95
Tabla 31. Condición de las mezclas para el conformado.	96
Tabla 32. Valores de contracción lineal para las probetas extruidas de la mezcla m7.	97
Tabla 33. Valores de contracción lineal para las probetas extruidas de la mezcla m8.	98
Tabla 34. Esfuerzo ultimo a flexión en función de la temperatura.	101
Tabla 35. Valores promedios de la curva de Bigot para las muestras seleccionadas.	103
Tabla 36. Fluorescencia de rayos X para las dos mezclas óptimas (m7 y m8).	104
Tabla 37. Fluorescencia de Rayos X para las tres muestras puras (M1, M2 y M5).	105
Tabla 38. Composición química de las mezclas m7 y m8, como también las muestras M1, M2 y M5.....	106
Tabla 39. Valores de $A=SiO_2$, $B=Fe_2O_3$ y $C=Al_2O_3$ para encontrar la temperatura de cocción.	107

Tabla 40. Valores de $A=SiO_2$, $B=K_2O$ y $C=Al_2O_3$ para encontrar la temperatura de cocción.	109
Tabla 41. Estructuras mineralógicas del análisis DRX, para la mezcla m7.	112
Tabla 42. Estructuras mineralógicas del análisis DRX, para mezcla m8.	113
Tabla 43. Estructuras mineralógicas del análisis DRX, para mezcla m7 antes de cocción.	114
Tabla 44. Estructuras mineralógicas del análisis DRX, para mezcla m7 después de cocción.	115
Tabla 45. Propiedades de los elementos.....	116
Tabla 46. Análisis de las gráficas ATD y ATG para la mezcla m7.	120
Tabla 47. Análisis de las gráficas ATD y ATG para la mezcla m8.	122
Tabla 48. Relación de los resultados del laboratorio y la resistencia mecánica para las mezclas m7 y m8.	126

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Esquema de fabricación del bloque.	19
Figura 2. Representación en el diagrama de fase de la composición química más idónea de la matriz casi-cerámica a partir de la mezcla mineral.	21
Figura 3. Metodología de la toma de muestras.	26
Figura 4. Proceso de análisis de laboratorio.	27
Figura 5. Muestreo por pilas.	28
Figura 6. Diagrama del proceso.	32
Figura 7. Diagrama entradas y salidas en la producción de bloques H-10.	32
Figura 8. Extracción de la arcilla de patio de almacenamiento.	33
Figura 9. Transporte de la materia prima.	33
Figura 10. Tolva de alimentación.	34
Figura 11. Salida del material.	34
Figura 12. Descripción del proceso de extracción.	35
Figura 13. Banda transportadora.	35
Figura 14. Descripción del proceso de Tolva - Transporte.	36
Figura 15. Desterronador.	36
Figura 16. Descripción del proceso de Destronación.	37
Figura 17. Desintegrador.	37
Figura 18. Descripción del proceso de Desintegración.	38
Figura 19. Molino Laminador I.	38
Figura 20. Salida del material del molino laminador.	39
Figura 21. Descripción del proceso de Laminación.	39
Figura 22. Amasadora I.	40
Figura 23. Molino laminador II.	40
Figura 24. Adición de Agua.	41
Figura 25. Descripción del proceso de Laminación.	41
Figura 26. Amasadora II.	42
Figura 27. Descripción del proceso de Amasado.	42
Figura 28. Extrusora.	43
Figura 29. Descripción del proceso de Extrusión.	43
Figura 30. Cortadora automática.	44
Figura 31. Descripción del proceso de Corte.	44
Figura 32. Patio de secado natural.	45
Figura 33. Descripción del proceso de Secado Natural.	45
Figura 34. Carro ventilador.	46
Figura 35. Descripción del proceso de Secado Artificial.	46
Figura 36. Molino de martillos.	47
Figura 37. Stoker.	48
Figura 38. Extractor.	48
Figura 39. Horno Hoffman.	49
Figura 40. Grafica de temperaturas alcanzadas por el Horno Hoffman de la empresa.	50
Figura 41. Control del proceso de cocción de cerámicos en un horno tipo Hoffman.	50

Figura 42. Carbojet.	51
Figura 43. Posición de los bloques dentro del horno.	52
Figura 44. Sellado de la puerta.	52
Figura 45. Bloque después de la cocción.	53
Figura 46. Descripción del proceso de Cocción.	53
Figura 47. Dimensiones del Bloque H-10 y medidas tomadas.	57
Figura 48. Análisis estadístico para Absorción Inicial.	59
Figura 49. Análisis estadístico para absorción final Vs número de muestras.	61
Figura 50. Resistencia mecánica a la compresión Vs número de muestras.	62
Figura 51. Grafica carga Vs Tiempo. Ensayo compresión.	63
Figura 52. Análisis estadístico para el ancho.	64
Figura 53. Análisis estadístico para el alto.	65
Figura 54. Análisis estadístico para el Largo.	66
Figura 55. Análisis estadístico para el Tabique.	67
Figura 56. Análisis estadístico para los Espesores.	68
Figura 57. Recolección de las muestras.	70
Figura 58. Homogenización, cuarteo y empaque de las muestras recolectadas.	72
Figura 59. Procedimiento de los análisis realizados.	73
Figura 60. Resultados Clasificación Granulométrica por tamizado para la todas las muestras.	75
Figura 61. Distribución granulométrica por Hidrometría para todas las muestras.	77
Figura 62. Grafica granulométrica de tamizado e hidrometría para la clasificación del suelo de todas las muestras.	78
Figura 63. Grafica de los puntos de hidrometría en el diagrama de Winkler.	80
Figura 64. Diagrama de Winkler para tipos de textura.	81
Figura 65. Diagrama de Winkler zonas para el tipo de producto.	81
Figura 66. Posible región óptima para la mezcla.	82
Figura 67. Plasticidad en el diagrama Casagrande para todas las muestras (M1, M2, M3, M4 y M5).	86
Figura 68. Diagrama de predicción de la extrusión y/o moldeo a través de los Límites de Atterberg	87
Figura 69. Representación gráfica de los resultados del diseño de experimentos para dos muestras (M1y M5).	89
Figura 70. Grafica de los puntos en el diagrama de Winkler para la mezcla de dos muestras (M1 y M5).	90
Figura 71. Representación gráfica de los resultados del diseño de experimentos para tres muestras (M1, M2 y M5).	91
Figura 72. Grafica de los puntos en el diagrama de Winkler para la mezcla de tres muestras (M1, M2 y M5).	92
Figura 73. Grafica granulométrica de Tamizado e Hidrometría de las mezclas m7 y m8.	94
Figura 74. Plasticidad en el diagrama Casagrande para las mezclas m7 y m8.	95
Figura 75. Diagrama de predicción de la extrusión y/o moldeo a través de los Límites de Atterberg.	96
Figura 76. Conformación de las probetas en el laboratorio.	97
Figura 77. Contracción al secado de las mezclas óptimas.	98

Figura 78. Contracción lineal en cocción vs temperatura.	99
Figura 79. Absorción de agua vs temperatura.	100
Figura 80. Resistencia Mecánica a la Flexión y a la carga de rotura.	101
Figura 81. Temperatura Vs Resistencia a la flexión.	102
Figura 82. Diagrama ternario FactSage SiO ₂ , Fe ₂ O ₃ y Al ₂ O ₃ , para las mezclas (m7 y m8) y las muestras (M1, M2 y M3).	107
Figura 83. Diagrama ternario FactSage 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).	108
Figura 84. Difractograma para la mezcla m7.	112
Figura 85. Difractograma para la mezcla m8.	113
Figura 86. Difractograma para la mezcla m7, antes de cocción.	115
Figura 87. Difractograma para la mezcla m7, luego de cocción.	116
Figura 88. Termograma de los análisis térmicos de ATD y ATG, para la mezcla m7 – muestra conformada.	119
Figura 89. Termograma de los análisis térmicos de ATD y ATG, para la mezcla m7 – muestra en polvo.	119
Figura 90. Termograma de los análisis térmicos de ATD y ATG, para la mezcla m8 – muestra conformada.	121
Figura 91. Termograma de los análisis térmicos de ATD y ATG, para la mezcla m8 – muestra en polvo.	121
Figura 92. Curva de quema óptima propuesta para el horno de la empresa.	124
Figura 93. Sección de bloque terminado con partículas de arena mayores a 2 mm.	127

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Procedimiento para la toma de muestras.	140
Anexo 2. Formato ubicación de la zona de muestreo.	141
Anexo 3. Formato de identificación de la muestra.	142
Anexo 4. Descripción de la empresa.	143
Anexo 5. Criterios de aceptación o rechazo.	144
Anexo 6. Plano Geológico y Morfodinámico de Ocaña.	145
Anexo 7. Clasificación USCS de los suelos.	146
Anexo 8. Clasificación según AASHTO.	147
Anexo 9. Distribución granulométrica por tamizado para todas las muestras.	148
Anexo 10. Distribución granulométrica por Hidrometría para todas las muestras.	149
Anexo 11. Lectura Hidrometría método de la empresa. Datos Hora Ltda.	150
Anexo 12. Lectura Hidrometría método de la empresa. Datos Zonas Cercanas.	151
Anexo 13. Resultados Hidrometría método de la empresa. Datos Hora Ltda.	152
Anexo 14. Resultados Hidrometría método de la empresa. Datos Zonas Cercanas.	153
Anexo 15. Resistencia a la flexión para la mezcla 7.	154
Anexo 16. Resistencia a la flexión para la mezcla 8.	155
Anexo 17. Valores de la curva de Bigot para la mezcla 7.	156
Anexo 18. Valores de la curva de Bigot para la mezcla 8.	157
Anexo 19. Principales tipos de curvas termogravimétricas.	158

1. RESUMEN

En el presente trabajo se realizó la caracterización física, química y térmica de las arcillas utilizadas en la ladrillera Hora Ltda, la cual se dedica a la fabricación de bloques H-10 en Ocaña, Norte de Santander.

Inicialmente se levantó un mapa de proceso de todas las etapas del proceso productivo del H-10, determinando las entradas, salidas y variables del proceso. Se mencionan los puntos críticos donde la empresa tiene la mayor probabilidad de obtener rechazos.

Se utilizó el diagrama de Winkler para identificar los tipos de arcillas existentes según su textura y el tipo de producto que se puede fabricar con la finalidad de formular una mezcla óptima a nivel laboratorio y a partir de las diferentes pruebas de laboratorio se determinó que los ladrillos producidos actualmente y las mezclas seleccionadas no cumplen con la resistencia mecánica y la absorción que la norma NTC4205 estipula.

Además, se identificaron los compuestos químicos/mineralógicos más importantes presentes en la mezcla y mediante diagramas de fases ternarios se determinaron las fases que podrían ser obtenidas en el proceso de cocción y las temperaturas necesarias para obtener dichas fases específicas.

Finalmente, se estableció una posible mezcla óptima para la fabricación de los bloques y se determinó la curva de cocción ideal.

2. INTRODUCCIÓN

Este proyecto respondió a la necesidad de mejorar la calidad del bloque H-10 según los requisitos y estándares de calidad nacionales basados en la norma NTC4017 en Ladrillera Hora Ltda. ubicada en el municipio de Ocaña - Norte de Santander. En donde se llevaron a cabo una serie de estudios y análisis, a través de la caracterización física, química y térmica de las arcillas utilizadas actualmente por la empresa con la finalidad de mejorar las características de la mezcla actual con la materia prima propia de la empresa, teniendo en cuenta los porcentajes adecuados de la composición de la pasta cerámica como lo son arenas, limos y arcillas. Para asegurar una validez estadística de las posibles mezclas, se utilizó el software Stargraphics Centurion.

Asimismo, se definieron las condiciones tecnológicas del proceso utilizado actualmente por la empresa, con el fin de determinar si son las adecuadas para la implementación de esta mezcla óptima propuesta o si era necesario un reajuste o cambio de la técnica o tecnología implementada, por lo cual se analizó la línea de producción del bloque en cada una de las etapas.

Se espera que un impacto futuro de este proyecto, sea que la empresa pueda mejorar la calidad del bloque actual con lo que evidentemente se mejorará su competitividad y productividad, y como consecuencia aportará al desarrollo productivo de la región.

En el capítulo 7, se llevó a cabo la evaluación de los principales factores que influyen en la calidad del proceso de fabricación de los bloques, en donde se determinó la ventana del proceso productivo actual con lo que se propuso una mejora en las etapas críticas.

Posteriormente en el capítulo 8, se realizó la evaluación del producto final actual acoplado con las especificaciones de las normas técnicas colombianas NTC 4017 y 4205 con la finalidad de verificar el porcentaje de cumplimiento. Asimismo, se procedió a realizar la caracterización física de las arcillas utilizadas por la empresa para determinar sus características más importantes que sirvieran como punto de partida para la formulación de una mezcla óptima.

Luego en el capítulo 9 se procedió a diseñar y caracterizar la mezcla óptima encontrada en donde se llevaron a cabo análisis completos de su comportamiento físico, químico y térmico, realizando diagramas ternarios para seleccionar una mezcla que obtuviera mejores propiedades a cocción.

Finalmente en el capítulo 10 se realizó la factibilidad técnica/económica para estimar la ventana del proceso con los resultados obtenidos en los análisis y evaluaciones del proceso productivo.

3. JUSTIFICACIÓN

Actualmente el proceso de fabricación de bloques H-10 en la Ladrillera Hora Ltda. en Ocaña Norte de Santander, no cumple con los estándares exigidos de calidad, se supone que este problema puede originarse en la etapa de mezclado, debido a que la mezcla producida podría no poseer la plasticidad apropiada por una distribución heterogénea de la relación arena, limo y arcilla [1][2][3], teniendo en cuenta que la materia prima después de extraída de la mina, se ubica en los patios de la empresa y posteriormente es utilizada en el proceso de mezclado sin tener en cuenta las proporciones y características óptimas de las arcillas para la mezcla.

Asimismo, la empresa tiene un porcentaje de desperdicios que supera el 8% de su producción diaria de 23500 bloques. Por no realizar seguimiento al proceso productivo en cuanto a las características y propiedades de la materia prima. A este hecho se le adiciona que el proceso de mezclado se realiza manualmente y sin alguna verificación técnica que permitan comprobar que la mezcla posee una óptima composición para continuar con las etapas de obtención del producto final.

Con la realización de este trabajo se propuso una mezcla óptima de arcilla a nivel de laboratorio para la producción del bloque H-10 que cumpla con los estándares de calidad exigidos para mejorar las propiedades del producto final y valorar si se puede procesar con la tecnología actual de la empresa.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Determinar la mezcla óptima de arcilla para el mejoramiento de la calidad del bloque H-10 en la ladrillera Hora Ltda en Ocaña Norte de Santander.

4.2. Objetivos específicos

4.2.1. Evaluar los principales factores actuales que influyen directamente en la calidad del proceso de fabricación del bloque H-10 en la Ladrillera Hora Ltda.

4.2.2. Caracterizar física, química y térmicamente las arcillas utilizadas por la empresa Ladrillera Hora Ltda con la finalidad de determinar sus propiedades y características más importantes.

4.2.3. Analizar la mezcla óptima encontrada experimentalmente con la finalidad de proponer un plan de mejoramiento comparando los resultados obtenidos en el laboratorio con el producto final actual teniendo en cuenta las normas NTC 4017 y 4205.

5. ESTADO DE ARTE Y MARCO TEÓRICO

5.1. Antecedentes históricos a nivel mundial

Actualmente los suelos están considerados como un mineral arcilloso, compuesto principalmente por una mezcla de aluminosilicatos y otros componentes cerámicos y orgánicos [4] [5]. Para caracterizar arcillas se pueden emplear los análisis tecnológicos como: Granulometría, límites de Atterberg, determinación composición química, fluorescencia y difracción de rayos X, análisis térmicos y gravimétricos diferenciales [6].

Respecto a las investigaciones más representativas relacionadas con este tema, en el noroeste de Túnez, realizaron ensayos mineralógicos, geoquímicos y físicos a las arcilla con el fin de determinar las propiedades de las muestras y de las fases cristalinas el contenido de CaO [7]. En el norte de Río de Janeiro, Brasil, se analizó las arcillas por difracción de rayos X (DRX), la composición química de distribución de tamaño de partícula, análisis térmico, el índice de plasticidad y otros ensayos físicos con la finalidad de tener en cuenta las propiedades de la arcilla [8]. Otras investigaciones relacionadas con los ensayos físicos, químicos, fisicoquímicos o tecnológicos para determinar la mezcla “ideal” en la producción de componentes cerámicos tradicionales en función de sus propiedades son [9][10][11][12][13] [14].

La estadística es una herramienta comúnmente usada en este tipo de investigaciones, por ejemplo en Camboya, dos depósitos de arcilla fueron utilizados para el desarrollo de formulaciones de azulejos (bloques) por medio del diseño estadístico de experimentos de mezclas y la adecuación de los modelos fueron confirmadas en laboratorio mediante análisis experimentales [15]. Coronado y Segadães, utilizaron el diseño de la mezcla de experimentos (M-DoE) para definir el número mínimo de mezclas necesarias para modelar y predecir las propiedades tecnológicas (absorción de agua, resistencia a la flexión, porosidad abierta, contracción de cocción lineal, pérdida de peso y densidad aparente) teniendo en cuenta las composiciones químicas y mineralógicas de las mezclas y los diagramas ternarios. Actualmente en el sector artesanal la mezcla de arcillas para la fabricación de ladrillos es de 60% de arcilla arenosa y 40% de arcilla plástica siendo esta mezcla una de las posibles causas de la mala calidad del bloque como por ejemplo: fisuras, mal cocción, color no uniforme, entre otros factores que afectan el producto terminado por una dosificación no adecuada [16] [17].

En la actualidad en el diseño de mezcla de experimentos, se deben evaluar los resultados de un primer lote de prueba como muestra, el cual se pueda usar como base o punto de partida para realizar ajustes de las proporciones y las mezclas de arcilla hasta que se alcancen las propiedades requeridas. Sin embargo, este método para la optimización del rendimiento de la cerámica tarda mucho tiempo y puede no ser capaz de revelar la composición óptima real. Es por esta razón, que existe una metodología de evaluación utilizando técnicas matemáticas y estadísticas específicas para el diseño de mezcla experimentos, en la cual se definen las propiedades deseadas y se establece una mezcla óptima empleando un número mínimo de experimentos, en donde se lleva a cabo el desarrollo de un método que implica

experimentos variando las proporciones de componentes de un producto a partir del análisis de los cambios en las propiedades [18][19].

En una investigación se utilizó el diseño de la mezcla, en donde se comprobaron las propiedades mineralógicas de baldosas de gres de porcelana, teniendo en cuenta las características del producto terminado [18].

5.2. Antecedentes históricos a nivel nacional

En un estudio realizado en el Guapi - Cauca, se determinó que era de gran interés caracterizar las arcillas física y químicamente para optimizar sus propiedades y potencializar su uso; con lo cual se pudo mejorar el efecto tecnológico, económico y social. En donde se utilizaron técnicas de caracterización como espectroscopia infrarroja (FTIR), difracción de rayos X (DRX), fluorescencia de rayos X (FRX), análisis térmicos (ATD/TG) y microscopia electrónica de transmisión (MET) [20] [21], además se definió su plasticidad, límites líquido y plástico, y peso específico del material arcilloso, lo que brinda una aproximación semi-cuantitativa [22] [23] [24] [25].

En otra investigación, tres arcillas provenientes de Barichara - Santander, fueron caracterizadas química, mineralógica, granulométrica, plástica y térmicamente, en donde obtuvo una composición específica de mezclas cerámicas aptas para la fabricación de bloques, ladrillos y tejas. En el desarrollo de la investigación se fabricaron probetas cerámicas por el método de prensado a nivel laboratorio para verificar las características de las muestras [26].

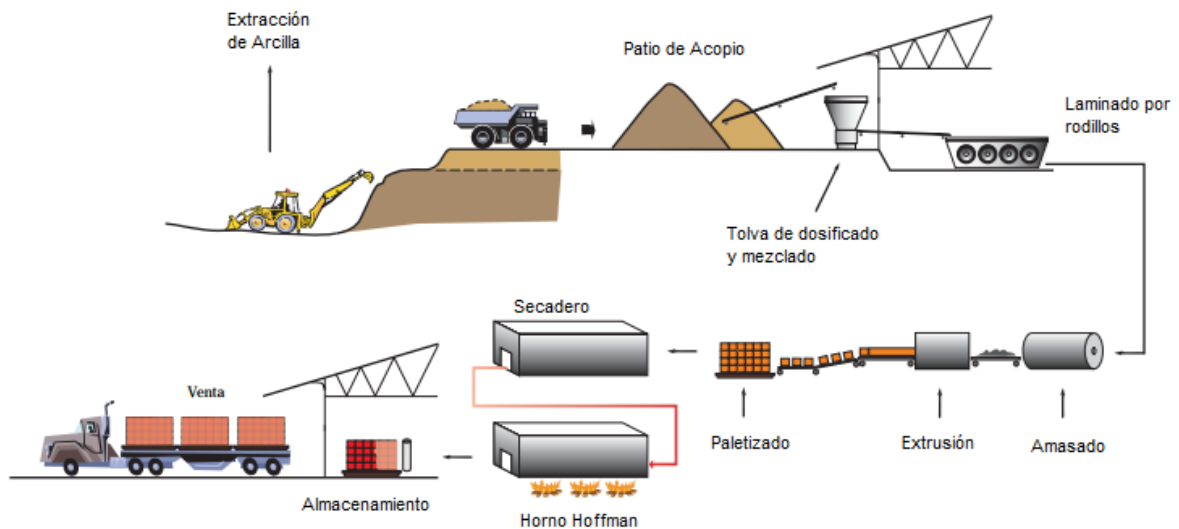
En Cúcuta y Ocaña, Norte de Santander se han realizado diferentes investigaciones con el fin de determinar una mezcla acertada a partir de diferentes arcillas y componentes como cenizas y residuos, que cumplieran con la calidad exigida de los productos finales. Para ello, las arcillas y posteriormente las mezclas se caracterizaron física y mecánicamente. El ajuste de las mezclas se realizó usando diseños de experimentos, variando los porcentajes de las arcillas con base en su composición química y mineralógica. Los parámetros de selección de las mezclas se basaron en análisis como porcentajes de absorción de agua, resistencias a la compresión y flexión apropiadas, entre otras [27] [28] las partículas con diámetro menor a 0,08 y 0,005 milímetros correspondientes a limo y las partículas con diámetro menor a 0,005 hasta 0 milímetros correspondientes a arcilla.

5.3. Marco teórico

5.3.1. 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. En la primera fase del proceso la preparación, 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. 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 disminuir la porosidad, aumentar la densidad y la resistencia mecánica (figura 1) [22] [29] [30].

Figura 1. Esquema de fabricación del bloque.



Fuente: [31]

En su mayoría las arcillas se utilizan como materias primas de la industria cerámica de la construcción, un 90 % de la producción se dedica, preferentemente a la fabricación de materiales de construcción y agregados. Sólo un 10 % se dedica a otras industrias (fabricación de papel, caucho, pinturas, absorbentes, decolorantes, arenas de moldeo, productos químicos y farmacéuticos, agricultura, etc.) [32] [9] [33].

Estos minerales, son muy usados a nivel de la construcción y otros procesos industriales, pueden ser clasificados atendiendo a multitud de parámetros; así, las minas que contienen minerales arcillosos en su composición pueden ser clasificados dependiendo de su mineralogía, su composición química, su origen geológico, sus propiedades físicas, su utilización industrial, su comportamiento geotécnico, entre otras clasificaciones, pero siendo las más común y la más conocida la clasificación mineralógica, entre las que podemos encontrar, según su estructura molecular, arcillas de tipo caolín, tipo illita y montmorillonita [34].

Colombia en estos momentos no es una gran potencia en fabricación industrial de productos a base de arcillas, sin importar que en los suelos exista una gran abundancia de arcillas óptimas. Para el caso de la región Norte de Santander existe gran variedad de yacimientos naturales que se pueden utilizar para fabricar productos de mampostería; pero a pesar de esto, es un departamento cuya exportación de materiales a base de arcilla no superan el 5,7% del total de las exportaciones a nivel regional, representando para la economía del departamento aproximadamente 13,7 millones de dólares a Julio de 2013, pero desde de 2014 a 2017 presenta un pronóstico de crecimiento negativo basado en la oferta hasta el 2019, siendo 2016 el año de mayor tasa negativa de crecimiento del -6,0; teniendo en cuenta estas cifras, en relación con materiales para la construcción, sólo se ve reflejada para el municipio de Cúcuta y su área metropolitana, pues es el único municipio de Norte de Santander que posee PYMES en lo referente a fabricación de materiales arcillosos [35] [36] [37].

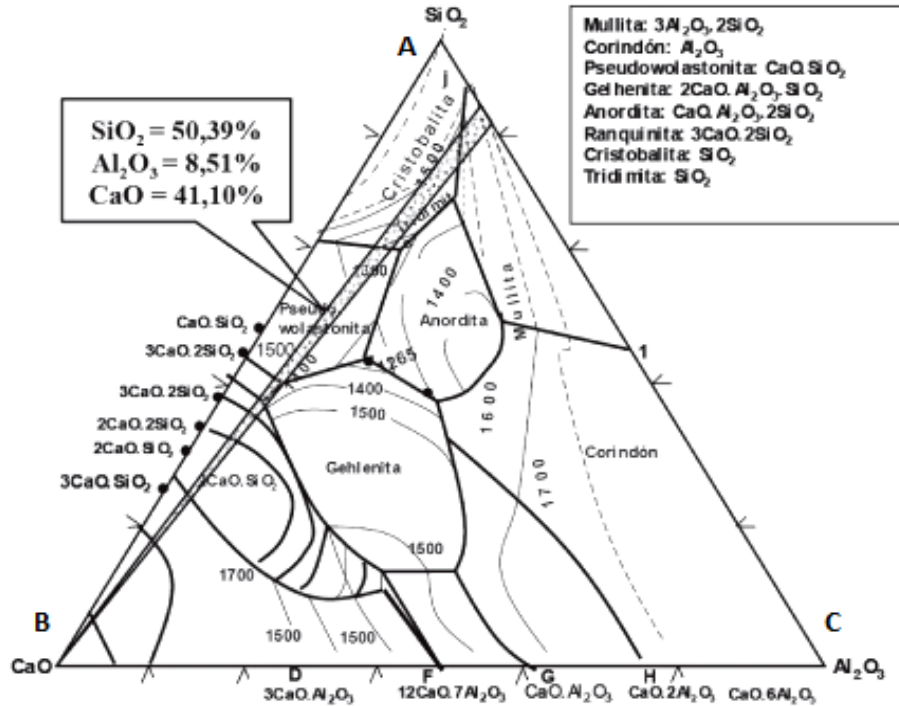
Una pasta cerámica puede definirse como una mezcla de arcillas y otras sustancias minerales terrosas, que se mezclan para lograr un producto con características deseadas. Generalmente, se utilizan tres componentes en la mezcla que son materiales plásticos, no plásticos e inertes. Los cuales están compuestos de arcilla, la cual aporta la plasticidad que facilita el moldeo y manejo del producto, como también la alúmina (Al_2O_3) que se utiliza como fundente y el sílice (SiO_2) que se utiliza como un material estabilizador [38][39]. Estas composiciones se determinan mediante la composición química la cual es la base de la clasificación modernas de los minerales y la aproximación de las mezclas con los diagramas ternarios teniendo en cuenta además los feldespatos $((K,Na,Ca,Ba,NH_4)(Si,Al)_4O_8)$ [40][41].

5.3.2. Diagramas ternarios

En los diagramas ternarios se grafican según su composición que es basada en tres componentes principales en porcentaje de peso 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(s) composición(s) presente(s) se puede diseñar u optimizar el proceso aplicado para obtener la fase deseada. Dichos diagramas tienen múltiples aplicaciones en el campo de la tecnología y la industria, además son el resultado de mucho trabajo experimental cuyos resultados se utilizan para la predicción del comportamiento de los sistemas respecto a sus fases en distintas condiciones [42].

Los porcentajes de un diagrama triangular o ternario van del 0 a 100% de contenido de cada mineral, como se puede observar en la siguiente figura 2:

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



Fuente: [43]

Actualmente existen programas de estadística que realizan los diagramas ternarios, uno de ellos es el software Triplot, el cual es un programa autónomo, gratuito y fácil de utilizar, el cual fue utilizado en el desarrollo de este trabajo.

5.3.3. Clasificación de las arcillas.

Debido a la gran variedad de las arcillas y sus diversas maneras de clasificarse, a continuación se enuncian algunas según sus propiedades características [32]:

5.3.3.1. Clasificación geológica

- **Arcillas residuales:** Son las formadas en el lugar de sus rocas madres y no han sido por tanto transportadas por el agua, el viento o el glaciar.
- **Arcillas coluviales:** Son aquellas que están acumuladas por el lavado de arcillas residuales. Pueden ser refractarias y no refractarias.
- **Arcillas transportadas o sedimentarias:** Son las que han sido desplazadas del lugar de las rocas madres originales.

5.3.3.2. Clasificación mineralógica

- **Arcillas caoliníticas:** Se forma por lo general de rocas silicoaluminosas, principalmente feldespáticas por acción de los agentes atmosféricos como agua y el anhídrido carbónico del aire. Su composición química es aproximadamente: *46.5% de SiO₂, 39.6% de Al₂O₃ 13.9% de H₂O*. Se caracterizan por la menor capacidad de absorción de agua. El caolín es la arcilla y la caolinita el silicato aluminio hidratado.
- **Arcillas illíticas:** Su composición química media es: *SiO₂: 55%, Al₂O₃: 27-29%, H₂O: 0.8 - 0.9%, K₂O: 0.2 - 0.8%*. Constituyen un grupo de arcillas caracterizadas por ser potásicas. El índice de plasticidad de los minerales de esta familia es menor que el de las montmorillonitas, pero su plasticidad aumenta a medida que disminuye el tamaño del grano; la presencia de potasio en la estructura de la Illita le comunica cierto poder fundente en el proceso cerámico.
- **Arcillas montmorilloníticas:** Su composición química es: *SiO₂: 48 - 56%, Al₂O₃: 11 - 22%, MgO: 0.3 - 0.8%, H₂O: 12 - 14%*. Caracterizadas por la presencia de complejos silicatos aluminicos y sílice. Son de color ocre o rojo y muy plásticos, por lo que absorben grandes cantidades de agua, caracterizados por su aumento de volumen encuentra elementos residuales en forma de hidróxidos de aluminio y hierro.

En una investigación desarrollada en la Universidad Industrial de Santander, caracterizaron químicamente los principales minerales que constituyen las arcillas cerámicas son los filosilicatos, pero los más importantes son la caolinita, illita, esmectita y clorita. Las estructuras de los minerales arcillosos, corresponden a una repetición de capas compuestas por dos unidades fundamentales, tetraedros (T) y octaedros (O), en donde los tetraedros están constituidos por lo general por un átomo de Si rodeado de cuatro átomos de O y los octaedros por un átomo de Al o Mg rodeado por átomos de O y/o OH [44][45]. La clasificación de los minerales arcillosos y algunas características se muestran en la siguiente tabla 1:

Tabla 1. Caracterización Química de Arcillas.

GRUPO	MINERALES	CARACTERÍSTICAS
Caolinita $Al_4(Si_4O_{10})OH_8$	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 ($> 1200^\circ C$) 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"> • Dioctaedricas 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 cocción hay una variación rápida de la porosidad y aumento brusco de la contracción.
Esmectita $(Na,Ca)_{0,3}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$	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 interlaminar que acepta 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 Cookeita 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: [44][45].

Las arcillas contienen cantidades variables de óxido férrico (Fe_2O_3), óxido de potasio (K_2O), óxido de sodio (Na_2O), alúmina (Al_2O_3), óxido de calcio (CaO) y otros elementos. Mineralógicamente, la mayoría de los minerales arcillosos no se encuentran puros (homolíticos), sino que están formados por mezclas de estos (heteropolíticos), en los cuales existe un mineral predominante.

Las arcillas contienen también algunos otros minerales que no son arcillosos, como sílice (SiO_2), que no presenta plasticidad por lo que es usada comúnmente como material desgrasante. El carbonato de calcio ($CaCO_3$), ejerce una acción fundente en las pastas cerámicas disminuyendo la temperatura de cocción. Los minerales de hierro dentro de los cuales los más comunes son Hematita, Magnetita, Goethita y Pirita, son los principales

responsables del color rojo de las arcillas. El yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), es una impureza que puede formar depósitos salinos en los ladrillos crudos, que fácilmente se transforman en manchas superficiales.

El cuarzo es un mineral duro muy común compuesto por sílice (SiO_2). En estado puro es incoloro (vítreo) con brillo cristalino y fractura en forma de coraza. Es resistente a la intemperie y por lo tanto es un componente importante de muchos depósitos de arena y grava. También es abundante en muchos colores claros de rocas ígneas y metamórficas. Existe una gran variedad de formas de cuarzo dentro de las cuales se encuentran: cristal de roca, cuarzo incoloro, transparente, presente en grietas de gneises, mármoles, drusas de pegmatitas y en grietas de filones de minerales metalíferos corrientemente en cristales bien definidos, por lo común de estructura romboédrica [46].

5.4. Diseño de experimentos

El diseño de experimentos consiste en planear y realizar un conjunto de pruebas con el objetivo de generar datos, los cuales al ser analizados estadísticamente, proporcionen evidencias matemáticas que permitan responder a los interrogantes planteados por en el problema de investigación existente en la empresa, que para este caso es la optimización de la mezcla de material cerámico existente.

5.4.1. Medición de los experimentos

El primer aspecto clave, es poder determinar las proporciones adecuadas de arcilla arenosa y arcilla plástica necesaria para la fabricación de los bloques H-10. La medición experimental la hemos realizado con pruebas de hidrometría, debido a que es el análisis que nos determina los porcentajes de Arenas, Limos y Arcillas con los que se determinan sus características en el diagrama de Winkler, para la fabricación de productos de mampostería para la construcción.

Con este procedimiento se espera obtener la mezcla óptima para la fabricación de un bloque de calidad adecuada basada en las normas técnicas colombianas, tomando las arcillas que utiliza la empresa.

5.4.2. Selección del diseño experimental

Para la selección del tipo adecuado de diseño experimental es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos [16]:

1. El objetivo del experimento.
2. El número de factores a estudiar.
3. El número de niveles que se prueban en cada factor.
4. Los efectos que interesa investigar (relación factores-respuesta).
5. El costo del experimento, tiempo y precisión dada.

El objetivo de este estudio experimental es conocer el efecto combinado de dos (2) y tres (3) variables, a través de análisis de hidrometría por tamizado e hidrometría, para seleccionar las muestras que contengan valores próximos a los óptimos encontrados en la literatura. Estas variables no actúan individualmente y están relacionadas mediante una función de proporcionalidad, por lo que un diseño factorial no es adecuado. Por tanto es necesario hacer referencia a la función, siendo el único diseño capaz de soportar estos efectos combinados un diseño de mezclas.

5.4.3. Diseño experimental de mezclas

Una mezcla está compuesta por dos o más componentes, teniendo en cuenta que la proporción de estos componentes no son independientes unos de otros. En este diseño experimental las proporciones de los componentes de la mezcla pueden ser considerados como factores. En el dominio experimental las respuestas al ser observadas o medidas están relacionadas con las proporciones de los componentes.

Existen cinco objetivos generales que se pretende conseguir al aplicar este diseño:

- 1.** Usar el modelo para ganar percepción de cómo y porque los componentes de la mezcla se comportan de una manera determinada.
- 2.** Usar el modelo para determinar la composición(es) de la mezcla en donde la respuesta está cerca de un máximo o un mínimo o un valor deseable. En este caso el modelo se usa como una herramienta predictiva.
- 3.** Usar el modelo para determinar la composición(es) de la mezcla en donde el efecto de mezclado presenta un valor mínimo de error.
- 4.** Usar el modelo para determinar la composición(es) de la mezcla en donde los efectos de variables externas incontrolables, tal como la temperatura y la humedad, son mínimos.
- 5.** A partir de la información obtenida, encontrar un modelo matemático que prediga el comportamiento del sistema y que sirva en un futuro para ensayos de optimización.

Una característica importante en diseño de mezclas es que los factores independientes o controlables (masa o porcentajes de arcillas), representan proporciones de la mezcla. Estas proporciones no deben ser negativas y se expresan como fracciones de la mezclas [47] [48] [49] [50] [51] [52].

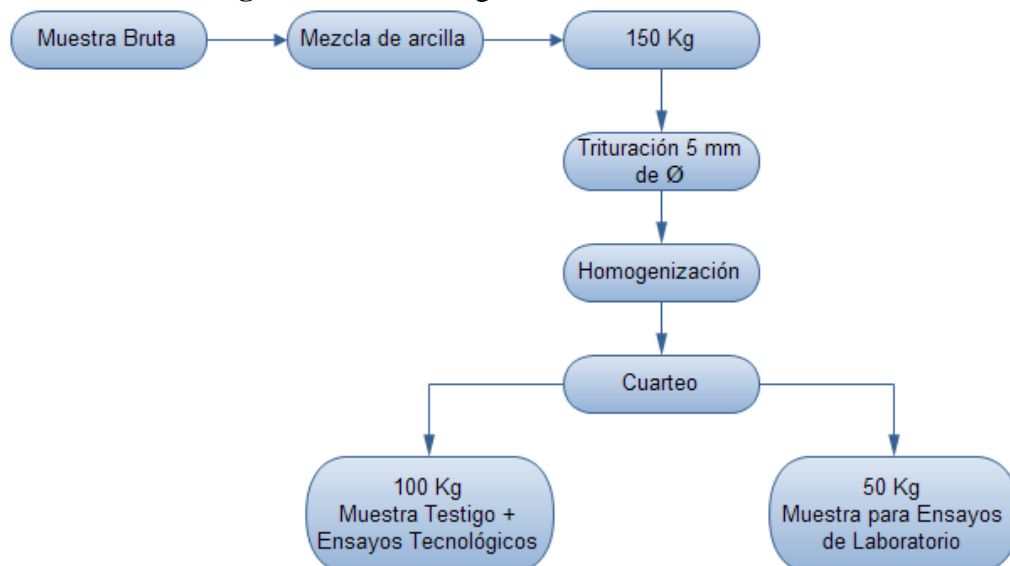
6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

6.1. Tipo de estudio

Para el desarrollo del proyecto se estableció una investigación mixta (Cualitativa – Cuantitativa) de carácter Experimental [53][54], debido a que se requirió caracterizar la arcilla bajo los diferentes métodos tecnológicos y comparar los resultados con las referencias bibliográficas estudiadas, adicionalmente las etapas del proceso productivo se definieron mediante las entrevistas realizadas al personal que trabaja en la empresa [55].

A continuación se puede observar la metodología aplicada para la toma de muestras (figura 3), teniendo en cuenta la población objeto de estudio:

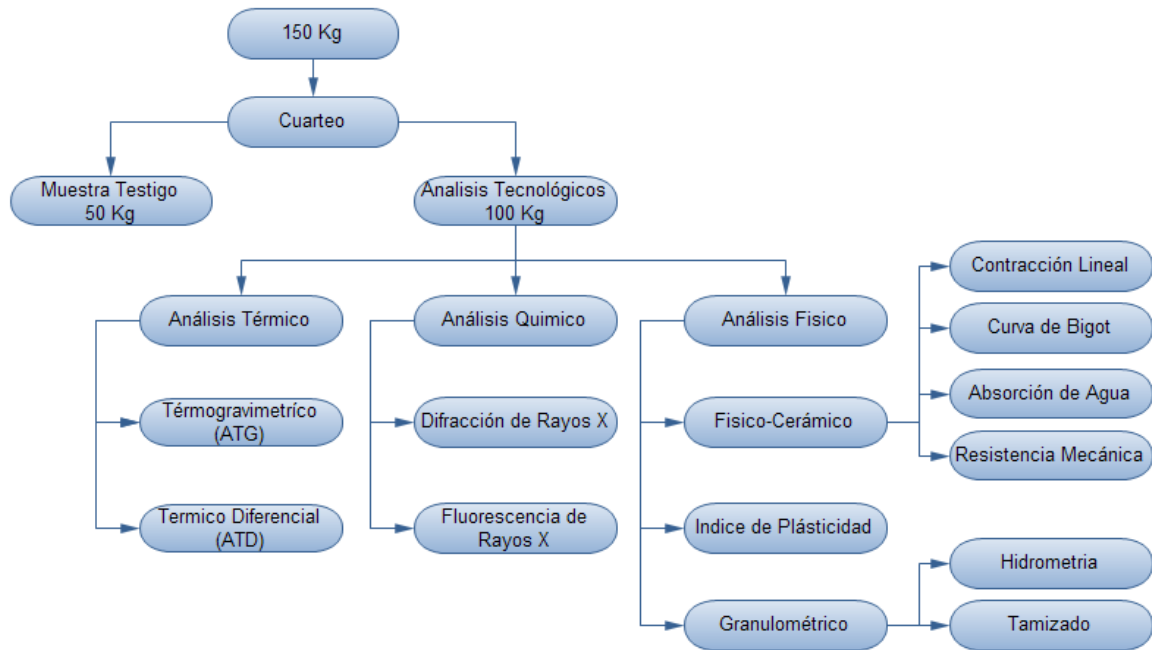
Figura 3. Metodología de la toma de muestras.



Fuente: Elaboración propia

En la siguiente figura 4, se 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:

Figura 4. Proceso de análisis de laboratorio.



Fuente: Elaboración propia

6.2. Metodología

6.3. Población y muestra

6.3.1. Población

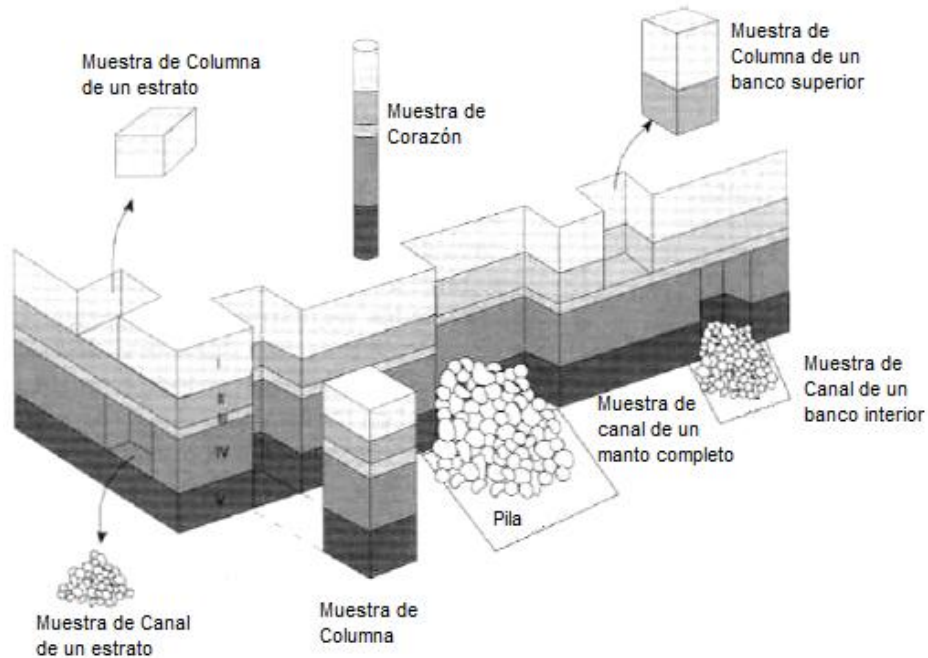
Corresponde a las pilas de materia prima del patio de acopio de la ladrillera Hora Ltda para la realización de la mezcla cerámica.

6.3.2. Muestra

El muestreo de pilas, se hace para obtener muestras voluminosas y representativas de arcillas trituradas, las cuales se toman desde una pila de almacenamiento, montaña o mina. Este muestreo puede consistir de varios tipos de arcillas.

Habiendo identificado las pilas, se procedió a realizar un muestreo tipo canal, con muestra de volumen de arcilla triturada que incluyen 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 observa en la siguiente figura 5:

Figura 5. Muestreo por pilas.



Fuente: [56].

La muestra tipo canal se obtuvo mediante un corte uniforme y continuo perpendicular a la pila, el procedimiento que se llevó a cabo se puede encontrar en los anexos 1, 2 y 3.

Con el fin de determinar la cantidad de muestra válida estadísticamente [57], se utilizó un muestreo probabilístico para poblaciones finitas, en donde cada pila tiene aproximadamente 4 toneladas, el cual se calculó a través de la siguiente expresión:

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

Dónde:

N= Total de la población = 40000 kilogramos = 40,0 toneladas

Z= Nivel de confianza, 1,96 para un nivel de seguridad del 95 %

p= Probabilidad de que el evento ocurra, variabilidad positiva (0,942)

q= Probabilidad de que el evento no ocurra, variabilidad negativa = 1 - p = (0,058)

E= Grado de precisión – margen de error, para este caso 0,065

De donde se obtiene el siguiente cálculo:

$$n = \frac{40000 * (1.96)^2 * 0.98 * 0.02}{(0.065)^2 * (40000 - 1) + (1.96)^2 * 0.98 * 0.02} = 49.61$$

≈ 50 Kilogramos por muestra

Luego se procedió a realizar el cálculo para poblaciones infinitas, se utiliza la siguiente expresión para calcular el número mínimo de kilogramos que serán tomados del centro de acopio:

$$n = \frac{Z_C^2 * p * q}{E^2}$$

$$n = \frac{(1.96)^2 * 0.942 * 0.058}{(0.065)^2} = 49.67 \approx 50 \text{ Kilogramos por muestra}$$

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

7. ANÁLISIS DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN

En el desarrollo de este capítulo, se evaluaron los principales factores que influyen directamente en la calidad del proceso de fabricación del bloque H-10 en la empresa, además se reportan y estudian los resultados de los análisis tecnológicos de las muestras de arcillas seleccionadas. Finalmente se establece una ventana del proceso productivo con una mezcla cerámica óptima teniendo la materia prima de la empresa.

7.1. Características de la industria cerámica

La cadena de valor de materiales de construcción tiene tres grandes divisiones: la explotación minera, la transformación de la arcilla y la comercialización del producto final. El proceso de transformación de la arcilla o también conocido como producción de materiales cerámicos tradicionales está compuesto en general de las siguientes etapas: condicionamiento de la materia prima, mezclado, trituración, humectación, compactación, extrusión, corte, secado, cocción y almacenamiento. Una de las etapas más importantes de este proceso es la cocción, que a su vez se divide en tres sub-etapas: precalentamiento, quema y enfriamiento.

De acuerdo a su capacidad de producción y desarrollo tecnológico las industrias ladrilleras se han clasificado en chircales, ladrilleras pequeñas, medianas y grandes [58], siendo la ladrillera Hora Ltda como una mediana empresa de producción de bloques H-10.

7.2. Ladrillera Hora Ltda

La ladrillera Hora Ltda más conocida como Ladrillera Ocaña, está ubicada en la zona rural en la vía a la Vereda la Rinconada de la ciudad de Ocaña en Norte de Santander con coordenadas ($8^{\circ}14'09.8''$ N, $73^{\circ}19'30.2''$ W). La empresa está dedicada principalmente la producción de Bloques H-10x30 y H-10x40, produciendo en su mayoría bloques H10x30 de 6 huecos perforados debido a que son los de más de demanda en la región. El combustible utilizado en la fabricación de los productos además de la arcilla y sus derivados, es el carbón mineral. La descripción de la empresa y su estructura organizacional se encuentra presente en el anexo 4.

Figura 1. Ubicación geográfica de la empresa.



Fuente: [59]

En el año 1999 se construyó el horno Hoffman de tiro inducido mediante un extractor de aire con capacidad de producir 25500 bloques H-10 diarios, aproximadamente 700,000 bloques mensuales. Dicho horno consta de un sistema con 24 recamaras, que poseen una capacidad de hasta 5 apiles (650 ladrillos por apile) por recamara con una separación de 60 centímetros entre apiles. Además, posee un secadero natural de 2586 m² y en el 2003 se construyó un secadero artificial para 6000 piezas diarias. La quema es realizada utilizando carbón mineral, donde cada ladrillo tiene un consumo promedio de 0,288 Kg de carbón [60] [61].

En el 2007 se cambió totalmente la línea de producción, se adquirieron equipos de mayor capacidad y de mejor tecnología con el objetivo de trabajar con altos estándares de calidad y eficiencia. Posteriormente se amplía el horno Hoffman 54 metros de longitud y en el 2009 se cambia las ramadas de zinc de los secaderos por plástico con la finalidad de que el proceso secado sea más rápido.

Entre el año 2010 y 2011, se adquirieron dos equipos de mayor capacidad en la línea de producción (un mezclador y molino laminador 800), los que brindan la posibilidad de mejorar la calidad del producto actual. Además se amplía a 18 metros el horno Hoffman quedando de 72 metros y se construye un nuevo secadero artificial con tecnología a base de ventiladores y un sistema continuo de transporte para acomodar los bloques, con lo que se reducen los tiempos de acomodación y además se minimiza el impacto ambiental.

El 25 de noviembre de 2015, la empresa logró certificarse en los Sistemas Integrados de Gestión (ISO 9001, OHSAS 18001 e ISO 14001) en su proceso de fabricación de productos derivados de la arcilla y productos de mampostería.

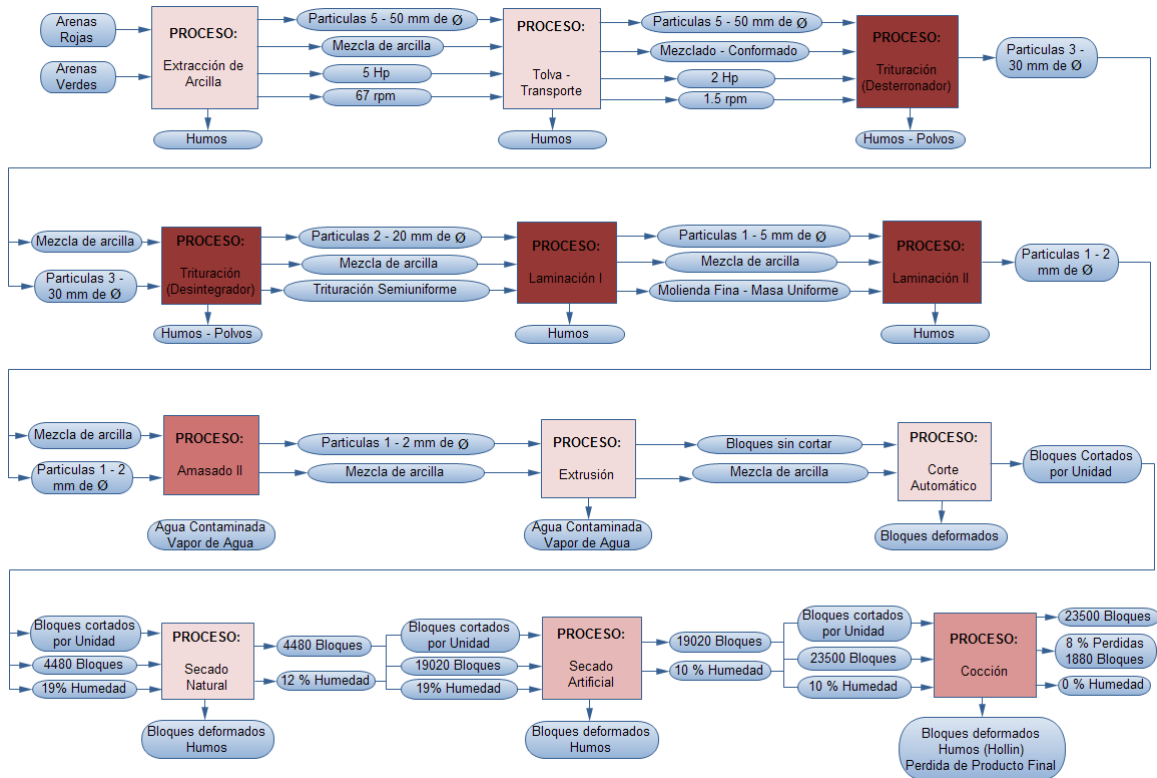
En junio de 2016, se inició la construcción de un nuevo sistema de secado forzado, con la finalidad de aprovechar los gases generados por el horno y aumentar la producción en un 30%, la cual sigue en fase de construcción.

7.2.1. Descripción de las tapas del proceso

A continuación se presenta una descripción detallada de los procesos realizados a la arcilla para la fabricación de los bloques en la empresa Hora Ltda [62] [63].

En la siguiente figura 6, se describe cada una de las etapas del proceso productivo que se realiza en la empresa, siendo las más importantes aquellas resaltadas en color oscuro.

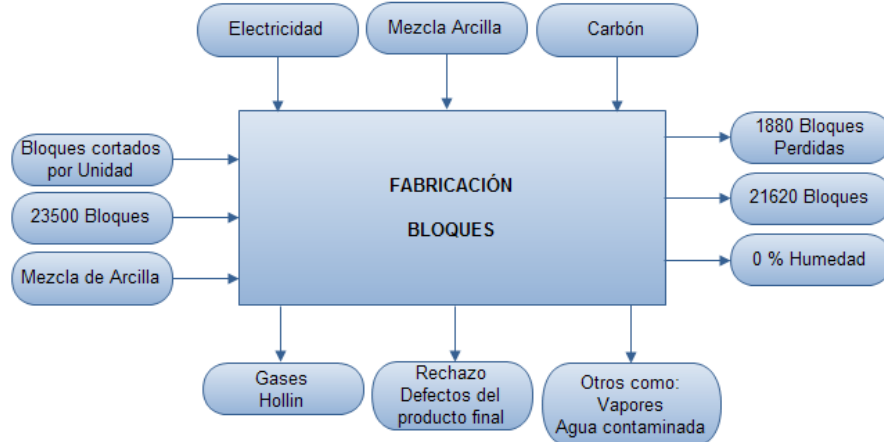
Figura 6. Diagrama del proceso.



Fuente: Elaboración propia.

La figura 7, describe de forma general las entradas, salidas y los desechos necesarios para la fabricación de un bloque en la empresa Hora Ltda.

Figura 7. Diagrama entradas y salidas en la producción de bloques H-10.



Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se describen en detalle cada una de las etapas del proceso productivo:

7.2.1.1. Extracción y preparación de la materia prima.

Mediante una retroexcavadora y un camión, se transporta la materia prima de la mina existente en los patios de la empresa hacia la tolva de alimentación (figura 8 y 9). Estas arcillas conocidas por los operarios como pilas de arcillas verdes y rojas son sometidas a un proceso de control antes de la combinación de las arcillas para asegurar que la mezcla resultante no sobrepase el 40% de arena. Esta etapa da inicio al proceso de reducción de la materia prima con la ayuda de la tolva y un operario que retira los terrones de gran tamaño. La materia prima es entonces enviada a las siguientes etapas del proceso por medio de bandas transportadoras (figuras 10 y 11), la descripción de los equipos utilizados se puede observar en la figura 12.

Figura 8. Extracción de la arcilla de patio de almacenamiento.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 9. Transporte de la materia prima.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 10. Tolva de alimentación.



Fuente: Elaboración propia.

La tolva de alimentación (figura 10), es capaz de sincronizar y dosificar de forma exacta la proporción de la mezcla de arcilla extraída de las pilas para continuar con el proceso, debido a que ajusta la altura y la velocidad de la cinta transportadora para obtener bloques uniformes y de excelente calidad.

En donde la materia prima se tritura hasta aproximadamente con partículas entre 5 y 50 milímetros.

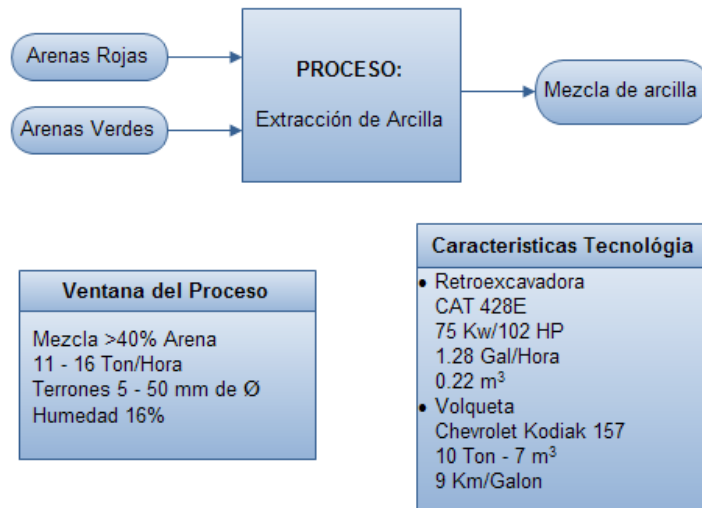
Figura 11. Salida del material.



Fuente: Elaboración propia.

La figura 12 describe de forma general las entradas y las salidas que se llevan a cabo cuando en el proceso de extracción de la materia prima, como también los detalles de los equipos utilizados.

Figura 12. Descripción del proceso de extracción.



Fuente: Elaboración propia.

7.2.1.2. Transporte de la materia prima

Para distribuir el material en todo el proceso productivo, se utiliza bandas transportadoras guiadas por rodillos. En donde se alcanza una producción entre 11 a 16 toneladas hora. Este mecanismo se caracteriza por el fácil mantenimiento de su estructura (figura 13).

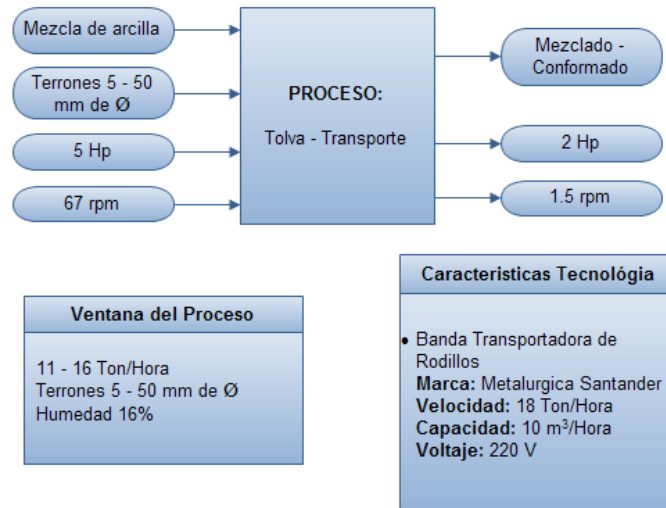
Figura 13. Banda transportadora.



Fuente: Elaboración propia.

La siguiente figura 14, describe de forma general las entradas y las salidas que se llevan a cabo en el proceso de transporte y paso por la tolva de la materia prima, como también el detalle de los equipos utilizados.

Figura 14. Descripción del proceso de Tolva - Transporte.



Fuente: Elaboración propia.

7.2.1.3. Trituración

El primer proceso que recibe la materia prima es realizado por una trituradora de cuchillas, que comúnmente es llamada el desterronador (figura 15), en donde se da inicio a la etapa de trituración de la materia prima, mediante cuchillas montadas sobre los dos ejes robustos paralelos que giran a diferentes velocidades. Gracias al movimiento giratorio de las cuchillas están se incrustan sobre el material y producen desgarre del mismo hasta reducir el tamaño del material aproximadamente entre 3 y 30 milímetros siendo la dimensión adecuada para seguir el proceso en el desintegrador.

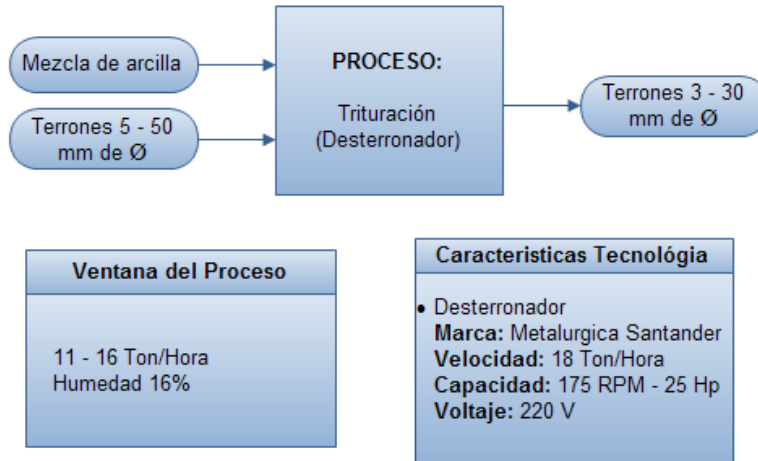
Figura 15. Desterronador.



Fuente: Elaboración propia.

La siguiente figura 16, describe de forma general las entradas y las salidas que se llevan a cabo en el proceso de trituración de la materia prima, como también los detalles de los equipos utilizados.

Figura 16. Descripción del proceso de Destronación.



Fuente: Elaboración propia.

7.2.1.4. Disminución del tamaño.

Luego de pasar el material por la trituradora de cuchillas, se transporta por bandas a la trituradora de martillos, comúnmente llamada desintegrador (figura 17). Este equipo transforma la arcilla en granulometrías entre 2 y 20 milímetros. La trituración es uniforme y facilita el trabajo de las máquinas en las siguientes etapas.

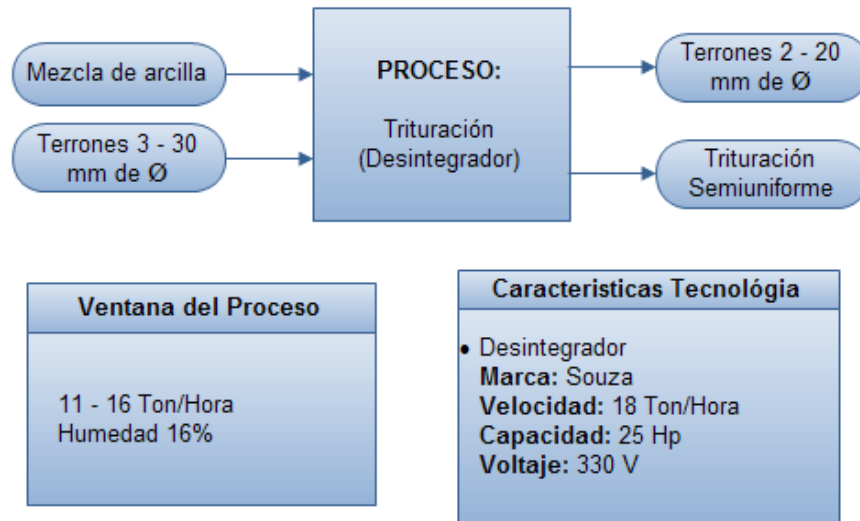
Figura 17. Desintegrador.



Fuente: Elaboración propia.

La siguiente figura 18, describe de forma general las entradas y las salidas que se llevan a cabo en el proceso de trituración de la materia prima en esta etapa, como también los detalles de los equipos utilizados.

Figura 18. Descripción del proceso de Desintegración.



Fuente: Elaboración propia.

7.2.1.5. Laminado primera etapa.

Seguidamente la materia prima se traslada al molino laminador I (figura 19), siendo de alta resistencia al desgaste y de laminación fina, y obtiene granulometrías entre 1 y 5 milímetros (figura 20). Gracias a su estructura compacta, hace que el proceso mantenga las condiciones adecuadas (humedad, homogenización, consistencia, tamaño de las partículas), además es poco ruidoso y produce poco desprendimiento de partículas pequeñas en el aire garantizando un mejor cuidado medioambiental. Produciendo una masa uniforme garantizar una mayor calidad del moldeo.

Figura 19. Molino Laminador I.



Fuente: Elaboración propia.

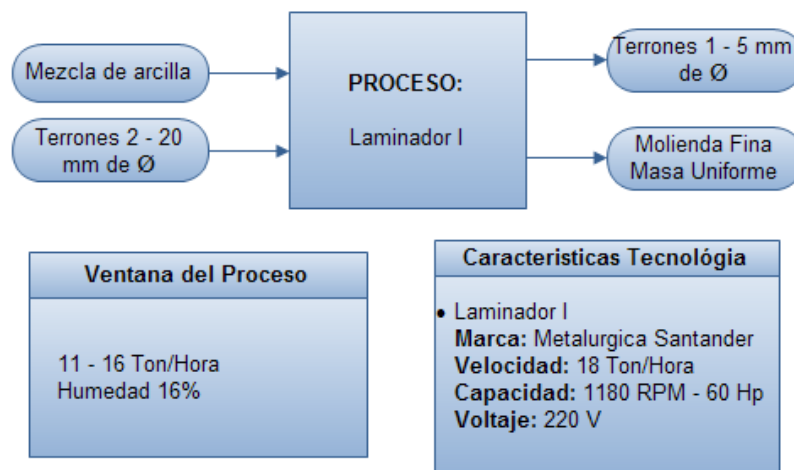
Figura 20. Salida del material del molino laminador.



Fuente: Elaboración propia.

La siguiente figura 21, describe de forma general las entradas y las salidas que se llevan a cabo en el proceso de laminación de la materia prima, como también los detalles de los equipos utilizados.

Figura 21. Descripción del proceso de Laminación.



Fuente: Elaboración propia.

7.2.1.6. Amasado primera etapa.

El material proveniente del laminado es amasado en la Amasadora I (figura 22). Este mezclador de tipo rodillos, tiene como finalidad la homogenización de la mezcla de arcilla. En esta etapa, dependiendo de la humedad del material procesado, se le adiciona una cantidad adicional de agua. En el 2015, la empresa realizó un análisis de costos de consumo de energía, lo cual arrojó que este equipo podría ser desactivado sin afectar la calidad del producto.

Figura 22. Amasadora I



Fuente: Elaboración propia.

7.2.1.7. Laminado segunda etapa.

Luego de salir la materia prima del Molino Laminador I, se transporta por banda al Laminador II (figura 23), en donde se realiza el mismo proceso de laminación y transporta la mezcla de una forma adecuada a la Amasadora II. En esta etapa del proceso, la arcilla llega con un porcentaje de 16% de humedad y sale con un 19% debido a que durante el proceso se adiciona agua. La granulometría obtenida es de 1 y 2 milímetros (figura 24).

Figura 23. Molino laminador II.



Fuente: Elaboración propia.

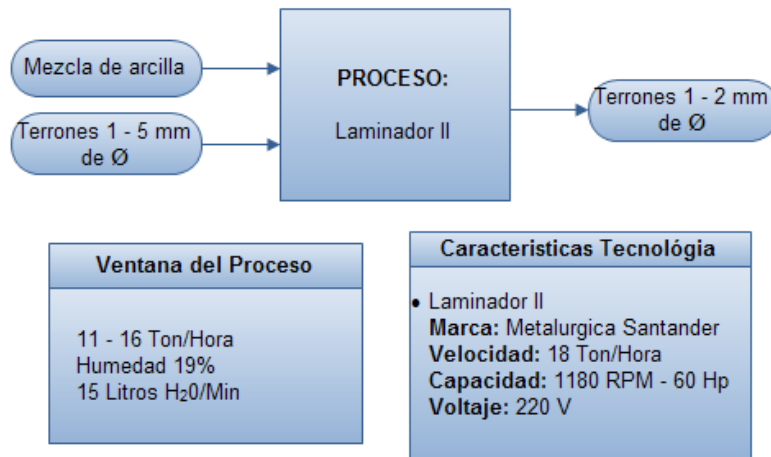
Figura 24. Adición de Agua.



Fuente: Elaboración propia.

La siguiente figura 25, describe de forma general las entradas y las salidas que se llevan a cabo cuando en el proceso de laminado de la materia prima, como también los detalles de los equipos utilizados. Se evidencia, que el tamaño de las partículas en su mayoría de arena al pasar por esta etapa aún son muy grandes (mayores de 2 milímetros) se supone que es debido al desgaste de los equipos de triturado y laminado o posiblemente no estén funcionando correctamente, lo cual afecta la calidad de los bloques finales haciendo que absorban gran cantidad de agua.

Figura 25. Descripción del proceso de Laminación.



Fuente: Elaboración propia.

7.2.1.8. Amasado segunda etapa.

La arcilla proveniente del Molino Laminador II, se alimenta por bandas transportadoras (figura 26) al amasador II, que es un mezclador igual al de la primera etapa, pero las paletas mezcladoras son menos compactas y más pequeñas. La arcilla alimentada tiene un tamaño de las partículas menores de 2 milímetros, en general no se adiciona agua, pero cuando es necesario por alguna razón especial, es agregada mecánicamente. Luego, la mezcla amasada es enviada a la extrusora.

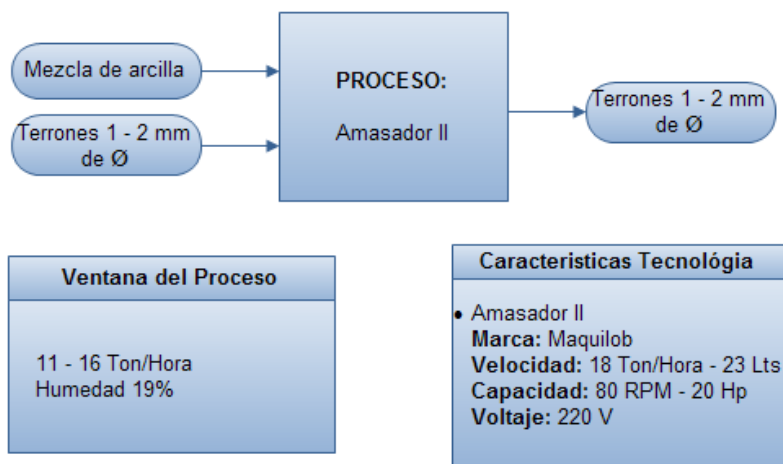
Figura 26. Amasadora II.



Fuente: Elaboración propia.

La siguiente figura 27, describe de forma general las entradas y las salidas que se llevan a cabo en el proceso de amasado de la materia prima, como también los detalles de los equipos utilizados.

Figura 27. Descripción del proceso de Amasado.



Fuente: Elaboración propia.

7.2.1.9. Extrusión

La mezcla de arcilla después de pasar por todas las etapas anteriores, ya se encuentra con una textura adecuada para su conformación semihúmeda o seca (figura 28). Una extrusora, la cual es alimentada con esta mezcla por la parte superior tiene un sistema de dos ejes paralelos con paletas que reciben la mezcla y la guían hacia el interior del tornillo sin fin, que se encarga de impulsarla para obtener la forma de un ladrillo compacto. Por otro lado, la bomba de vacío que trabaja entre 21 y 23 Psi, funciona en conjunto con la extrusora, para extraer el vapor de agua y otras sustancias no deseadas que se generan durante el proceso [64].

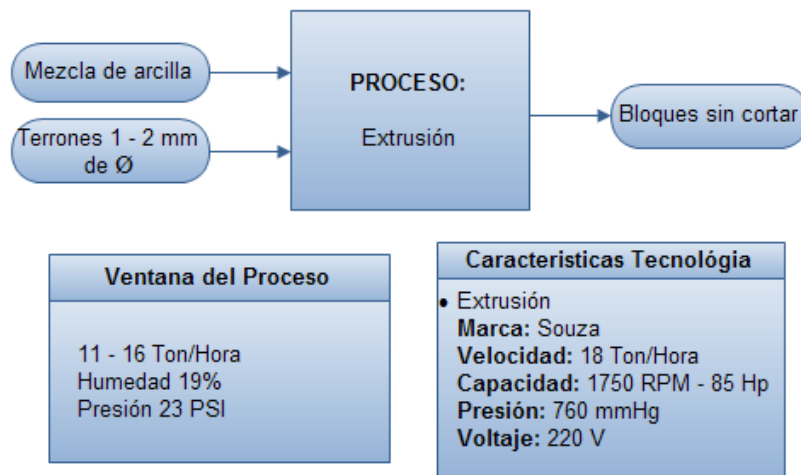
Figura 28. Extrusora.



Fuente: Elaboración propia.

La siguiente figura 29, describe de forma general las entradas y las salidas que se llevan a cabo en el proceso de extrusión de la mezcla ya conformada, como también los detalles de los equipos utilizados.

Figura 29. Descripción del proceso de Extrusión.



Fuente: Elaboración propia.

7.2.1.10. Corte del bloque

Para el corte se utiliza una cortadora automática marca souza (figura 30), que tiene un excelente mecanismo de alta confiabilidad que logra una producción entre 58 y 60 bloques por minuto y alcanza una producción diaria hasta de 23,500 bloques. Los bloques son posteriormente transportados en carretas y ubicados en los patios de secado natural.

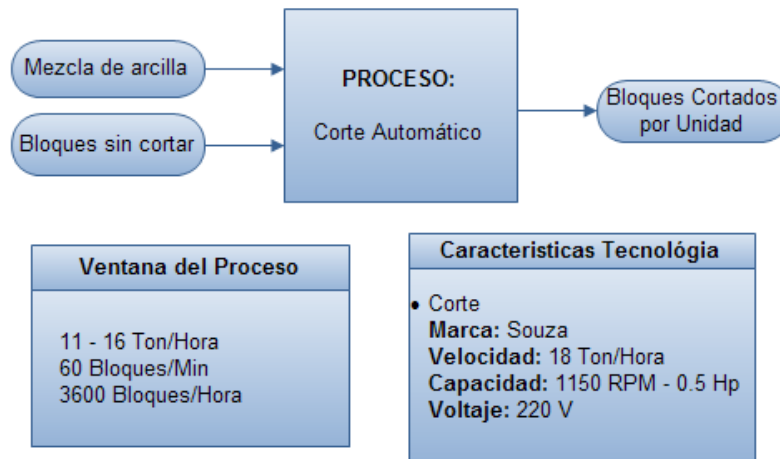
Figura 30. Cortadora automática.



Fuente: Elaboración propia.

La siguiente figura 31, describe de forma general las entradas y las salidas que se llevan a cabo en el proceso de corte de los bloques, como también los detalles de los equipos utilizados.

Figura 31. Descripción del proceso de Corte.



Fuente: Elaboración propia.

7.2.1.11. Secado natural

Luego que los bloques son extruidos, el material conformado tiene una humedad entre 19 o 20%. Se realiza entonces un proceso de secado a condiciones ambientales durante 5 a 7 días en donde se elimina el agua casi hasta un 8% de humedad, este proceso ocurre en el patio de secado o ramadas (figura 32). Para el secado de los 23.500 bloques producidos diariamente, 4.480 son secados naturalmente en columnas que constan de entre 10 y 19 bloques. Los 19.020 restantes son secados artificialmente. Esta etapa es muy importante para evitar deformaciones o transformaciones bruscas en el material en el proceso cocción [65].

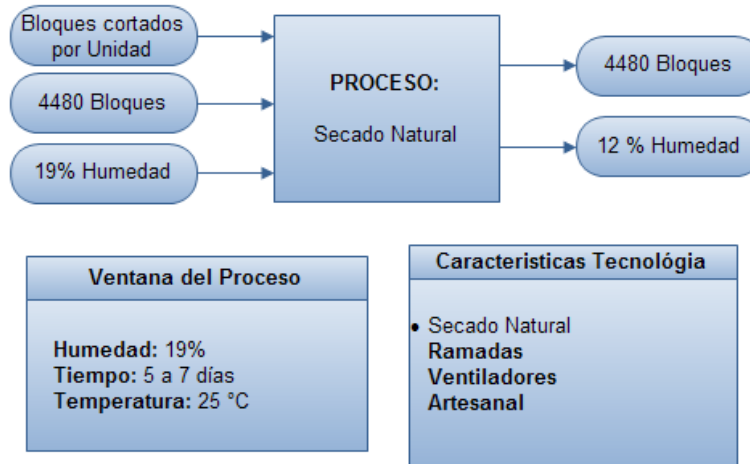
Figura 32. Patio de secado natural.



Fuente: Elaboración propia.

La siguiente figura 33, describe de forma general las entradas y las salidas que se llevan a cabo en el proceso de secado natural de los bloques extruidos, como también los detalles de la etapa.

Figura 33. Descripción del proceso de Secado Natural.



Fuente: Elaboración propia.

7.2.1.12. Secaderos Artificial

El secadero artificial tiene un sistema de recirculación de aire caliente que se produce en el extractor. Para lo cual, se utiliza un carro con ventilador de recirculación (figura 34), el cual agita y homogeniza el flujo de aire caliente de aproximadamente 50°C dentro de la cámara de secado. Este proceso de secado se realiza en la jornada nocturna durante aproximadamente 16 horas, debido a que durante el día es descargado y cargado nuevamente para continuar el proceso. En esta etapa los bloques pierden entre 5 y 8 % de la humedad.

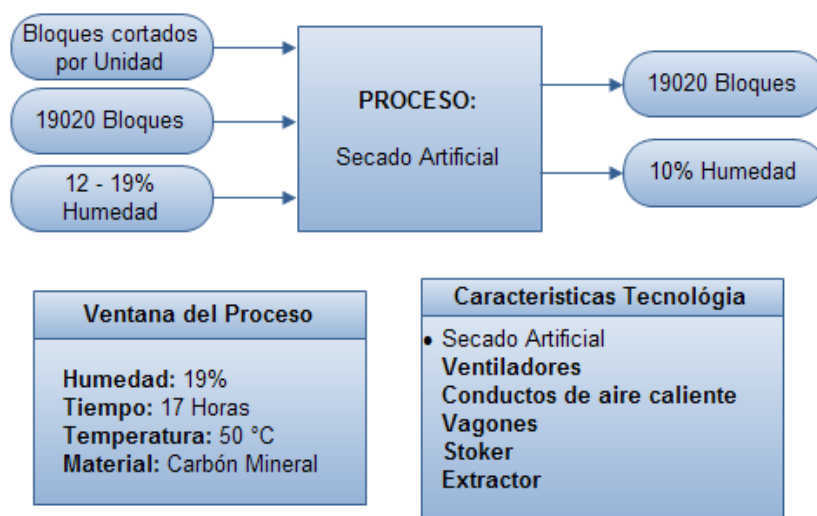
Figura 34. Carro ventilador.



Fuente: Elaboración propia.

La siguiente figura 35, describe de forma general las entradas y las salidas que se llevan a cabo en el proceso de secado artificial de los bloques, como también los detalles de los equipos utilizados.

Figura 35. Descripción del proceso de Secado Artificial.



Fuente: Elaboración propia.

7.2.1.13.Preparación del carbón

Otros procesos importantes en la empresa es preparar el carbón mineral usado como combustible en los proceso de cocción y secado, esto se realiza a través de un molino de martillos (figura 36), que obtiene partículas de entre 1 y 2 centímetros, donde es transportado al inyector de combustible para el secado artificial y al horno Hoffman.

Figura 36. Molino de martillos.



Fuente: [61]

La cantidad de carbón que se consume en las primeras 12 horas de funcionamiento del horno Hoffman es de 573,33 Kilogramos, donde el consumo mensual promedio es de 170 Ton/mes. Dicho carbón posee las siguientes características químicas:

Tabla 2. Composición Química del Carbón.

COMPOSICIÓN	PORCENTAJES (%)
C	78.40
H ₂	4.20
O ₂	6.20
N ₂	1.70
S	1.20
Cenizas	5.40
H ₂ O	2.90
Total	100

Fuente: [61]

7.2.1.14. Inyección de combustible

El Stoker (figura 37), es un equipo utilizado para la inyección y combustión de carbón particulado que origina el calor que se enviará al extractor. El carbón es alimentado a través de una tolva y un tornillo sin fin de gran longitud. El equipo puede durar un tiempo estimado de tres horas inyectando carbón de forma automática a un nivel de tolva llena, el transporte del calor producido se realiza por medio de extractores y se recircula el aire caliente con ventiladores en el secadero artificial, en donde se alcanzan temperaturas de aproximadamente 50°C.

Figura 37. Stoker.



Fuente: Elaboración propia.

7.2.1.15. Transporte de aire caliente

Para el secado adecuado de los bloques previos a la cocción en el horno tipo Hoffman (figura 38), es necesario crear un ambiente de alta temperatura para disminuir el porcentaje de humedad, teniendo en cuenta la curva de cocción establecida para este tipo de productos según sus características. Esto se realiza a través de un extractor, que conduce el calor que se produce el secado artificial.

Figura 38. Extractor.



Fuente: [61]

7.2.1.16. Cocción

Este proceso se realiza mediante un horno Hoffman, que consiste en 2 galerías paralelas, formadas por compartimientos contiguos, en cuyos extremos se unen por un pasa-fuegos en forma de calados (figura 39). Este tipo de hornos, se utilizan para alta producción, pero no se

puede producir materiales vitrificados (figura 39). En este proceso, el fuego se mueve a través del horno en dirección contra corriente teniendo en cuenta su forma rectangular, este sistema permite obtener una alta eficiencia térmica y de producción de un aproximado del 80%, debido a que el calor obtenido en la cámara de combustión se utiliza en el precalentamiento de las cámaras siguientes [58].

Figura 39. Horno Hoffman.



Fuente: Elaboración propia.

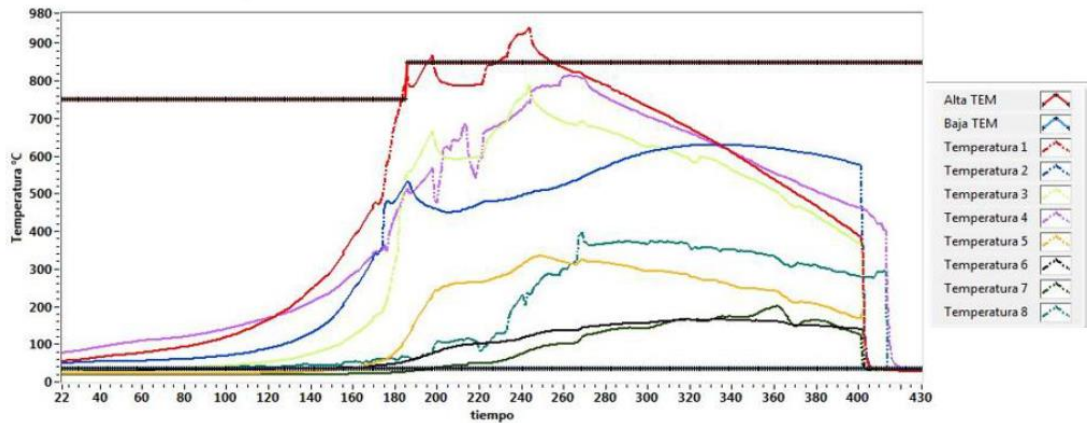
Aproximadamente el tiempo que toma realizar un ciclo completo de cocción (el fuego llega al punto de donde partió) es de una semana. Cada galería está formada por varias cámaras, cada una de ellas con su respectiva puerta en donde se almacena en promedio entre 1400 y 1500 bloques en dos columnas de entre 620 y 650 bloques. El horno tiene una capacidad total de 30000 bloques/día.

La alimentación del combustible se realiza en la parte superior del horno, mediante alimentación manual o con la ayuda de Carbojet (alimentación neumática), la cual debe realizarse en forma dispersa, evitando chorros que provoquen combustión incompleta [61].

7.2.1.17. Descripción del comportamiento actual en el horno de la empresa.

La temperatura máxima alcanzada dentro del horno de la empresa es de 920°C. Como se ve en la figura 40, el tiempo que dura el horno en el calentamiento es de 3,5 horas, el de sostenimiento es de 3,5 horas y el de enfriamiento es de 4 horas. Las temperaturas 1 a la 8 reflejan el flujo de calor en diferentes zonas de la cámara [61].

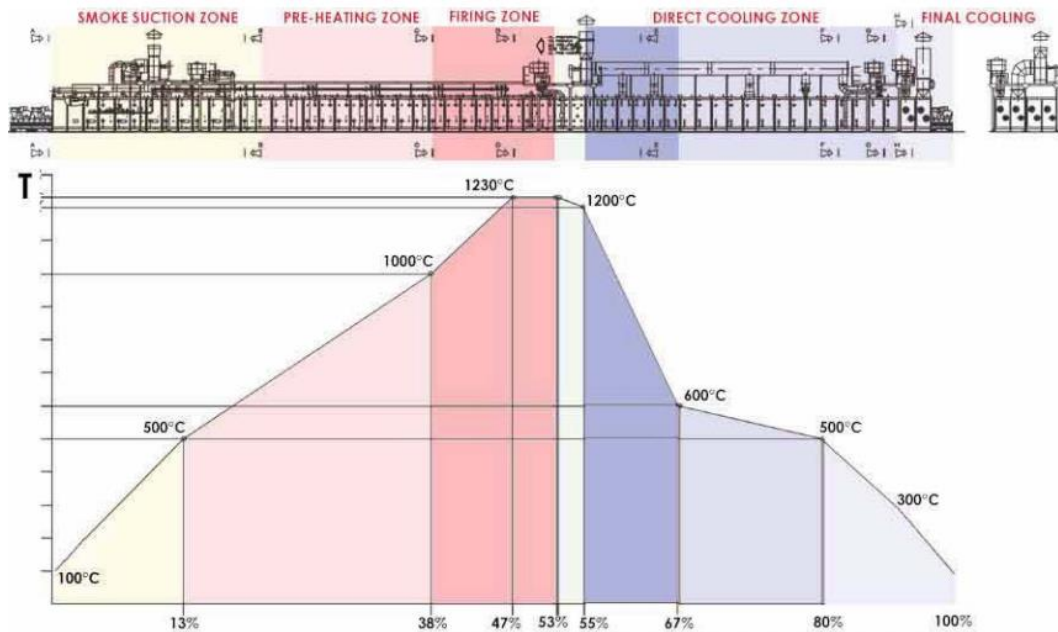
Figura 40. Grafica de temperaturas alcanzadas por el Horno Hoffman de la empresa.



Fuente: [61]

En la figura 41, se observa el control ideal para la cocción de un material cerámico en un horno tipo Hoffman, teniendo en cuenta la información recolectada en la bibliografía.

Figura 41. Control del proceso de cocción de cerámicos en un horno tipo Hoffman.



Fuente: [66]

En el interior de estos hornos, durante el proceso de cocción, se pueden identificar las zonas térmicas críticas, que son explicadas a continuación:

- 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 la disociación oxidante de los sulfuros minerales.
- Entre 450°C y 650°C. Se elimina el agua de constitución (deshidroxilación) y 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 CO₂.
- A partir de 700°C. Aparece la formación de nuevas fases cristalinas constituidas por el SiO₂ de los silicatos y silicoaluminatos.
- Luego, 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 1000°C, se pueden evaporar algunos componentes de las pastas y los revestimientos como los óxidos alcalinos, el óxido de plomo, el óxido de cinc, el anhídrido bórico.
- 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 y/o cristalina.

7.2.1.18. Inyección del carbón.

Este proceso se realiza con un equipo llamado Carbojet (figura 42), es adecuado para la inyección del carbón al proceso de cocción de los materiales, alcanza una inyección de carbón de 8 a 12 Kilogramos por minuto para mantener la temperatura requerida en el horno en cada fase de acuerdo al tiempo transcurrido, de esta manera según análisis realizados cada bloque consume en un promedio 0,288 Kilogramos de carbón mineral.

Figura 42. Carbojet.



Fuente: [67]

Luego de extraer gran parte de la humedad en los secaderos a los bloques (figura 43), estos deben ser ubicados dentro de las recamaras estratégicamente para el aprovechamiento del flujo de calor, luego se sellan las puertas con una pared provisional (figura 44), la cual es derribada después de terminar el proceso de cocción, de esta manera el bloque es enfriado a través de un ventilador de alta potencia que retira el calor residual, para luego ser despachados a los clientes directamente y en algunas ocasiones almacenados en los patios de la empresa (figura 45).

Figura 43. Posición de los bloques dentro del horno.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 44. Sellado de la puerta.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 45. Bloque después de la cocción.



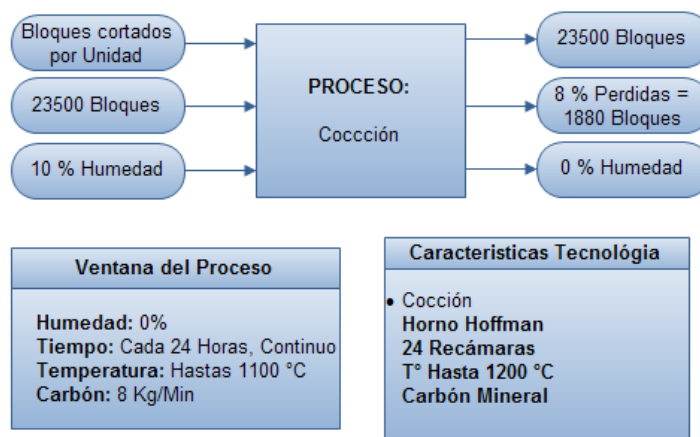
Fuente: Elaboración propia.

Al iniciar este proceso de cocción los bloques poseen entre 10 y 11 % de humedad. Para que los bloques tengan propiedades mecánicas adecuadas a las especificaciones de las normas, este tipo horno alcanza temperaturas de hasta 1200°C según lo encontrado en la bibliografía, en un proceso de cocción entre 20 y 22 horas. Este horno no cuenta con un sistema de control que le permita controlar la temperatura en función del tiempo, es decir, acercarse lo más posible a la curva ideal de cocción para estos productos de mampostería.

Las pérdidas totales de producción del bloque H-10x30 durante todas las etapas de son aproximadamente del 8%. Según información suministrada por producción y el laboratorio, la producción de bloques H-10x40, generan un porcentaje de pérdidas más grande debido a sus dimensiones, por lo tanto solo se fabrican por encargo.

La figura 46 describe de forma general las entradas y las salidas que se llevan a cabo en el proceso de cocción de los bloques, como también los detalles de los equipos utilizados.

Figura 46. Descripción del proceso de Cocción.



Fuente: Elaboración propia.

7.2.2. Evaluación del proceso productivo

Teniendo en cuenta el seguimiento y descripción realizado a cada etapa del proceso productivo en la fabricación de bloques H-10, además la tecnología utilizada, la ventana del proceso actual, las entrevistas y consultas realizadas al personal encargado de cada área, resulto la siguiente evaluación:

Se pudo evidenciar que en la etapa de mayor problema es la etapa de secado natural y artificial, debido a que los bloques entran a la etapa de cocción en el horno Hoffman con un 11% de humedad, lo cual hace que se generen deformaciones y grietas.

Otra etapa crítica es la molienda, debido a que las maquinas no generan la funcionalidad esperada para obtener tamaños de partículas menores a 1 milímetro y de esta manera garantizar la calidad del producto final. Se propone el cambio de equipos con mejor tecnología.

Otro factor importante es la formulación de la pasta, debido a que las mezclas actualmente usadas poseen grandes porcentajes de arenas (Lo cual se pudo evidenciar en los resultados de hidrometría realizados en el laboratorio de la empresa) y bajo de arcilla produciendo agrietamiento en varias zonas de los bloques durante el proceso de secado y cocción.

El horno Hoffman de la empresa no cuenta con un control de temperatura en tiempo real que garantice la curva optima de cocción en donde se mantenga la temperatura de fusión del material mínimo de 920°C por un tiempo determinado, se producen imperfecciones (grietas, fisuras, deformaciones) en las piezas teniendo en cuenta que los puntos de fusión son bajos. Como también, en caso contrario hay bloques que exceden su punto de fusión y se producen cambios de color (negro) por no controlar la temperatura dentro del horno y aumentar el ingreso de carbón en algunas cámaras. Debido a que no se lleva un control adecuado de la temperatura ni en los secaderos ni en el horno.

En gran medida el proceso de adición de agua se lleva a cabo de manera artesanal. A este hecho se le adiciona que no se realizan ensayos tecnológicos para medir el índice de plasticidad de las arcillas que hacen parte del mezclado, con la finalidad de obtener un producto estructuralmente bien conformado y con valores de plasticidad que se encuentren en el rango establecido para predecir su comportamiento.

Para la transformación de la materia prima utilizada en la fabricación de los bloques H-10 se tuvieron en cuenta las siguientes características:

- La materia prima es extraída con retroexcavadora lo que facilita la explotación y homogeneidad, luego es aglomerada en los patios, la cual dura aproximadamente 6 meses en reposo.
- La empresa cuenta con terrenos de explotación propios, lo que asegura las reservas y la continuidad en las características del producto final.

- La empresa cuenta con un proceso continuo y tecnificado en el proceso de transformación de la materia prima hasta el producto parcial.
- La empresa realiza algunos ensayos de resistencia mecánica a variaciones en la pasta dependiendo del lote que se toma por semestres.
- La planta cuenta con un horno Hoffman con proceso de combustión a base de carbón mineral con inyección por medio de carbojet, con lo que se pueden obtener temperaturas mayores a los 920°C.

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, las cuales no son controladas. Muchas veces entran productos con una humedad superior al 8%, lo que evidentemente causa defectos en el producto.

Fuente: Elaboración propia.

8. EVALUACIÓN DEL PRODUCTO FINAL ACTUAL Y CARACTERIZACIÓN DE ARCILLAS.

La caracterización tecnológica de materias primas es de vital importancia para predecir su comportamiento en el proceso productivo y de esta forma poder obtener productos de calidad requeridos por los clientes y las normas vigentes.

La caracterización física, química y térmica de las arcillas usadas por la empresa Ladrillera Hora Ltda. se llevó a cabo en los laboratorios de Ladrillera Hora Ltda, la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña y Cúcuta, en la Universidad Industrial de Santander – Bucaramanga, en la Universidad de Pamplona y en los laboratorios GMAS, Bogotá.

A continuación se detalla la aplicación de las diferentes técnicas para realizar las caracterizaciones de las muestras recolectadas en los patios de la ladrillera hora Ltda. Teniendo en cuenta los criterios de selección de las minas con la finalidad de analizar los controles básicos y complementarios por medio de ensayos de laboratorios destructivos y no destructivos.

8.1. Evaluación del producto final actual (Ensayos destructivos)

Los ensayos destructivos, se realizaron a los bloques cerámicos que fabrica actualmente la empresa, con la finalidad de tener una perspectiva de su comportamiento al someterlos a cargas horizontales o verticales, lo cual nos permite establecer parámetros y criterios específicos de los puntos donde podrían ocurrir fallas en cuanto al proceso de fabricación del producto, siendo de vital importancia a la hora de conocer las características de los materiales para mampostería; todo esto es validado por una serie de normas que explican los procedimientos a seguir de forma específica para cada uno de los ensayos que se deseen realizar (NTC 4205 y NTC 4017), las cuales aseguran la validez de los datos obtenidos en los ensayos.

Los ensayos más utilizados para medir las características físicas y mecánicas de los bloques de arcilla son los siguientes: Resistencia a la compresión, uniformidad dimensional, absorción inicial e inmersión por 24 horas.

Teniendo en cuenta los estudios realizados, se seleccionaron 30 bloques aleatoriamente de referencia H-10x30 (figura 45) del horno Hoffman de la ladrillera Ocaña, con dimensiones promedio son 10 de ancho por 20 de alto por 30 de largo, medidas en centímetros.

A continuación en la tabla 4, se detalla la información de las muestras recolectadas:

Tabla 4. Muestras de Bloques H-10 recolectados en la ladrillera Ocaña.

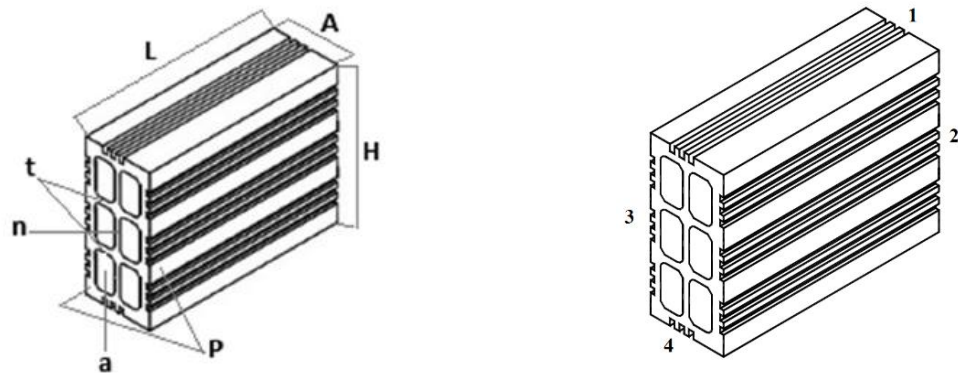
Muestras			
Fecha de recolección	Identificación	Observaciones	Cantidad
29 de Septiembre de 2016	Muestra #B1	Se escogieron 30 bloques aleatoriamente para los ensayos destructivos de compresión, flexión y absorción.	Son 5 para cada ensayo más unas muestras de reserva.

Fuente: Elaboración propia.

8.1.1. Características morfológicas del bloque H-10

Las características morfológicas o dimensionales del bloque H-10 son largo, ancho, altura del piso a la pieza, espesor y peso, relacionadas en la siguiente figura 47.

Figura 47. Dimensiones del Bloque H-10 y medidas tomadas.



Fuente: [68]

Dónde:

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)

Las dimensiones los bloques H-10x30 oscilan dependiendo de la tecnología utilizada por la empresa y para el caso del bloque de seis huecos que es el más común, los valores de largo varían entre 28,00 y 30,50 centímetros, y los valores del ancho entre 9,64 y 10,46 centímetros según la investigación realizada a los bloques en la Cúcuta y su área metropolitana [68].

A continuación se detallan cada uno de los ensayos realizados en el laboratorio, teniendo en cuenta la figura 47, para la toma de medidas de cada uno de los bloques para cada ensayo, con la finalidad de definir su morfología y comprarlos con la norma técnica colombiana [69].

8.1.1.1. Espesores y tabiques

Son los elementos transversales que mantienen unidas las paredes de un lado con las opuestas o que separan celdas dentro de la pieza. Tanto en las unidades de perforación horizontal como vertical, las paredes exteriores pueden ser sólidas, perforadas o dobles, teniendo en cuenta los criterios de aceptación y rechazo (anexo 6).

8.1.1.2. Preparación de muestras para ensayos físicos

Para la realización de ensayos físicos (absorción inicial y final de agua, morfología, compresión y flexión) los bloques se secaron a 110°C en la estufa de secado 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, la cual establece que deben ser cinco (5) bloques para cada ensayo, los resultados fueron comparados con los datos establecidos en la norma NTC 4205, la cual establece los valores permisibles de tabiques y espesores para unidades de mampostería [70].

Teniendo en cuenta lo anterior, se tomaron las dimensiones de los bloques H-10 (longitud y ancho) con el fin de observar la variabilidad entre las diferentes muestras para lo cual se empleó el calibrador pie de rey marca Baker, teniendo en cuenta la figura 47, las cuales especifican los lados de los cuales se tomaron las medidas. Igualmente, se tomaron los espesores de las paredes y tabiques, para comparar los resultados con los datos establecidos en la norma NTC 4205. Asimismo, se pesaron de cada una de las muestras en la balanza analítica marca Series.

Los datos obtenidos fueron validados con la ayuda del software Stargraphics centurion, con el cual se obtuvieron las gráficas y datos estadísticos para las variables en cada análisis.

A continuación, se describen los resultados obtenidos para cada ensayo que se llevó a cabo:

8.1.1.3. Tasa de absorción inicial

La absorción de agua tiene relación directa con la porosidad, propiedades mecánicas, densidad aparente y compactación de un producto cerámico. Se considera un parámetro importante, debido a que refleja la calidad del producto y, por esta razón, es uno de los ensayos realizados con mayor frecuencia. Menores valores de absorción de agua indican que el producto tiene menor porosidad abierta, lo cual representa una ventaja debido a que el producto tiene menor capacidad de absorber agua del ambiente.

Este ensayo se lleva a cabo con los bloques totalmente secos después de la cocción durante 5 minutos y su unidad de medida se expresa en $\text{g/cm}^2/\text{min}$ [71] [72].

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

$$T. I. A. = \frac{G}{\bar{A}} \text{ min} \quad (8.1)$$

Donde:

T. I. A. = Tasa Inicial de Absorción. g/cm²/min.

G = Diferencia en gramos entre los pesajes inicial y final por cada minuto. g/min.

A = Área de contacto con el agua. cm².

A continuación se presenta la tabla 5, en donde tomaron 5 bloques los cuales fueron previamente secados en el horno a 110°C, y colocados en una placa con agua la cual no sobrepaso los 5 milímetros de alto como lo establece la norma NTC 4017. Además se tomaron las medidas de cada uno de los bloques, y se obtuvieron los siguientes resultados:

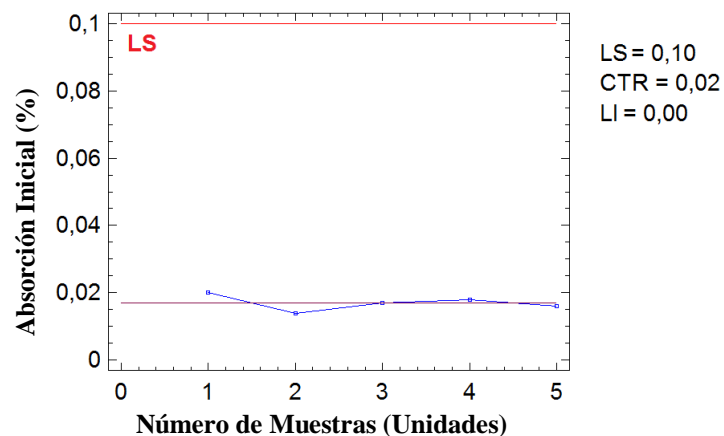
Tabla 5. Absorción inicial de agua.

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	4809	4864	0,020	93,02	192,98	292,42	12,10	11,90	12,15	12,80	10,20
2	4592	4632	0,014	92,78	193,15	296,20	12,60	12,20	13,02	11,76	9,80
3	4663	4711	0,017	94,51	194,20	291,01	13,50	13,61	12,75	12,50	9,75
4	4706	4757	0,018	95,00	194,88	294,90	12,40	14,01	12,80	12,78	11,01
5	4629	4675	0,016	94,37	195,10	295,35	13,70	12,70	12,92	12,90	9,91

Fuente: Elaboración propia.

La baja porosidad tiene relación con el grado de compactación de la mezcla arcillosa durante la fabricación. Los valores máximos de absorción de agua según la norma NTC 4205 deben ser menores del 0,10% para su uso interior o exterior. Estos valores son de igual magnitud para mampostería estructural y no estructural. En la tabla 5 y la figura 48 se observa que el valor de la humedad está dentro del rango establecido por la norma, razón por la cual este tipo de producto cumple con uno de los requisitos establecidos por la norma.

Figura 48. Análisis estadístico para Absorción Inicial.



Fuente: Elaboración propia.

La figura anterior, se construye bajo el supuesto de que los datos provienen de 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 cuenta el límite superior (LS). El proceso se encuentra en estado de control estadístico con un nivel de confianza superior al 95% (tabla 6), pero no cumple con lo establecido por la norma.

Tabla 6. Resumen Estadístico para Absorción Inicial.

Variable	Valor
Recuento	1 – 5
Media o Promedio	0,017
Desviación Estándar	0,00223607
Coefficiente de Variación	13,1533%
Mínimo	0,014
Máximo	0,02
Rango	0,006
Sigma de proceso	0,0249787

Fuente: Elaboración propia.

8.1.1.4. Tasa de absorción 24 horas.

El objeto de este análisis, es calcular el incremento en la masa de un material seco, cuando es sumergido en agua durante 24 horas a temperatura ambiente. Este aumento de masa es debido al agua que se introduce en los poros del bloque y no incluye el agua adherida a la superficie de las partículas.

$$\% \text{ Absorción} = \frac{(W_{SS} - W_S)}{W_S} * 100 \quad (8.2)$$

Donde:

W_S = Masa seca antes de la inmersión. Gramos

W_{SS} = Masa húmeda después de la inmersión. Gramos

Teniendo en cuenta lo anterior, se tomaron las medidas de cada uno de los bloques, y se obtuvieron los siguientes resultados:

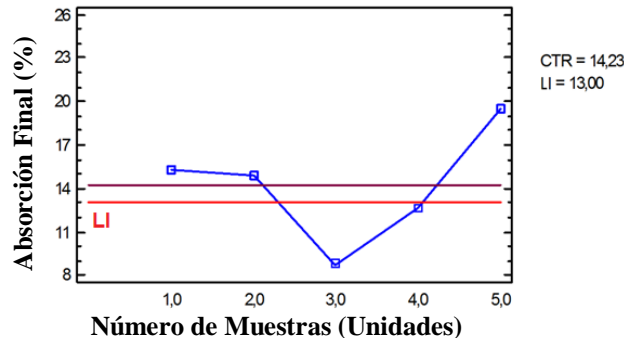
Tabla 7. Absorción final de agua.

ABSORCIÓN 24 HORAS											
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	4598	5301	15,29	93,69	194,03	296,42	12,60	11,60	12,02	12,60	9,77
2	4754	5463	14,91	95,60	194,44	296,96	13,30	14,52	13,25	11,40	9,70
3	4792	5209	08,70	94,31	193,73	291,70	13,82	12,31	12,37	12,81	9,12
4	4762	5367	12,70	94,34	194,35	294,57	13,80	11,37	12,14	12,56	11,03
5	4539	5427	19,56	94,92	195,20	296,71	12,64	12,74	12,45	11,83	10,24

Fuente: Elaboración propia.

Se puede apreciar en la tabla 7 los valores máximos de absorción de agua según la norma NTC 4205 debe ser de 13% para uso interior y 13,5% para uso exterior. Estos valores son de igual magnitud para mampostería estructural y no estructural.

Figura 49. Análisis estadístico para absorción final Vs número de muestras.



Fuente: Elaboración propia.

La figura 49, se construye bajo el supuesto de que los datos provienen de una distribución normal con una media igual a 14,232 y una desviación estándar igual a 3,86746. De los 5 puntos mostrados en el gráfico, dos (2) puntos se encuentran fuera de los límites de control, por lo que un 40% cumple con este 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% (tabla 8), cumpliendo solo en un porcentaje. Por lo tanto, se debe aumentar el vacío de la extrusora para cumplir con este requisito en un mayor porcentaje según lo establecido por la norma.

Tabla 8. Resumen estadístico para absorción final.

VARIABLE	VALOR
Recuento	1 – 5
Media o Promedio	14,232
Desviación Estándar	3,966
Coefficiente de Variación	27,8668%
Mínimo	8,7
Máximo	19,56
Rango	10,86
Sigma de proceso	3,86746

Fuente: Elaboración propia.

8.1.1.5. Resistencia mecánica a la compresión.

Este análisis consiste en someter una muestra de material que no tenga irregularidades en lo que tiene que ver con poros, grietas, fisuras, etc. mediante una carga aplicada a compresión uniformemente sobre la superficie de una de las caras del bloque hasta alcanzar su falla. En este ensayo se toman los datos de la resistencia última de cada bloque y dividiéndola entre el área de la superficie en compresión se obtiene el valor del esfuerzo último, siendo el punto donde el bloque deja de soportar más carga y se presenta la falla, resulta de la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{\text{Carga}}{\text{Área Transversal}}$$

De donde resulta la siguiente tabla 9:

Tabla 9. Resistencia mecánica a la compresión.

COMPRESIÓN									
N	ANCHO (mm)	ALTO (mm)	LARGO (mm)	Espesor de los lados (mm)				TABIQUE (mm)	Esfuerzo Ultimo (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	191,09	295,13	12,21	13,78	11,61	11,49	10,42	10,85

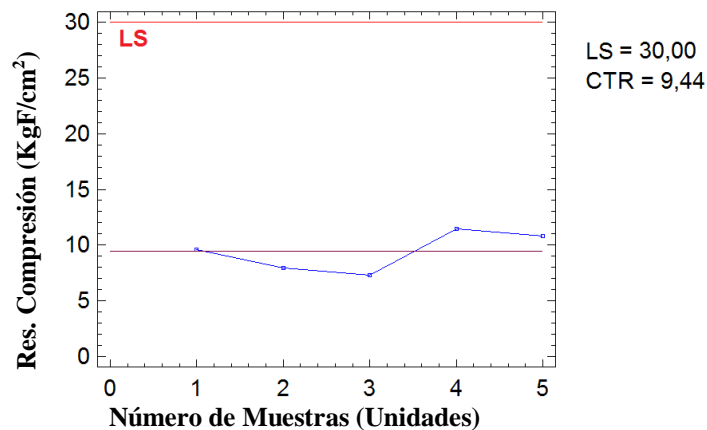
Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta la carga que fue aplicada en la maquina universal marca pinzuar a cada uno de los bloques, en donde se obtuvo un valor promedio igual a:

$$9,436 \frac{\text{KgF}}{\text{cm}^2}$$

De lo que se obtuvo la siguiente figura 50 en el software Stargraphics:

Figura 50. Resistencia mecánica a la compresión Vs número de muestras.

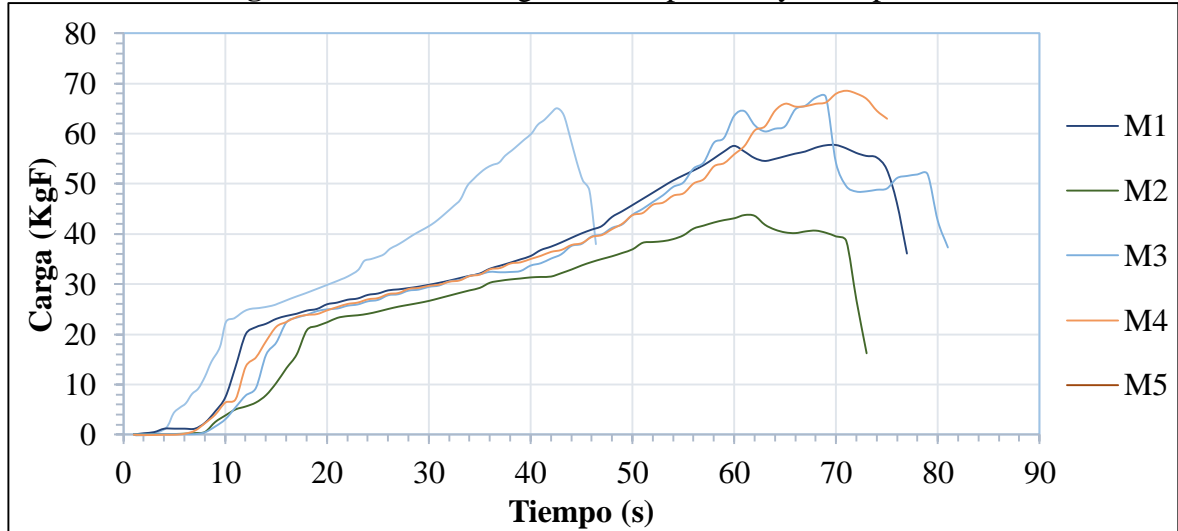


Fuente: Elaboración propia.

La norma NTC 4205 establece que la resistencia a la compresión mínima para el promedio de las 5 muestras debe ser mayor al límite superior (LS) igual a $30 \frac{\text{KgF}}{\text{cm}^2}$ 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 siguiente figura 51, describe el resultado arrojado por la maquina universal, en donde se observa la carga en función del tiempo para cada uno de los bloques.

Figura 51. Grafica carga Vs Tiempo. Ensayo compresión.



Fuente: Elaboración propia.

8.1.1.6. Resultados estadísticos para cada una de las variables morfológicas de los bloques

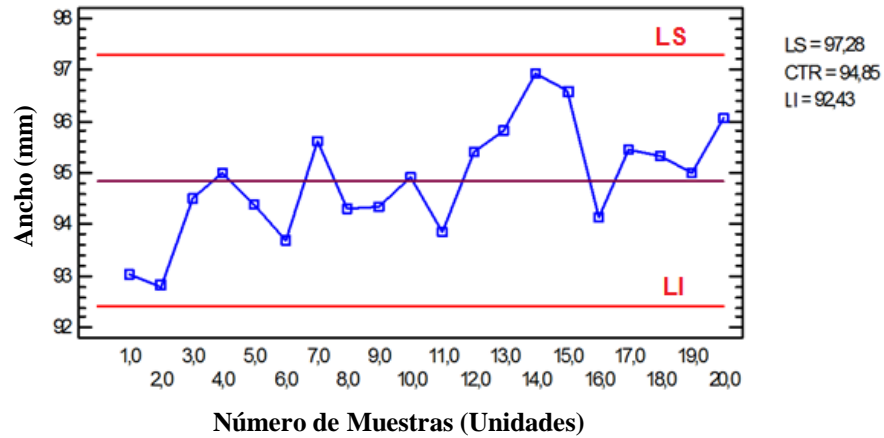
Los resultados de los análisis realizados se obtuvieron estadísticamente, usando el software Stargraphics, de lo que resultaron los siguientes datos para cada una de las variables que fueron comparadas con los parámetros establecidos con la norma NTC 4205.

8.1.1.6.1. Tolerancia dimensional

- **Ancho.**

La variación del ancho de los productos de mampostería de perforación horizontal está relacionada con el ancho del molde [73]. El ancho de los productos extruidos es el valor inicial, el cual se ve afectado posteriormente por las contracciones que sufre durante el secado y la cocción. Esta contracción es característica de cada materia prima usada en el proceso, razón por la cual el molde debe ser diseñado teniendo en cuenta este parámetro. Los valores del ancho de los bloques seis huecos se encuentran entre 92,43 – 97,28 mm, según el estudio realizado para este tipo de bloques en Cúcuta y su área metropolitana (figura 52) [68]. La norma NTC 4205 no establece parámetros para validar este tipo de variable.

Figura 52. Análisis estadístico para el ancho.



Fuente: Elaboración propia.

La figura 52, 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 0,807204. De los 20 puntos mostrados, todos puntos se encuentran dentro de los límites de control donde el límite inferior (LI) y el límite superior (LS). Por lo anterior, el proceso se encuentra en estado de control estadístico con un nivel de confianza superior al 95% (tabla 10). Teniendo en cuenta que todas las muestras de bloques se encuentran entre los rangos establecidos, según el estudio realizado en Cúcuta y su área metropolitana [68].

Tabla 10. Resumen estadístico para el ancho.

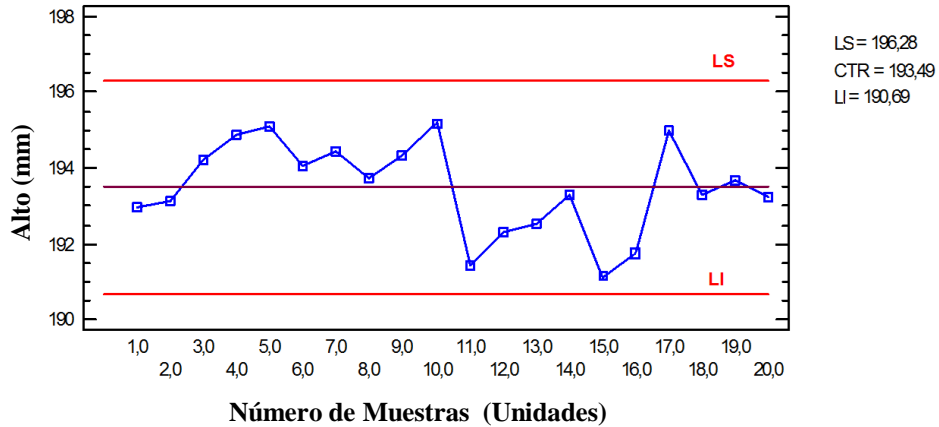
VARIABLE	VALOR
Recuento	1 – 20
Media o Promedio	94,855
Desviación Estándar	1,09247
Coefficiente de Variación	1,15173%
Mínimo	92,78
Máximo	96,93
Rango	4,15
Sigma de proceso	0,807204

Fuente: Elaboración propia.

- **Alto.**

El alto de los productos varía en los bloques H-10 seis huecos para las muestras recolectadas entre 190,69 – 196,28 mm, teniendo en cuenta el estudio realizado para este tipo de bloques en Cúcuta y su área metropolitana (figura 53) [68]. Esta medida depende del molde usado en la extrusora y de las contracciones que sufre de la materia prima.

Figura 53. Análisis estadístico para el alto.



Fuente: Elaboración propia.

La figura 53, se construye bajo el supuesto de que los datos provienen de una distribución normal con una media igual a 193,487 mm y una desviación estándar igual a 0,931784. De los 20 puntos mostrados, todos se encuentran dentro de los límites de control donde el límite inferior (LI) y el límite superior (LS). Por lo anterior, el proceso se encuentra en estado de control estadístico con un nivel de confianza superior al 95% (tabla 11). Teniendo en cuenta que todas las muestras de bloques se encuentran entre los rangos establecidos, según el estudio realizado en Cúcuta y su área metropolitana [68].

Tabla 11. Resumen estadístico para el alto.

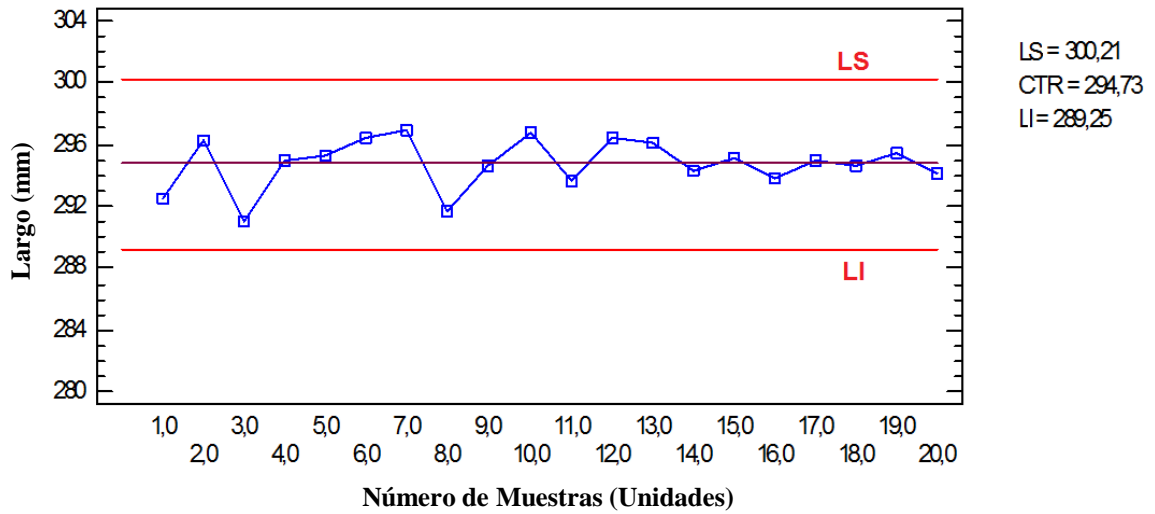
VARIABLE	VALOR
Recuento	1 – 20
Media o Promedio	193,487
Desviación Estándar	1,20951
Coefficiente de Variación	0,62511%
Mínimo	191,09
Máximo	195,20
Rango	4,11
Sigma de proceso	0,931784

Fuente: Elaboración propia.

- **Largo.**

Los productos de mampostería de perforación horizontal presentan gran rango de uniformidad en el largo en las diferentes muestras recolectadas (figura 54). Esto se debe al corte realizado al producto por la extrusora, además de un buen cálculo de las contracciones que sufre este tipo de producto en el secado y la cocción. Para el bloque seis huecos, los valores oscilan entre 289,25 – 300,21 mm, según el estudio realizado para este tipo de bloques en Cúcuta y su área metropolitana [68].

Figura 54. Análisis estadístico para el Largo.



Fuente: Elaboración propia.

La figura 54, se construye bajo el supuesto de que los datos provienen de una distribución normal con una media igual a 294,731 mm y una desviación estándar igual a 1,82577. De los 20 puntos mostrados, todos se encuentran dentro de los límites de control donde el límite inferior (LI) y el límite superior (LS). Por lo anterior, el proceso se encuentra en estado de control estadístico con un nivel de confianza superior al 95% (tabla 12). Teniendo en cuenta que todas las muestras de bloques se encuentran entre los rangos establecidos, según el estudio realizado en Cúcuta y su área metropolitana [68].

Tabla 12. Resumen estadístico para el largo.

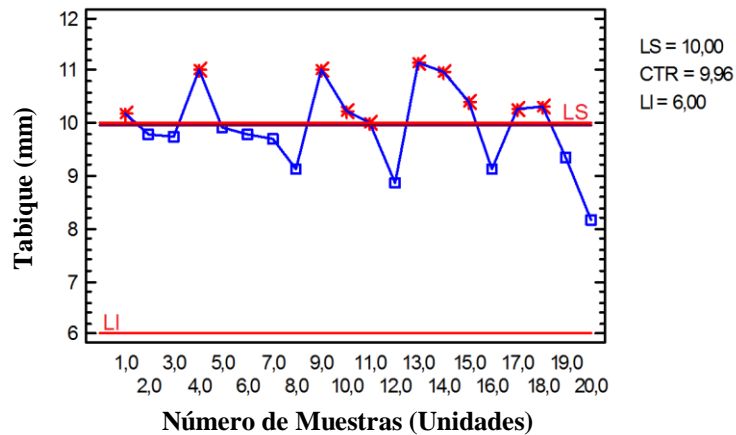
VARIABLE	VALOR
Recuento	1 – 20
Promedio	294,731
Desviación Estándar	1,64162
Coficiente de Variación	0,556987%
Mínimo	291,01
Máximo	296,96
Rango	5,95
Sigma de proceso	1,82577

Fuente: Elaboración propia.

- **Tabiques.**

La toma de los datos de Tabique y espesores, se tuvo en cuenta la representación establecida por la norma (figura 55). Además, teniendo en cuenta el tabique mínimo según la norma NTC 4205 que debe ser de 10,00 mm para mampostería estructural y 6,00 mm para mampostería no estructural. En la figura 55, se observa que los bloques están cumpliendo con el espesor de tabiques para productos de mampostería no estructural en un 100% pero el 50% está ubicado en productos de mampostería estructural.

Figura 55. Análisis estadístico para el Tabique.



Fuente: Elaboración propia.

La figura 55, se construye bajo el supuesto de que los datos provienen de una distribución normal con una media igual a 9,959 mm y una desviación estándar igual a 0,710153. De los 20 puntos mostrados, 10 se encuentran fuera de los límites de control donde el límite inferior (LI) y el límite superior (LS), lo que equivale en un 50% al cumplimiento de la norma 4205 (tabla 13).

Tabla 13. Resumen Estadístico para el Tabique.

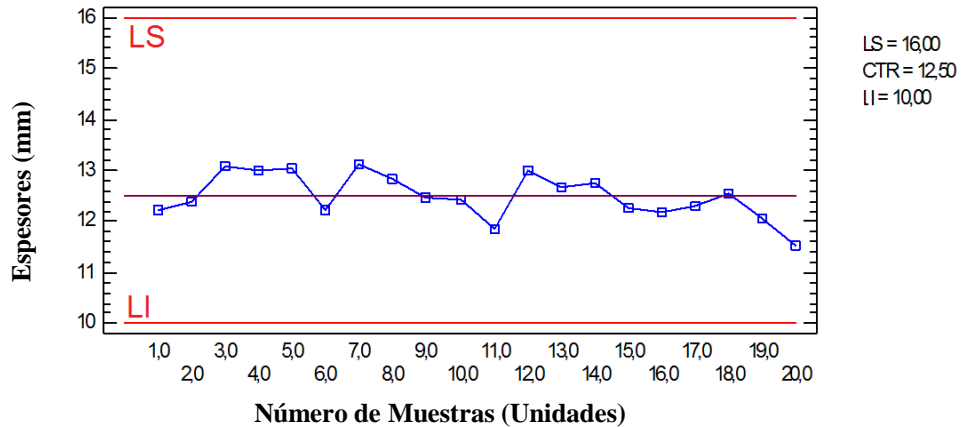
VARIABLE	VALOR
Recuento	1 – 20
Media o Promedio	9,959
Desviación Estándar	0,780485
Coficiente de Variación	7,83698%
Mínimo	8,16
Máximo	11,16
Rango	3,0
Sigma de proceso	0,710153

Fuente: Elaboración propia.

- **Espesores.**

Teniendo en cuenta el espesor de pared mínimo según la norma NTC 4205 que debe ser de 16,00 mm para mampostería estructural y 10,00 mm mampostería no estructural. En la figura 56, se observa que los bloques están cumpliendo con el espesor de paredes para productos de mampostería no estructural en un 100% pero no cumple para los productos de mampostería estructural en ningún porcentaje.

Figura 56. Análisis estadístico para los Espesores.



Fuente: Elaboración propia.

La figura 56, se construye bajo el supuesto de que los datos provienen de una distribución normal con una media igual a 12,5025 mm y una desviación estándar igual a 0,35601. Todos los puntos se encuentran dentro de los límites de control donde el límite inferior (LI) y el límite superior (LS), solo cumpliendo lo establecido para productos de mampostería no estructural. 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 4205 (tabla 14).

Tabla 14. Resumen Estadístico para los Espesores.

VARIABLE	VALOR
Recuento	1 – 20
Media o Promedio	12,5025
Desviación Estándar	0,444059
Coficiente de Variación	3,55176%
Mínimo	11,51
Máximo	13,12
Rango	1,61
Sigma de proceso	0,35601

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se presenta la siguiente tabla 15, en donde se resume en análisis realizado para cada parámetro del bloque H-10:

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

ANÁLISIS	VALOR OBTENIDO Promedio	VALOR NORMA	UNIDAD	OBSERVACIÓN	
				No estructural	Estructural
Tasa Inicial de Absorción	1,06	0,10	%	Cumple	Cumple
Absorción 24 horas	14,23	13 – 13,50	%	Cumple 40%	No cumple
Resistencia a la Compresión	9,44	30	$\frac{\text{KgF}}{\text{cm}^2}$	No cumple	No cumple
Ancho	94,85	92,43 – 97,48	mm	Cumple	Cumple
Alto	193,49	190,69 – 196,28	mm	Cumple	Cumple
Largo	294,73	289,25 – 300,21	mm	Cumple	Cumple
Tabiques	9,96	10 – 6	mm	Cumple	No cumple
Espesores	12,50	16 – 10	mm	No Cumple	Cumple en un 50%

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta la anterior tabla, se puede concluir que los bloques presentan un comportamiento relacionado con la bibliografía, la cual establece que mayor porosidad menor resistencia mecánica. En lo que tiene que ver con la morfología, presentan excelentes índices de uniformidad dimensional, comparados con lo establecido por la norma y el estudio realizado en Cúcuta y su área metropolitana [68].

8.1.1.7. Evaluación de los resultados obtenidos.

La norma NTC 4205 establece que en los resultados de los ensayos de absorción y resistencia, se admite que una de las cinco muestras ensayadas supere o no logre el límite individual en un 10%, siempre y cuando se cumpla para el valor promedio señalado. Para el caso de las muestras evaluadas ninguna cumple con la especificación.

Teniendo en cuenta lo anterior, la composición de la materia prima dentro del proceso de la fabricación de bloques cerámicos es de suma importancia. Por lo cual el proceso de la cocción del bloque se hace más complicado por lo que su composición química no es constante, debido a que los espacios intersticiales entre las partículas son mayores por lo que posee grandes porcentajes de arena, por ende los bloques tienen mayor absorción de agua. Lo anterior se demuestra en los ensayos de las especificaciones de la norma [60] [62].

Según el análisis de los datos obtenidos en los ensayos de compresión, absorción de agua y la posición del bloque en el horno de cocción, se pudo evidenciar la variación entre sus propiedades con respecto a la ubicación geométrica espacial en las recámaras del horno, teniendo en cuenta que en la parte superior de la recámara se concentra la mayor temperatura, generando mejores propiedades. En la zona alta y media, los bloques desarrollan mejores propiedades que en la zona baja, debido a que bloques que se encuentran en la parte inferior soportan el peso de los demás, como lo muestra la figura 43; señalando esto como una de las posibles causas de pérdidas por defecto.

8.2. Caracterización de la materia prima (Ensayos no destructivos)

Se realizaron ensayos de laboratorio como los más importantes: hidrometría por el método 152H, porcentajes humedad, retenido sobre tamiz por malla 230, índice de plasticidad por el método de Casagrande teniendo en cuenta los requisitos de las normas NTC 4630 e I.N.V. E – 125 – 07, contracción lineal, difracción y fluorescencia de rayos X.

Las diferentes arcillas existentes en los patios de la empresa, con la finalidad de formular una mezcla óptima mediante la caracterización hidrometría de las muestras, con lo que se encontraron porcentajes de Arena, Limo y Arcilla. Estos porcentajes fueron ubicados en los diagramas de aptitudes de winkler con la finalidad de determinar las características de la cerámica (tipo de producto y textura) y de esta manera poder definir la posible mezcla óptima.

8.2.1. Recolección de las muestras

Luego de identificar las vetas de arcillas de las cuales se extrae la materia prima según su color y con la experiencia del laboratorista de la empresa, se procedió a la toma de las cinco (5) muestras, las cuales fueron almacenadas en sacos debidamente identificados como se puede observar en la siguiente figura 57:

Figura 57. Recolección de las muestras.



A. Muestras de las vetas de arcilla.



B. Muestreo tipo canal manual.



C. Muestreo tipo canal con la ayuda de la retroexcavadora.

Fuente: Elaboración propia.

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 realizó manualmente y con ayuda de la retroexcavadora en algunas zonas debido a la altura presente como se puede observar en la figura 57. Las muestras se identificaron como se detalla en la siguiente tabla 16:

Tabla 16. Muestras de las vetas de arcillas recolectadas en la ladrillera Ocaña.

MUESTRAS de la Ladrillera Ocaña				
Fecha de recolección	Identificación		Observaciones	Cantidad
14 de Septiembre de 2016	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		
14 de Septiembre de 2016	Muestra #2	# 2-1	Arcilla roja oscura + oscura al lado de la muestra #1.	50 Kg aproximadamente
		# 2-2		
		# 2-3		
		# 2-4 - ufpso		
19 de Septiembre de 2016	Muestra #3	# 3-1	Arcilla verde en frente de la entrada de los patios.	50 Kg aproximadamente
		# 3-2		
		# 3-3		
		# 3-4 - ufpso		
19 de Septiembre de 2016	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		

19 de Septiembre de 2016	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 - ufps		
03 de Octubre de 2016	Muestra #6	# 6-1	Pasta de producción.	10 Kg aproximadamente
		# 6-2		
		# 6-3		
		# 6-4 - ufps		

Fuente: Elaboración propia.

Además, se recolectaron muestras de dos (2) zonas arcillosas cercanas a la ladrillera, las cuales se identificaron mediante el plano geológico presente en (anexo 6), con la finalidad de comparar los resultados de hidrometría de las muestras obtenidas. Estas muestras se identifican teniendo en cuenta la tabla 17:

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

MUESTRAS de las Zonas Cercanas				
Fecha de recolección	Identificación		Observaciones	Cantidad
05 de Octubre de 2016	Muestra #7	#7-PP	Ladrillera Artesanal de la Zona Botadero de Basura (Pasta de producción y la arcillas blancas y rojas para la mezcla)	10 Kg aproximadamente
		#7-AB		
		#7-AR		
05 de Octubre de 2016	Muestra #8	#8-PP	Ladrillera Artesanal de la Zona Hatillo (Pasta de producción y la arcillas blancas y rojas para la mezcla)	10 Kg aproximadamente
		#8-AB		
		#8-AR		
05 de Octubre de 2016	Muestra #9	#9-PP	Ladrillera Artesanal de la Zona Hatillo (Pasta de producción y la arcillas blancas y rojas para la mezcla)	10 Kg aproximadamente
		#9-AB		
		#9-AR		
20 de Octubre de 2016	Muestra #10	#10 - U	Arcilla de la Universidad con la finalidad de determinar la presencia de limos	5 Kg aproximadamente

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente a la recolección, se procedió a homogenizar y cuartear cada muestra con la finalidad de obtener 4 submuestras, las cuales fueron utilizadas para realizar análisis de hidrometría, retenido sobre tamiz e índice de plasticidad. Finalmente fueron empacadas e identificadas para la realización de los ensayos posteriores (figura 58).

Figura 58. Homogenización, cuarteo y empaque de las muestras recolectadas.



A. Muestra en forma de cono.

B. Cuarteo de las muestras seleccionadas.

C. Empaque e identificación de las muestras.

Fuente: Elaboración propia.

8.2.2. Análisis tecnológicos

Los ensayos no destructivos se realizaron a las muestras seleccionadas como se contempla en la siguiente tabla 18 (5 corresponden a todas las muestras y 2 a las encontradas como 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, tanto 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	2	Determinar los efectos endotérmicos y exotérmicos de las reacciones de las arcillas en el proceso de cocción, además de indicar cuales son las temperaturas a las que se producen.
	Termogravimétrico ATG		Determinar la pérdida de peso de las muestras que son generadas en la etapa de cocción.

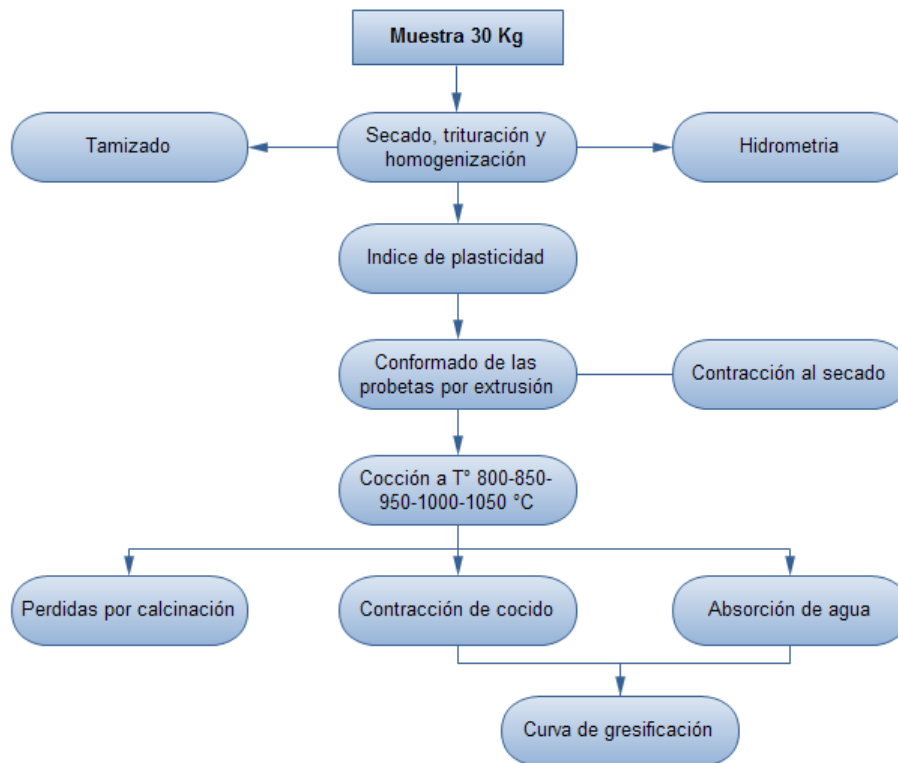
Fuente: Elaboración propia.

8.2.2.1. Caracterización física

El conocimiento del comportamiento físico cerámico de las arcillas es de vital importancia en la industria 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, para de obtener un producto final con las características técnicas requeridas por las normas vigentes.

Las muestras recolectadas fueron analizadas en los laboratorios de la Ladrillera Hora Ltda, 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, basados en las normas invias INV y normas técnicas colombianas NTC; las propiedades físicas que se deben determinar a las arcillas son: Distribución del tamaño de partícula, contenido de arena, plasticidad, contracción lineal, entre otras (figura 61) [13] [14].

Figura 59. Procedimiento de los análisis realizados.



Fuente: Elaboración propia.

Los ensayos realizados se detallan a continuación:

8.2.2.1.1. Tamizado vía seca

Este ensayo se usa para determinar la cantidad en porcentaje de las partículas más gruesas en su mayoría como gravas y arenas, lo cual es un indicador de la plasticidad de las muestras.

El análisis se realizó teniendo en cuenta la norma NTC 1522 y la INV.E – 123 [74] [75]. El tamaño de partícula fue determinado utilizando una muestra de 200 gramos, el ensayo se realizó utilizando una malla de apertura de tamiz seco ASTM 10 (2000 μm), 30 (600 μm), 60 (250 μm), 80 (180 μm), 100 (150 μm) y 120 (125 μm) y un colector, los resultados se pueden ver en la figura 61.

Los coeficientes de uniformidad y de curvatura se calculan con las siguientes expresiones [76]. Estos datos son necesarios para determinar la condición de las partículas del suelo.

Coeficiente de uniformidad (C_U):

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Coeficiente de curvatura (C_C):

$$C_C = \frac{D_{30}^2}{D_{10} * D_{60}}$$

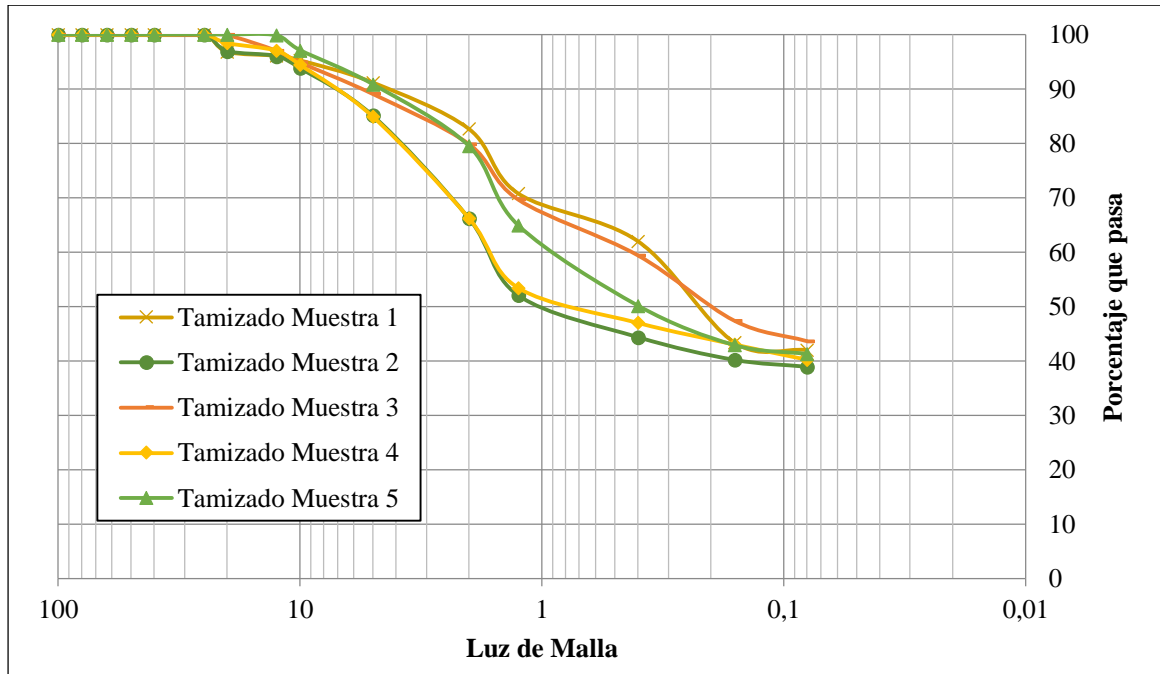
Los porcentajes de grava, arena, finos y la clasificación del suelo, se determinó teniendo en cuenta sistema correspondiente según lo establecido en la norma AASHTO y SUCS para cada muestra [77]. Los datos se determinaron realizando los ensayos para cada muestra según los coeficientes C_U y C_C (anexos 7 y 8).

Teniendo en cuenta lo anterior, para que una muestra se considere bien graduada, los coeficientes de uniformidad y de curvatura deben estar entre los rangos $C_U > 6$ y $1 < C_C < 3$, y para que una grava se considere bien graduada, los coeficientes de uniformidad y de curvatura deben estar entre los siguientes rangos $C_U > 4$ y $1 < C_C < 3$.

Los resultados de los análisis se representan en el anexo 9, la cual 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.

La siguiente 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%, por lo cual se supone que las muestras contienen altos porcentajes de materiales desengrasantes y arcillosos. Además, 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 (anexos 7 y 8).

Figura 60. Resultados Clasificación Granulométrica por tamizado para la todas las muestras.



Fuente: Elaboración propia.

Este análisis se utiliza para determinar la eficiencia del proceso de molienda, 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. En la figura 60 se observa que el material tiene una variabilidad alta en los porcentajes de partículas gruesas, por lo cual se deduce que son complicados de extruir. Por lo anterior, se hace necesaria la adición de otras materias primas complementarias para corregir la granulometría de la muestra a fracciones más finas.

Adicionalmente, se realizó el retenido sobre tamiz con el procedimiento que se realiza actualmente por la empresa en donde solo tiene en cuenta el porcentaje de arenas, se tomaron 50 gramos de cada muestra completamente seca, a la cual se le adicione agua, luego se sometió a agitación durante 10 minutos. Una vez realizada esta operación se vierte la mezcla y se pasa en el tamiz ASTM 230 [12] [78][79]. El procedimiento termina cuando el agua a la salida del tamiz este completamente clara, posteriormente la mezcla retenida se dejó secar en la estufa hasta que estuviera sin humedad, de lo que se obtuvieron los siguientes resultados (tablas 19 y 20):

Tabla 19. Retenido sobre tamiz en malla ASTM 230. Datos ladrillera Ocaña.

Arcillas de la ladrillera Ocaña					
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

Fuente: Elaboración propia.

Las muestras presentaron una granulometría gruesa, como se puede observar en la tabla 19, donde se aprecian rangos de arena en porcentaje entre 38 y 52 %, por lo que son consideradas arcillas de baja plasticidad.

Adicionalmente se realizó el procedimiento para las muestras recolectadas de las fabricas artesanales zonas cercanas que producen ladrillos macizos.

Tabla 20. Retenido sobre Tamiz en malla ASTM 230. Datos de las fábricas artesanales de las zonas cercanas.

Arcillas de las Zonas 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

PP=Pasta de Producción, AB= Arena Blanca y AR= Arena Roja, el peso inicial (Wi) y el peso final (Wf)

Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de las muestras de la tabla 20, 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 Otros suelos arenosos por sus porcentajes de arena que oscilan entre 30 y 63 %.

8.2.2.1.2. Análisis granulométrico por hidrómetro

El análisis se realizó siguiendo la metodología propuesta por la norma INV E-124 “Análisis granulométrico por medio del hidrómetro” y la norma ASTM D422 [80] [81]. La muestra se pasó por malla N°200 para obtener 50 gramos de muestra tamizada y seca, a esta se le adicionan 200 mililitros de agua y 50 mililitros de Hexametafosfato (agente defloculante).

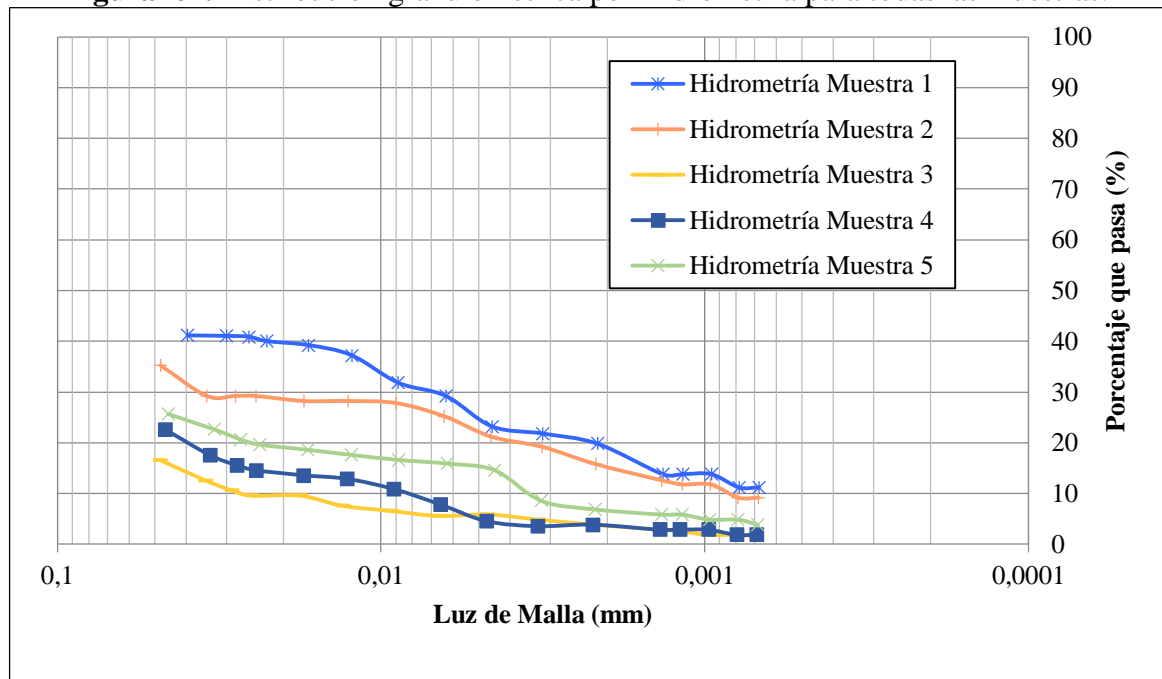
La suspensión resultante se deja reposar durante un tiempo mínimo de 1 hora. La mezcla se transfiere a una agitadora eléctrica por 10 minutos. La mezcla se transfiere al hidrómetro y se afora a 1000 ml, se agita durante 60 segundos y se deja reposar. Transcurrido este tiempo se toman lecturas con el 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 [82] [78].

Este ensayo permite conocer 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, el cual es indispensable para analizar su comportamiento.

En el anexo 10, 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.

La siguiente figura 61, indica la curva de distribución del tamaño de partículas finas (limo y arcilla) por hidrometría. Todas las muestras presentan bajos porcentajes de partículas finas (Limo y Arcilla), con valores de entre 41 y 19 % que pasa.

Figura 61. Distribución granulométrica por Hidrometría para todas las muestras.

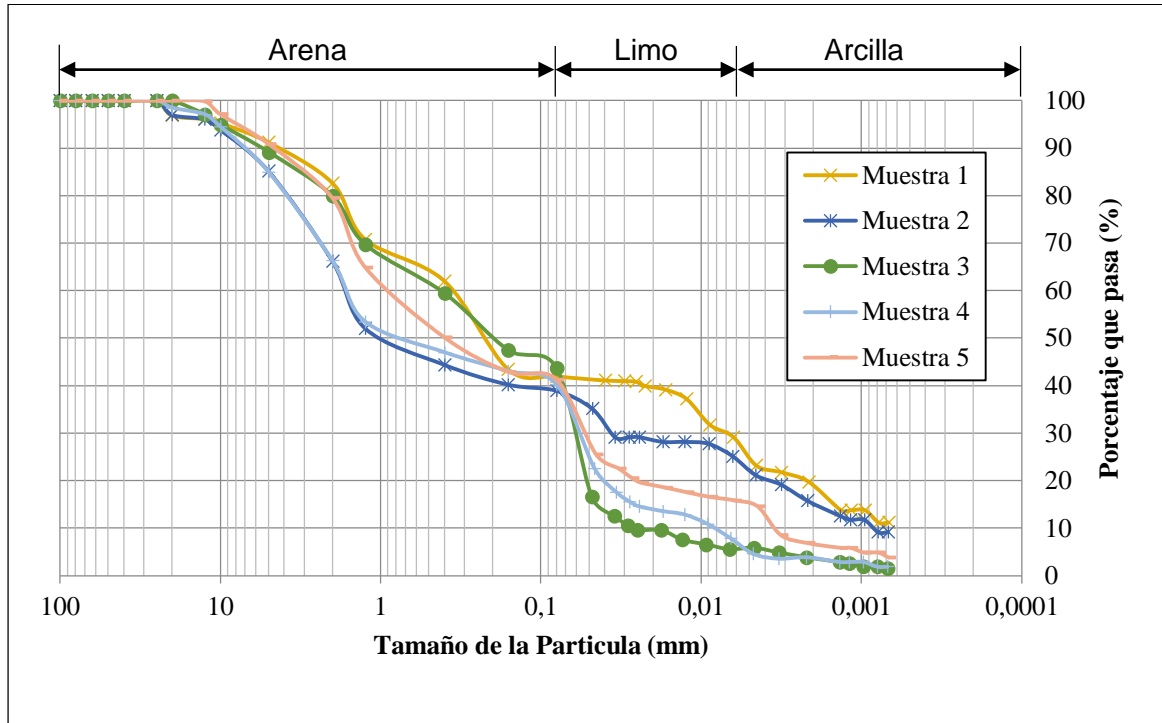


Fuente: Elaboración propia.

A continuación se definen los porcentajes de arenas, limos y arcillas en las detalle, uniendo las figuras 60 y 61 de los análisis tamizado e hidrometría en un solo diagrama, teniendo en cuenta que las partículas con valores hasta 100 milímetros corresponde a gravas, entre 100 y

0,08 milímetros corresponden a arena, entre 0,08 y 0,005 milímetros corresponden a limo y las partículas con diámetro entre 0,005 hasta 0 milímetros corresponden a arcilla. De lo cual se obtuvieron los siguientes resultados:

Figura 62. Grafica granulométrica de tamizado e hidrometría para la clasificación del suelo de todas las muestras.



Fuente: Elaboración propia

De la figura anterior 62 se observa que las arcillas proceden de la formación algodonal dado a la sedimentación del suelo según lo establecido en la investigación realizada por [14], el cual expresa que las arcillas tienen un porcentaje menor al 30%, de donde resulta la siguiente tabla 21 de resultados teniendo en cuenta el tamaño de las partículas para cada muestra:

Tabla 21. Datos Hidrometría por granulometría. Datos UFPSO.

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

A forma de comparación para determinar la veracidad de los datos encontrados en la empresa, se realizó el análisis de hidrometría en los equipos de la empresa, los resultados se detallan en los anexos 11 y 12. Para obtener una validez estadística, el análisis se repitió tres (3) veces para cada muestra, los resultados se observan en la siguiente tabla 22:

Tabla 22. Promedios de hidrometría método de la empresa. Datos Hora Ltda.

Muestra	% Arena	% Limo	% Arcilla
#1	56,00	37,20	6,80
#2	48,64	42,50	8,86
#3	49,31	41,87	8,82
#4	58,00	34,50	7,50
#5	58,00	31,20	10,80

Fuente: Elaboración propia.

Los datos obtenidos entre el método usado por la empresa y el análisis completo realizado por tamizado e hidrometría en los laboratorios de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña (tablas 21 y 22), evidencia que los datos no presentan ninguna similitud siendo de la misma muestra. Debido a que en el primer análisis no tienen en cuenta las grasas ni arenas mientras que el segundo sí. Teniendo en cuenta esta información, los análisis de resultados se llevaran a cabo con los datos presentes en el anexo 10, los cuales brindan alto nivel de confianza debido a que tienen en cuenta todos los parámetros establecidos por la norma.

Habiendo ya definido los porcentajes de arenas, limo y arcilla de las muestras mediante la hidrometría, se procedió a clasificar las muestras según el material, como lo muestra la siguiente tabla 23.

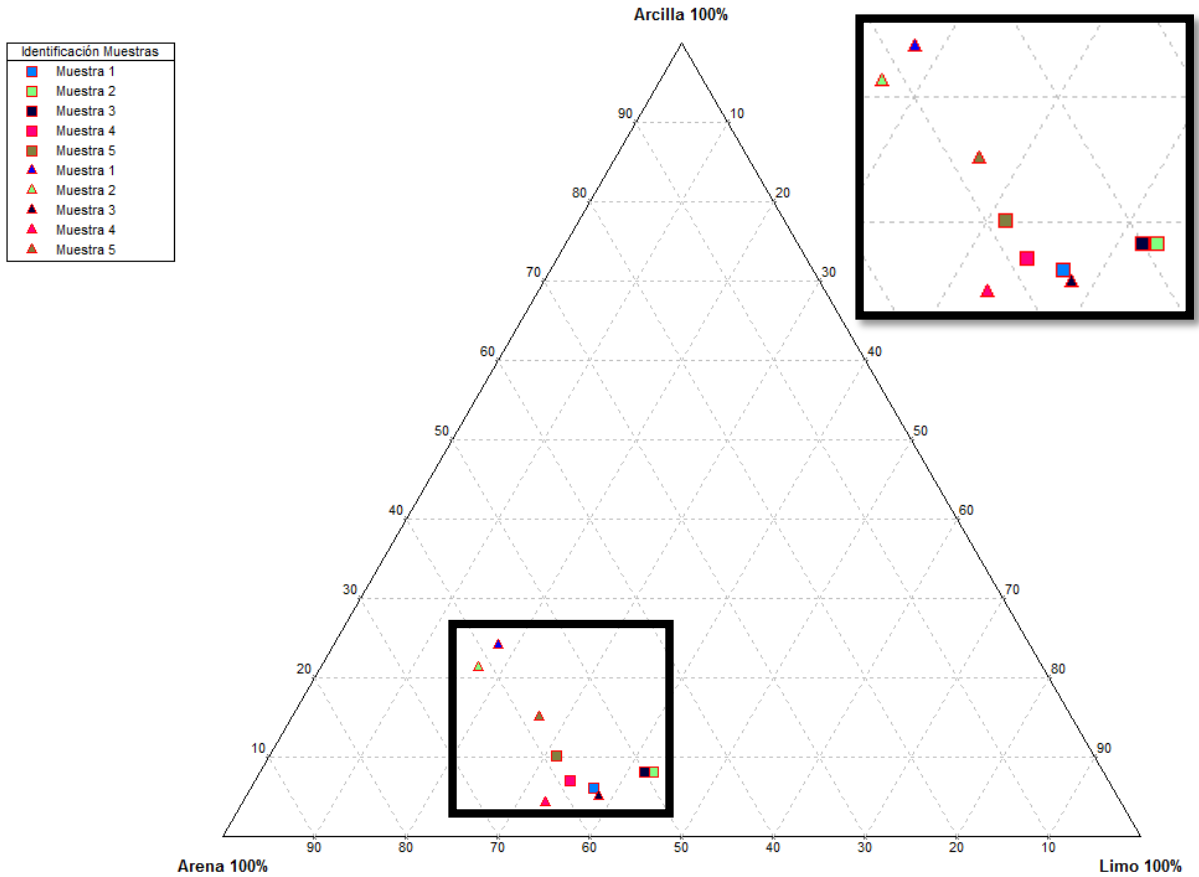
Tabla 23. Porcentajes (Arena-Limo-Arcilla) del diagrama del Winkler.

CLASE DE MATERIAL	ARENA%	LIMO%	ARCILLA%
Arena	80-100	0-20	0-20
Franco - Arenoso	50-80	0-30	0-20
Franco	30-50	30-50	0-20
Franco – Limoso	0-50	50-80	0-20
Limoso	0-20	80-100	0-20
Franco – Arcilloso – Arenoso	50-80	0-30	20-30
Franco – Arcilloso	20-50	20-50	20-30
Franco – Arcilloso – Limoso	0-30	50-80	20-30
Arcillo – Arenoso	50-70	0-20	30-50
Arcillosos – Limoso	0-20	50-70	30-50
Arcilloso	0-50	0-50	30-10

Fuente: [83].

Los datos obtenidos en la tabla 21 y 22, fueron graficados en el diagrama de Winkler con la ayuda del software TripLop (figura 63), en donde se ubicaron los puntos para caracterizar las arcillas, y además comprobar si son aptas para la producción actual que se realiza en la empresa [70] [84]. Asimismo, se identificaron las texturas de la arcilla y tipos de productos que pueden ser obtenidos [85], según la composición, se puede observar en la figura 64 que son suelos Franco-Areno-Arcillosos, que su uso en gran medida para la fabricación de ladrillos macizos y bloques perforados.

Figura 63. Grafica de los puntos de hidrometría en el diagrama de Winkler.

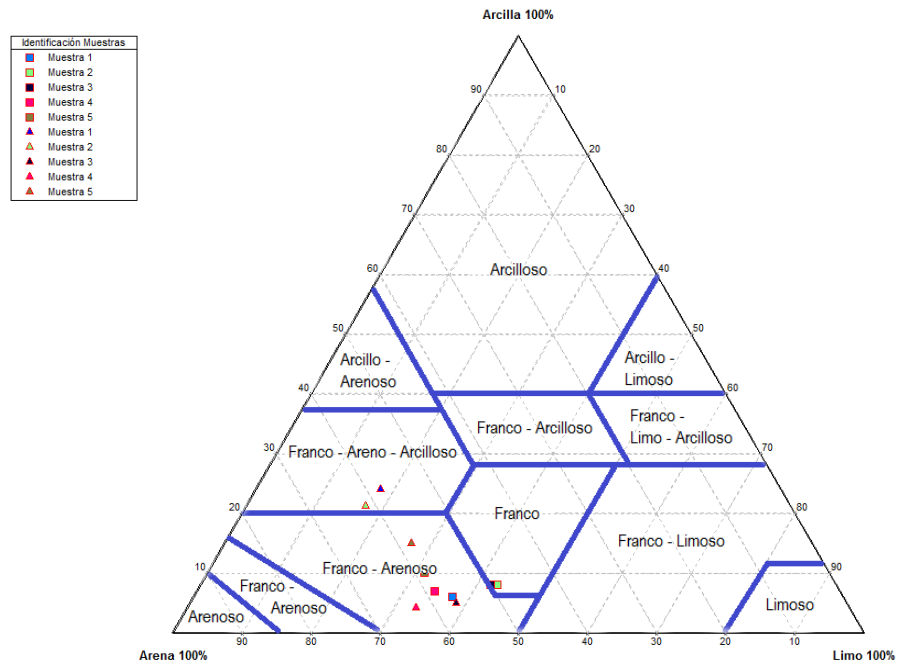


Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, se evidencia notoriamente que los resultados obtenidos en los análisis de hidrometría para las mismas muestras realizados en los diferentes laboratorios (empresa y universidad francisco de paula Santander Ocaña) muestran puntos diferentes. Los puntos en forma de cuadros (■) representan los resultados del análisis realizado en los laboratorios de la empresa y los puntos en forma de triángulos (▲) representan los resultados del análisis realizado en los laboratorios de la universidad francisco de paula Santander Ocaña. Esto se hace evidente dado a los instrumentos de laboratorio utilizados además del proceso en la toma de datos.

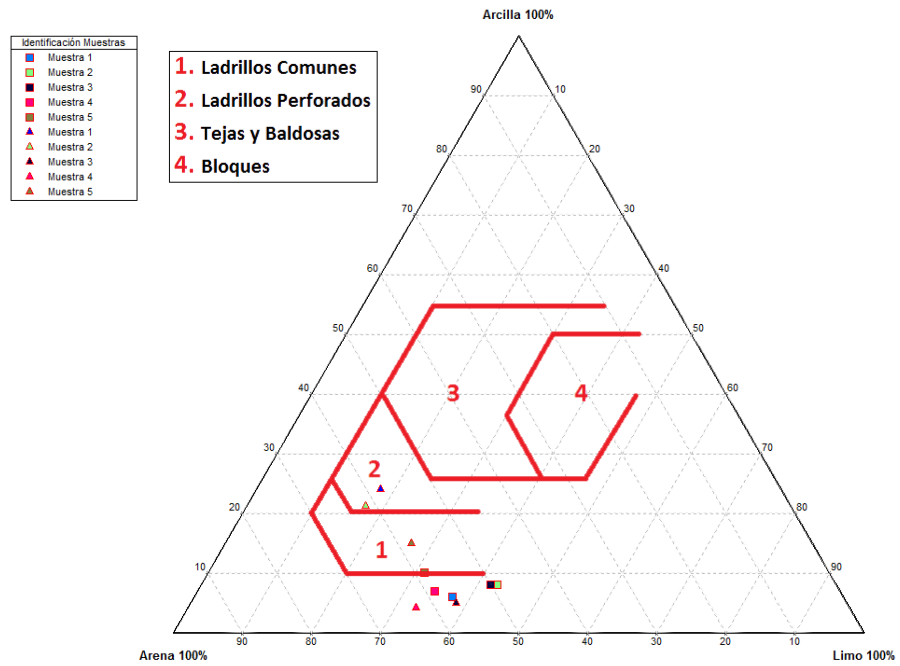
El diagrama de producto de Winkler (figura 65), se usa con la finalidad de determinar el tipo de textura y tipo de producto para que se puedan utilizar en función del contenido de arena, limo y arcilla.

Figura 64. Diagrama de Winkler para tipos de textura.



Fuente: [86]

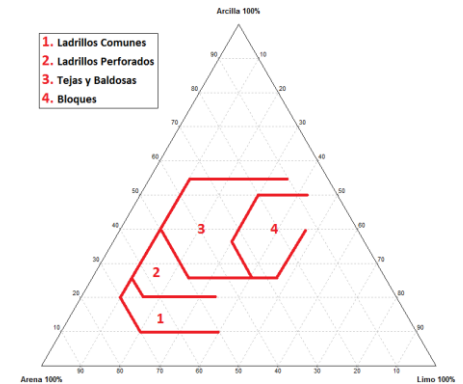
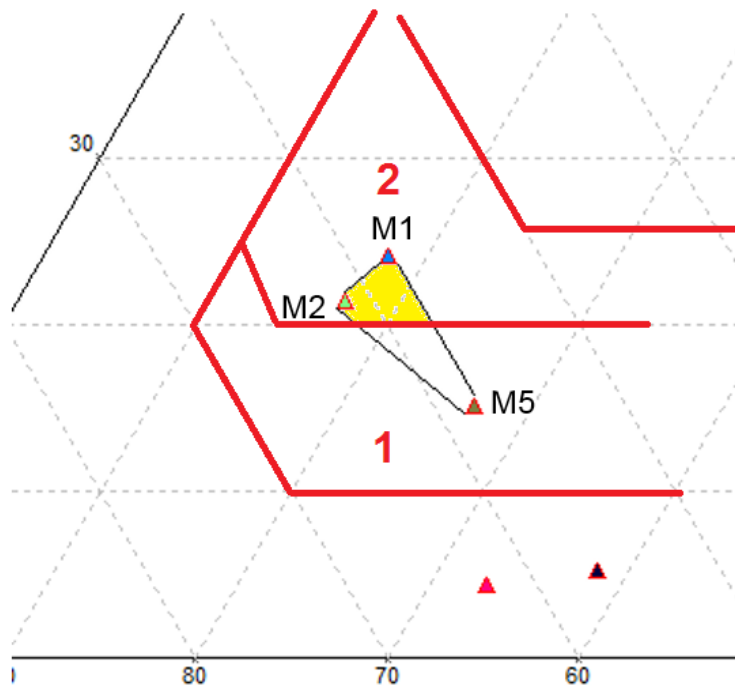
Figura 65. Diagrama de Winkler zonas para el tipo de producto.



Fuente: [86]

Teniendo en cuenta los datos obtenidos, se procedió a ubicar la posible región óptima para la formulación de una mezcla de arcilla que se encuentre en el área de fabricación de bloques perforados, como se observa en la siguiente figura 66:

Figura 66. Posible región óptima para la mezcla.



Fuente: Elaboración propia.

8.2.2.1.3. Evaluación de los resultados obtenidos

Teniendo en cuenta la figura 68, las muestras que se utilizarían para formular una mezcla óptima serían la M1 – M2 y M5. Debido a que la muestra M3 presenta muy baja plasticidad y la muestra M4 presenta características similares a la muestra M2.

Los resultados de textura según el diagrama de porcentajes de Winkler (figura 65), revelan que 2 de las muestras seleccionadas (M1 y M2) están dentro del grupo 2, el cual es recomendado para la fabricación de bloques perforados.

Para poder formular la mezcla óptima de arcilla, esta debe poseer una composición de una región que se encuentre en la zona dos (2) como se muestra en la tabla 28. Donde el punto central de dicha región es de (58,5% Arena – 20,1% Limo – 21,4% Arcilla), y puede variarse en $\pm 2\%$ de cada componente (Arena, limo y arcilla), asegurando siempre que no se salgan de la región.

Tabla 24. Región óptima para la fabricación de bloques

COMPONENTE	PARA LAS MUESTRAS ESTUDIADAS	PARA LA ZONA 2 DE WINKLER
Rango de Arena (%)	58 – 61	50 – 65
Rango de Limo (%)	18 – 23	10 – 30
Rango de Arcilla (%)	20 – 24	20 – 40

Fuente: Elaboración propia.

Además, el porcentaje de la pasta de las muestras debe garantizar una mezcla equilibrada entre las arcillas de diferentes pilas, es decir, que no se agote preferencialmente una de ellas por el uso en gran proporción de solo una. Teniendo en cuenta lo anterior, se realizó un análisis para encontrar una mezcla de arcilla que optimizará la calidad del producto final y el uso de las pilas de arcilla.

Algunas de las muestras, presentaron granos gruesos de en su mayoría como arenas, los cuales deberían ser molidos para que no modifiquen las propiedades técnicas y estéticas del producto final, como pueden ser roturas o mayor absorción de agua.

Según la comparación de los dos análisis de hidrometría realizados (Laboratorio empresa y UFPSO), 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, en donde posteriormente se debe empalmar con los resultados del análisis por hidrómetro y de esta manera calcular los porcentajes correctos presentes en la muestra. Esto conlleva a que en ocasiones se puedan tomar malas decisiones en cuanto a la formulación de la mezcla de arcilla, por lo cual 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 en cuenta los realizados en el laboratorio de la UFPSO.

Los resultados de los ensayos de granulometría indican que la mayoría de las muestras de la empresa poseen un índice promedio de 45% de arena fina teniendo en cuenta la gráfica granulométrica; resultado de gran importancia para la fabricación de las pastas cerámicas, debido a que permite clasificar las muestras como materiales de baja compactación, baja plasticidad, que no deben usarse individualmente para la producción por que tendrán baja resistencia en seco y en cocido, como también alta absorción de agua. Asimismo, la arena es necesaria para la extrusión, debido a que ayuda a disminuir el tiempo de secado y evita la formación de grietas en las piezas

En general las muestras evaluadas presentan altos contenidos de arena, mayores al 25%. Se consideran bajos contenidos de arena aquellos menores del 10%, contenidos medios entre el 10 y 25% y altos por encima del 25%. Los porcentajes de arena idóneos para la fabricación de productos cerámicos extruidos oscilan entre el 16% y un máximo de 35%. Teniendo en cuenta lo anterior, las mezclas no necesitan la adición extra de arena para poderse extruir de manera adecuada.

Un elevado porcentaje de arena es indicio a que las arcillas necesitan mayor temperatura para poder cerrar los poros en la cocción, por lo cual, a bajas temperaturas de cocción darán altas absorciones de agua y bajas resistencia en cocido.

Como resumen se tiene que el porcentaje de arena afecta el proceso cerámico de la siguiente forma: A mayor porcentaje de arena menor contracción de secado, menor dureza de extrusión, menor resistencia en seco, menor contracción en cocido, menor resistencia a la compresión y mayor absorción de agua.

Evidentemente el problema en el proceso de fabricación de bloques se encuentra en el tamaño de las partículas de arena, las cuales son de hasta 2,0 milímetros, por lo en el proceso de trituración y lamido estas no es efectivo obteniendo mala pulverización, lo que hace que el producto final posea características de alta absorción de agua que debilita la resistencia a la compresión como se evidencio en los ensayos tecnológicos.

En conclusión, como se observa no existen arcillas con propiedades inadecuadas, sino mezclas mal formuladas en producción. Para un proceso productivo eficiente y de calidad es necesario diseñar mezclas que cumplan con las exigencias requeridas por las normas. Para el caso estudiado, las mezclas posibles tienen bajos porcentajes de arcilla lo que puede ser una limitante durante el proceso de extrusión de la pasta cerámica.

8.2.2.1.4. Índice de plasticidad.

El análisis se realizó teniendo en cuenta el procedimiento de la norma NTC 4630 y la INV.E – 125 y 126 [87][88][89]. Se tomaron 1000 gramos de muestra pasante malla ASTM No 40 (425 μm) y se subdividen en cuatro muestras de 150 y 200 gramos cada una. Se amasa cada submuestra con la cantidad de agua necesaria para que la consistencia de la masa resultante sea la adecuada para comenzar el ensayo; con el objetivo de completar su homogenización, la masa se deja en reposo durante 24 horas. Una vez transcurrido dicho periodo de tiempo, se amasa nuevamente cada submuestra durante dos minutos y se inicia el ensayo. Con la realización de este ensayo se determinan la cantidad de agua que se le debe adicionar a la mezcla en el proceso de mezclado antes de ingresar a la extrusora [90].

Para determinar el índice de plasticidad del suelo es necesario determinar el límite líquido y el límite plástico de las muestras, el cual será la diferencia entre estos dos valores. En caso que el resultado sea un valor decimal, se aproxima al entero más cercano. En caso de ser cero (0) o menor, la muestra de suelo se asume como “no plástica”. Para actividades de construcción la condición ideal deseada es un límite plástico (LP) elevado y un límite líquido (LL) bajo.

El análisis fue realizado en el laboratorio de suelos de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, donde se obtuvo la siguiente tabla 25 de resultados:

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

Calculo	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Limite Liquido LL (%)	27,42	27,32	22,71	27,25	25,82
Limite Plástico LP (%)	21,91	20,91	21,68	21,00	20,83
Índice de Plasticidad IP (%)	5,51	6,41	1,03	6,26	4,99

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 25, refleja los valores obtenidos en el estudio de suelo para calcular el índice de plasticidad y demás variables. Se evidencia la presencia de bajos valores de índice de plasticidad (IP), que provoca a un cambio rápido (en términos de agua adicional) de un comportamiento semi-sólido a uno líquido lo que afecta al conformado del producto en la extrusora, este resultado se determina por la cantidad de partículas mayores a 2 milímetros 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.

Estos resultados están en concordancia con los análisis granulométricos de las arcillas presente en la figura 63; cumpliéndose que, un mayor contenido de partículas finas implica mayor contenido de material arcilloso y mayor área superficial, y por lo tanto mayor plasticidad (Como es el caso de las Muestras 2 y 4). Por el contrario, un mayor tamaño de partícula está relacionado con mayor contenido de material desgrasante y por tanto, menor plasticidad (caso de la Muestra 3).

La plasticidad de las arcillas puede ser cuantificada mediante la determinación de los índices de Atterberg, referentes al límite líquido y plástico. Estos límites marcan una separación arbitraria entre cuatro estados de comportamiento de un suelo que son: sólido, semisólido, plástico y semilíquido o viscoso, debido a los porcentajes de arenas, limos y arcillas de las materia prima que son cambiantes. Teniendo en cuenta lo anterior, las muestras analizadas presentan bajos porcentajes de plasticidad (límite líquido de aproximadamente entre 25,82 y 27,42 %), demostrando propiedades desgrasantes en la mezcla de arcilla que concuerdan con los resultados granulométricos de las muestras para fabricación de bloques. En general, cuanto más pequeñas son las partículas y su estructura es imperfecta, la mezcla se coloca 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.

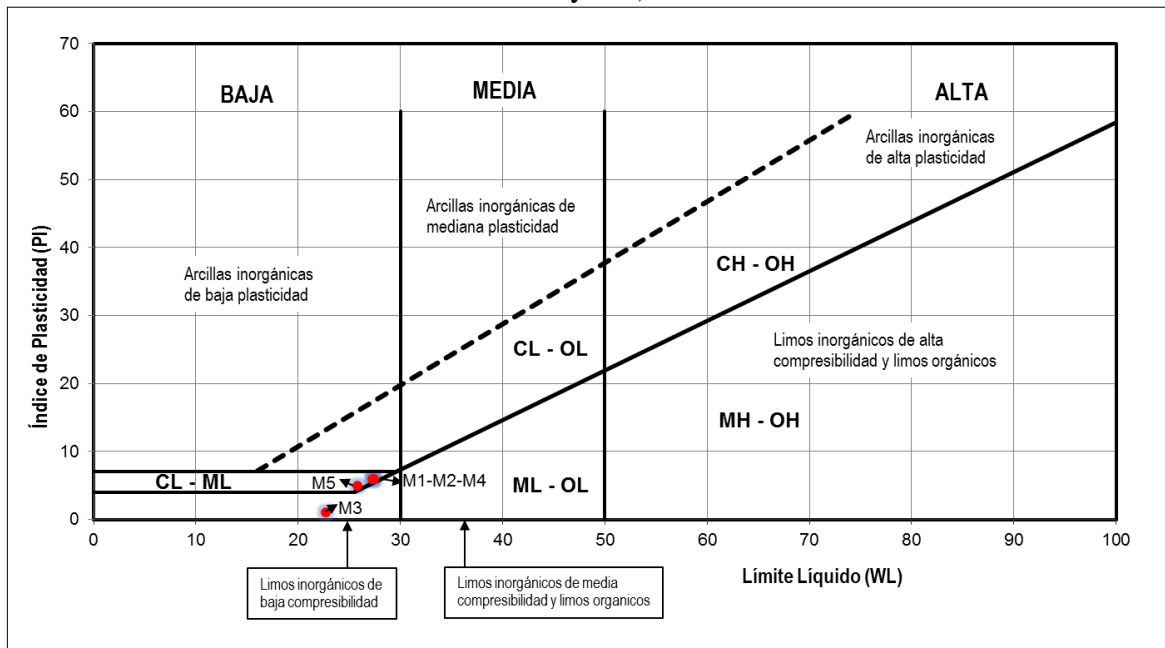
Por otro lado, el porcentaje de agua de conformado para las muestras seleccionadas está dentro de los rangos establecidos para las arcillas en la fabricación de productos extruidos. En donde según el índice de plasticidad se consideran rangos normales entre el 15 y 22%.

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 [91] con la finalidad de seleccionar suelos adecuados que posean las propiedades óptimas que faciliten el tratamiento de la muestra.

A continuación, en la figura 67 se muestra la representación gráfica del Índice de Plasticidad (LP) y Limite Líquido (LL), teniendo en cuenta los índices de Atterberg. Este diagrama es utilizado para determinar el porcentaje de agua que debe ser aplicada a la pasta cerámica para su conformación:

Figura 67. Plasticidad en el diagrama Casagrande para todas las muestras (M1, M2, M3, M4 y M5).



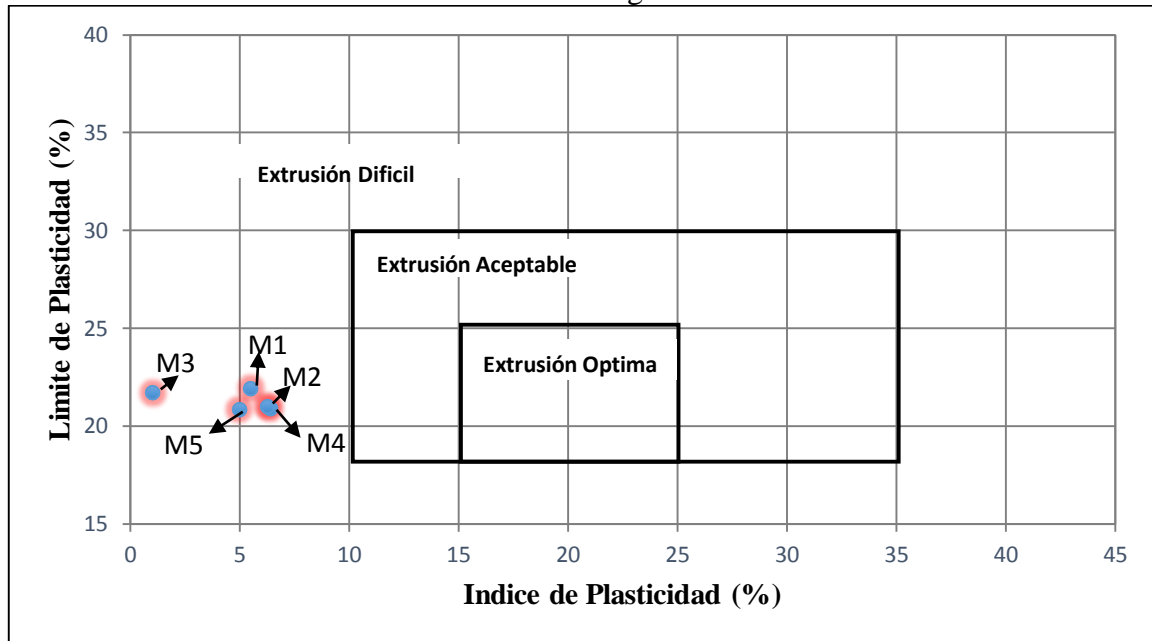
Fuente: Elaboración propia.

De la figura 67, se pueden observar 6 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. Todas las muestras se encuentran en la zona CL – ML, sabiendo que (ML, son limos inorgánicos y arenas muy finas, limos limpios, arenas finas, limosas o arcillosas, o limos arcillosos con ligera plasticidad. – CL, son arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas), las cuales se consideran como muestras arenas-arcillo-limosas con algunas o pocas gravas de baja plasticidad (anexo 7). Por lo tanto el índice de plasticidad (IP) demuestra que las muestras son arcillas de baja plasticidad (Limos 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, según lo establecido en la investigación realizada por [92].

El índice de plasticidad de la muestra 3 es muy bajo, esta no absorbe el agua suficiente para que la arcilla adquiriera la plasticidad necesaria, lo que la convierte en una materia prima desgrasante (no plástica). Las otras muestras se ubicaron en el rango de arcillas de baja plasticidad, con índice de menores al 10%, por lo cual se pueden considerar como apropiadas para la fabricación de cerámicos de construcción [93].

Con el índice y límite de plasticidad, se puede predecir la calidad de la extrusión de las muestras [14][94], teniendo en cuenta la figura 68, se puede concluir que las muestras M1, M2, M3, M4 y M5 se consideran de compleja extrusión, debido a que ninguno punto del diagrama se encuentra en las zonas establecidas de la relación del límite plástico y el índice de plasticidad. Además, es importante mencionar que existe la posibilidad de añadir diferentes aditivos (Sílice, Alúmina, etc.) que promuevan la mejora en la facilidad de extrusión de la arcilla.

Figura 68. Diagrama de predicción de la extrusión y/o moldeo a través de los Límites de Atterberg



Fuente: Elaboración propia.

9. DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE LA MEZCLA ÓPTIMA.

En el desarrollo del diseño de mezclas, se utilizó el software estadístico Stargraphics Centurion, en donde se trabajó con dos y tres variables independientes, relacionadas entre sí, mediante el coeficiente de correlación múltiple [48], en un análisis de regresión múltiple. Teniendo en cuenta que ninguna de las muestras presentó más de 20% de dispersión (coeficiente de variación), se estableció que el modelo lineal fue el que más se ajustó en la realización del diseño de experimentos con mezclas de diferentes características.

Para que un diseño de mezclas funcione, se debe tener representatividad de todo el dominio experimental, y la mejor forma de hacerlo es escogiendo proporciones de los componentes uniformemente espaciados, de tal manera que las proporciones abarquen valores desde 0 a 100%. Esto cumple con los requerimientos del método simplex que fue el utilizado para el análisis con tres de las muestras de arcillas existentes [95].

Según la información obtenida en los ensayos de laboratorio, se propuso una ventana de proceso para cada mezcla, es decir, los valores mínimos y máximos de las variables que influyen en las propiedades apropiadas 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 llevaron a cabo los diseños experimentales de dos y tres factores (muestras) teniendo en cuenta la cantidad de muestras viables para la formulación de la mezcla óptima.

9.1. Obtención de la mezcla a nivel laboratorio

Luego de conocer las variables que intervienen en el proceso (sección 7.2) y obtener los datos necesarios (sección 8.2.2), se procedió a realizar los correspondientes ensayos no destructivos (tamizado, hidrometría e índice de plasticidad) con sus análisis físico-cerámicas requeridas [18]. Teniendo en cuenta que M equivale a muestras y m a mezclas.

9.2. Determinación de las mezclas óptimas con base a dos muestras de arcilla.

Se determinaron teóricamente las mezclas de las arcillas plásticas (M1 y M2) con la arcilla arenosa (M5) de acuerdo al diseño experimental de mezclas como se explicó en la sección 9. De todas las mezclas posibles se seleccionaron las muestras M1 y M5, debido a que su composición de arenas, limos y arcillas se encuentran dentro de la región determinada 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 puede ver en la siguiente tabla 26 de resultados:

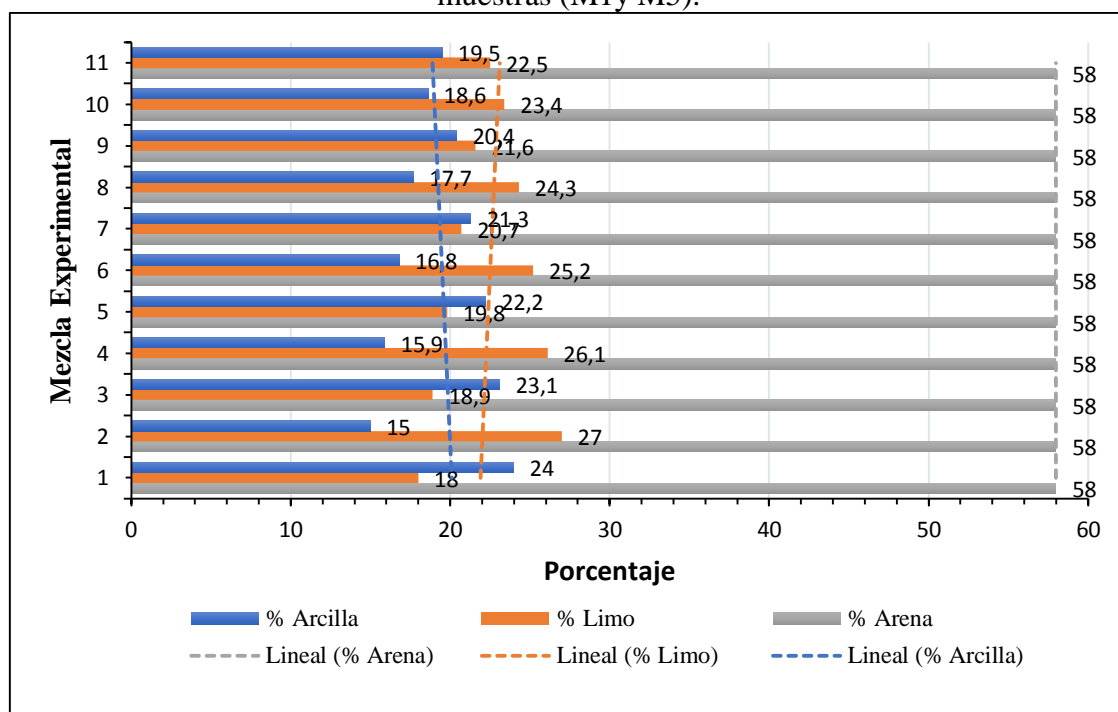
Tabla 26. Diseño de dos mezclas de arcilla para dos muestras (M1 y M5).

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.

A continuación en la figura 69, se detallan gráficamente los resultados del diseño experimental de las mezclas.

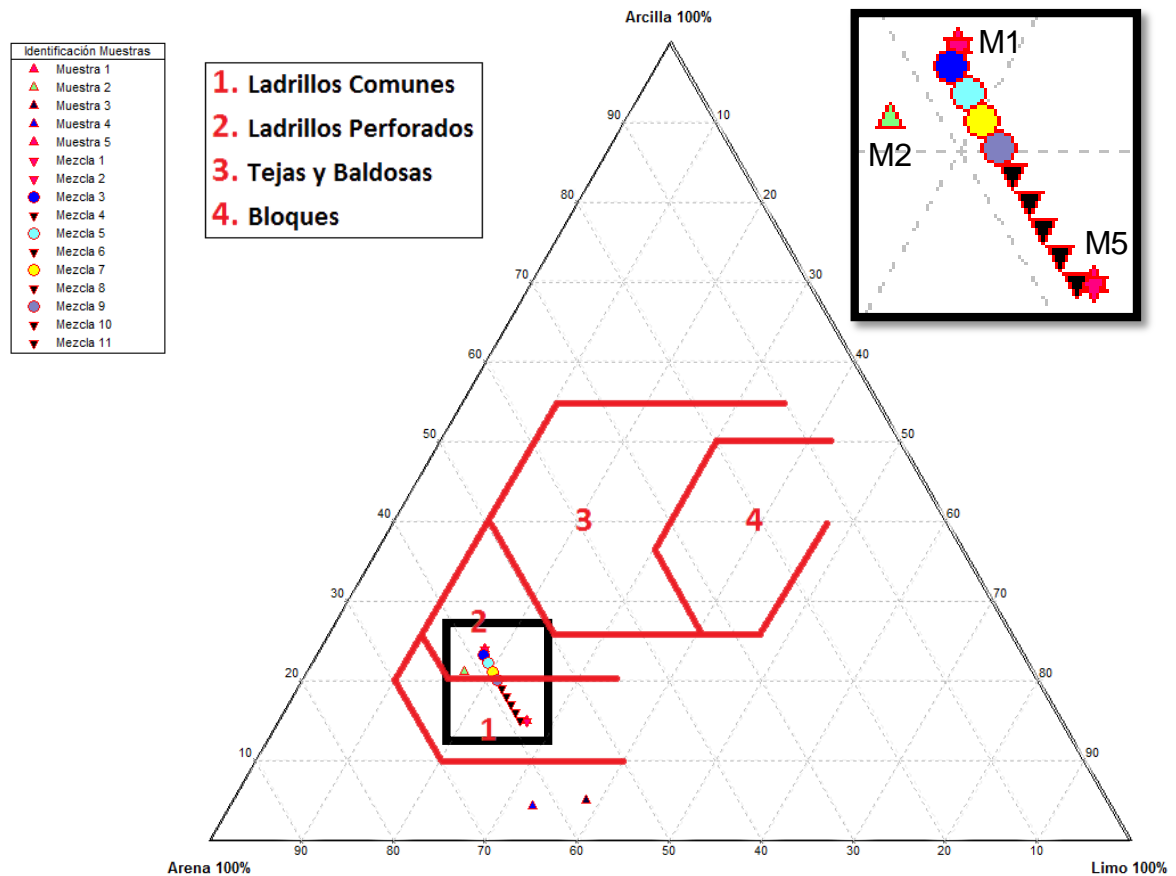
Figura 69. Representación gráfica de los resultados del diseño de experimentos para dos muestras (M1 y M5).



Fuente: Elaboración propia.

Se realizó la representación gráfica de las mezclas obtenidas experimentalmente en el diagrama de Winkler, como se observa en la siguiente figura 70:

Figura 70. Grafica de los puntos en el diagrama de Winkler para la mezcla de dos muestras (M1 y M5).



Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta la tabla 26, se puede observar que la formulación de mezcla m7 se acerca al porcentaje estimado óptimo (centroide de la región) y mantiene un equilibrio en la relación (70-30) entre las materias primas de la empresa. Las mezclas m3, m5 y m9 podrían ser buenas formulaciones 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 o se encuentran en los límites de la región dos (2) lejos del centroide.

9.3. Determinación de las mezclas óptimas con base a tres muestras de arcilla.

Teniendo en cuenta lo encontrado en la sección 9.2, una tercera (M1, M2 y M5) muestra para el diseño de la mezcla también está próxima a los valores del centroide de la región dos (2) con una composición 58,5% Arena – 20,1% Limo – 21,4% Arcilla, con la finalidad de garantizar el equilibrio de los recursos de materia prima existentes en la empresa. Posteriormente, se realizó la proyección de las diferentes mezclas posibles, utilizando el software estadístico Stargraphics Centurion, de donde se obtuvo la tabla 27 de resultados:

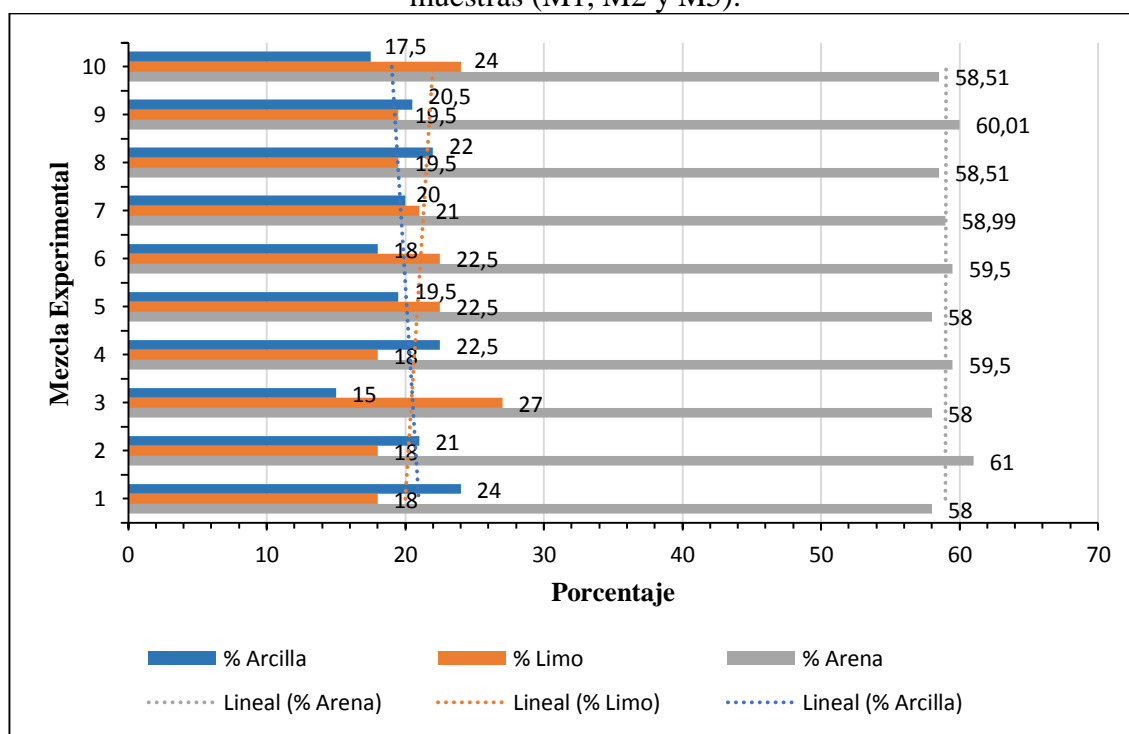
Tabla 27. Diseño de tres mezclas de arcilla para tres muestras (M1, M2 y M5).

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

A continuación en la figura 71, se detallan gráficamente los resultados del diseño experimental de las mezclas.

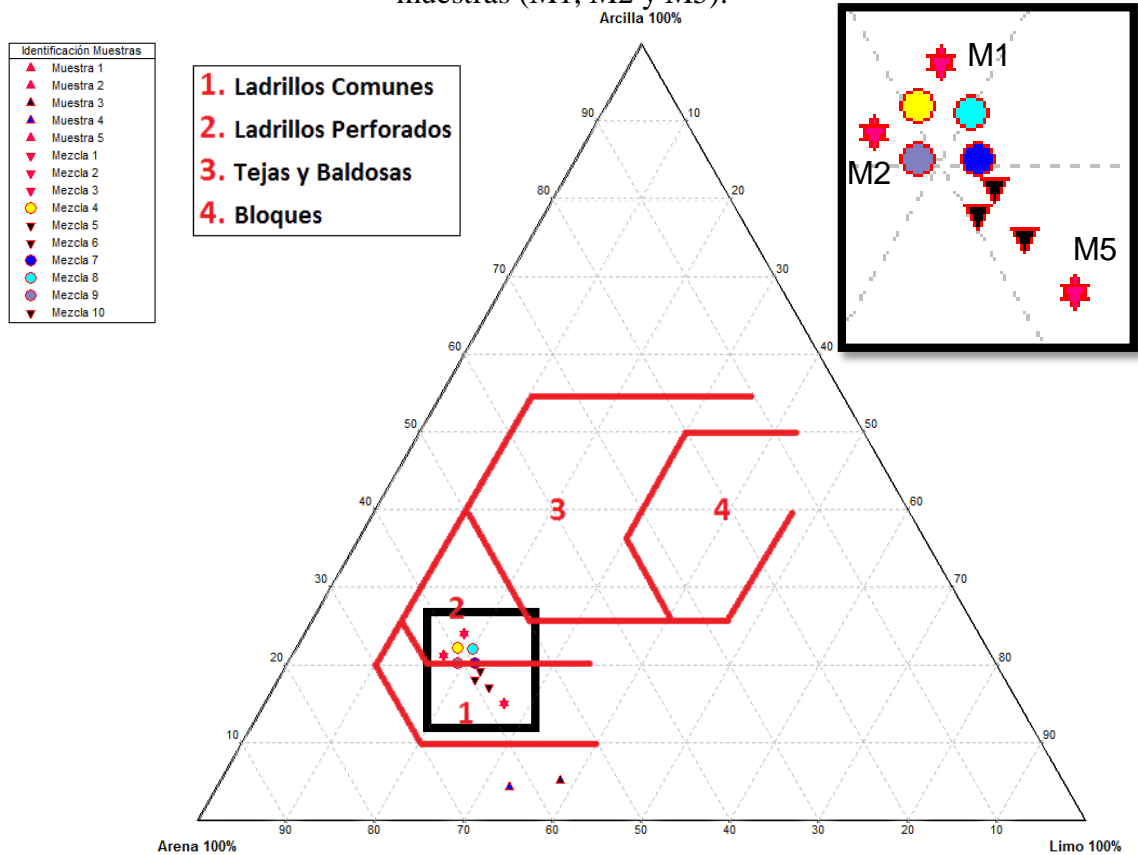
Figura 71. Representación gráfica de los resultados del diseño de experimentos para tres muestras (M1, M2 y M5).



Fuente: Elaboración propia.

Se realizó la representación gráfica de las mezclas obtenidas experimentalmente en el diagrama de Winkler, como se observa en la siguiente figura 72:

Figura 72. Grafica de los puntos en el diagrama de Winkler para la mezcla de tres muestras (M1, M2 y M5).



Fuente: Elaboración propia.

Para efectos de comparación en la anterior tabla 27, se describen las composiciones de las muestra M1, M2 y M5, de las cuales se escogieron las mezclas m7 y m8 debido a su porcentajes de arena, limo y arcilla que se aproximan al centroide de la región establecido experimentalmente (58,5% Arena – 20,1% Limo – 21,4% Arcilla). Del diseño de mezclas se pudo concluir que:

- Las formulaciones de mezcla m1, m2 y m3 no se tuvieron en cuenta debido a que se encuentran de forma pura, es decir que no se mezclan con otras muestras.
- Las formulaciones de mezcla a base de dos (M1-M2, M1-M5 y M2-M5) muestras m4, m5 y m6 no se tuvieron en cuenta porque no cumplen con las especificaciones de la región dos (2) del diagrama de Winkler en cuanto a porcentajes de composición.
- Y las formulaciones de mezcla a base de tres (M1, M2 y M5) muestras m7, m8, m9 y m10, de donde se seleccionaron las mezclas m7 y m8 porque se encuentran en la región óptima. Para el caso de las muestras m7 y m9 pero poseen un su porcentaje lejano al del centroide de la región. La muestra 10 se encontró fuera de los rangos permisibles de arcilla por lo que no te tuvo en cuenta.

A las dos mezclas seleccionadas (m7 y m8) se le realizaron los ensayos físico cerámico, con la finalidad de analizar sus características y de esta manera establecer la ventana del proceso productivo para la formulación adecuada.

9.4. 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% resultado de los análisis de tamizado e hidrometría, por lo que se hace difícil establecer una correlación entre las tres variables que son arenas, limos y arcillas.

Se realizó una nueva propuesta de mezclado teniendo en cuenta el diagrama de Winkler y los resultados obtenidos de los análisis de composición química, granulométrica y plástica de tres muestras (M1, M2 y M5), no se utilizó M3 y M4 debido a su plasticidad es negativa. Por ser la muestra M1 una arena limo-arcillosa, con plasticidad baja y alto contenido de sílice, se empleó en la mezcla como un material desgrasante con el fin de ajustar la plasticidad de la pasta. Por otra parte, la muestra M2 es una arcilla inorgánica de baja plasticidad (LL=50,21%), con un contenido de sílice de 69,6%, alúmina de 8,12% y óxido de hierro de 5,89%, por lo que se caracteriza como un material de mejor ajuste a la composición química óptima para la construcción de ladrillos.

Se seleccionaron como mezclas óptimas las mezclas m7 y m8, con porcentajes cercanos a los establecidos para poder entrar a la zona 2 del diagrama de Winkler, se obtuvieron los siguientes resultados de análisis de laboratorio:

9.5. Caracterización físico cerámica

La caracterización físico-cerámica se realiza con la finalidad de observar el comportamiento del material en la etapa de secado, determinando principalmente la velocidad de contracción de la muestra a las diferentes temperaturas seleccionadas y relacionando las pérdidas por secado con el porcentaje de contracción en seco de las probetas conformadas [96] [97] [98].

Se conformaron probetas por el proceso de extrusión, pasando por las diferentes etapas a nivel de laboratorio, simulando el proceso industrial de fabricación de un producto cerámico tradicional. Estos ensayos fueron analizados en el laboratorio del Centro de Investigación de Materiales Cerámicos CIMAC de la Universidad Francisco de Paula Santander Cúcuta.

Para la realización de los análisis las muestras seleccionadas fueron determinadas según las proporciones del diseño de experimentos, teniendo en cuenta la siguiente tabla 28:

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

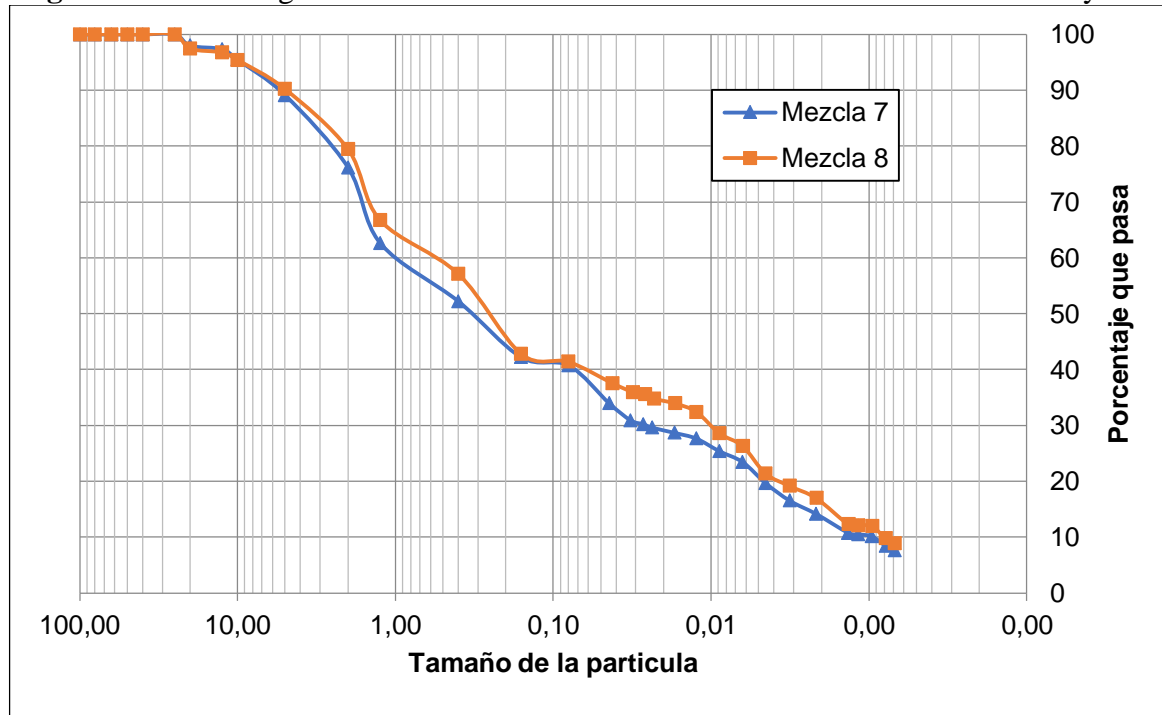
Muestras Mezclas	M1	M2	M5	Total
m7	10 Kilogramos	10 Kilogramos	10 Kilogramos	30 Kilogramos
	33.33%	33.33%	33.33%	
m8	20 Kilogramos	5 Kilogramos	5 Kilogramos	30 Kilogramos
	66.67%	16.66%	16.66%	

Fuente: Elaboración propia.

9.5.1. Retenido sobre tamiz e hidrometría.

Se procedió a realizar el análisis de retenido de tamiz e hidrometría para calcular los porcentajes de arena, limos y arcillas de las mezclas seleccionadas, como también el cálculo del índice de plasticidad, obteniendo los siguientes resultados (figura 73):

Figura 73. Grafica granulométrica de Tamizado e Hidrometría de las mezclas m7 y m8.



Fuente: Elaboración propia.

De la figura 73 se obtuvieron los siguientes resultados esperados según lo determinado experimentalmente:

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, las mezclas pertenecen al tipo de suelo Franco-Arcillo-Limoso, estando además en la región dos (2) para la fabricación de productos perforados y en los rangos establecidos para la fabricación de productos cerámicos.

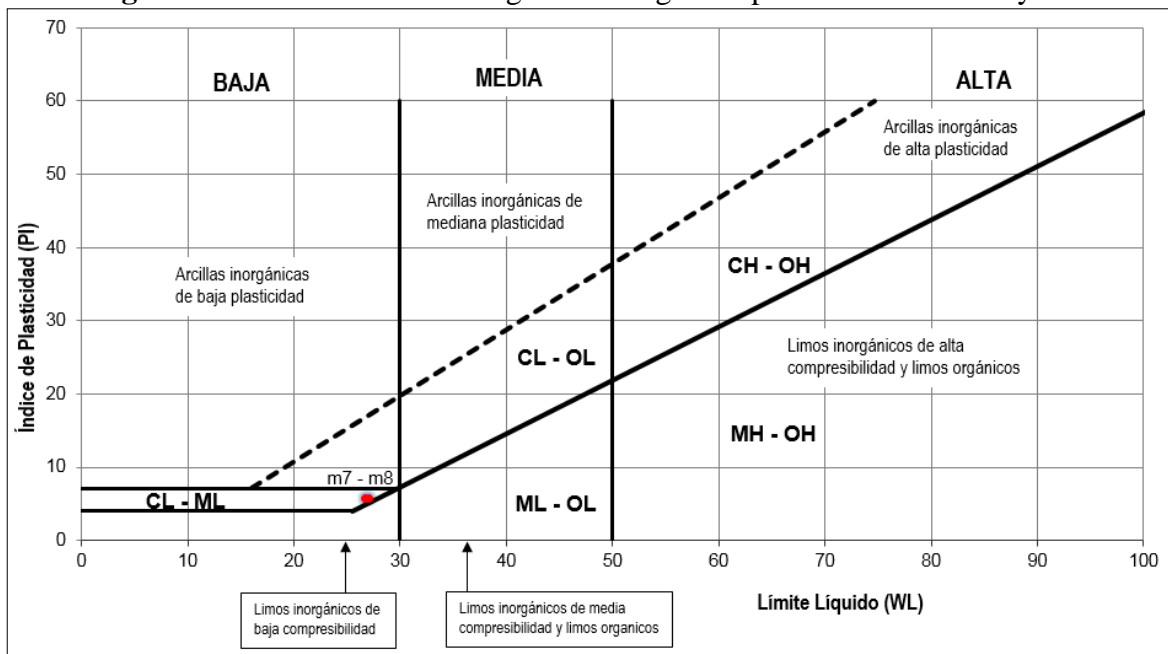
Tabla 30. Cálculo del índice del tipo de suelo para las mezclas m7 y m8.

CALCULO	MEZCLA m7	MEZCLA m8
Limite Liquido LL (%)	26,85	27,13
Limite Plástico LP (%)	21,21	21,56
Índice de Plasticidad IP (%)	5,64	5,57

Fuente: Elaboración propia.

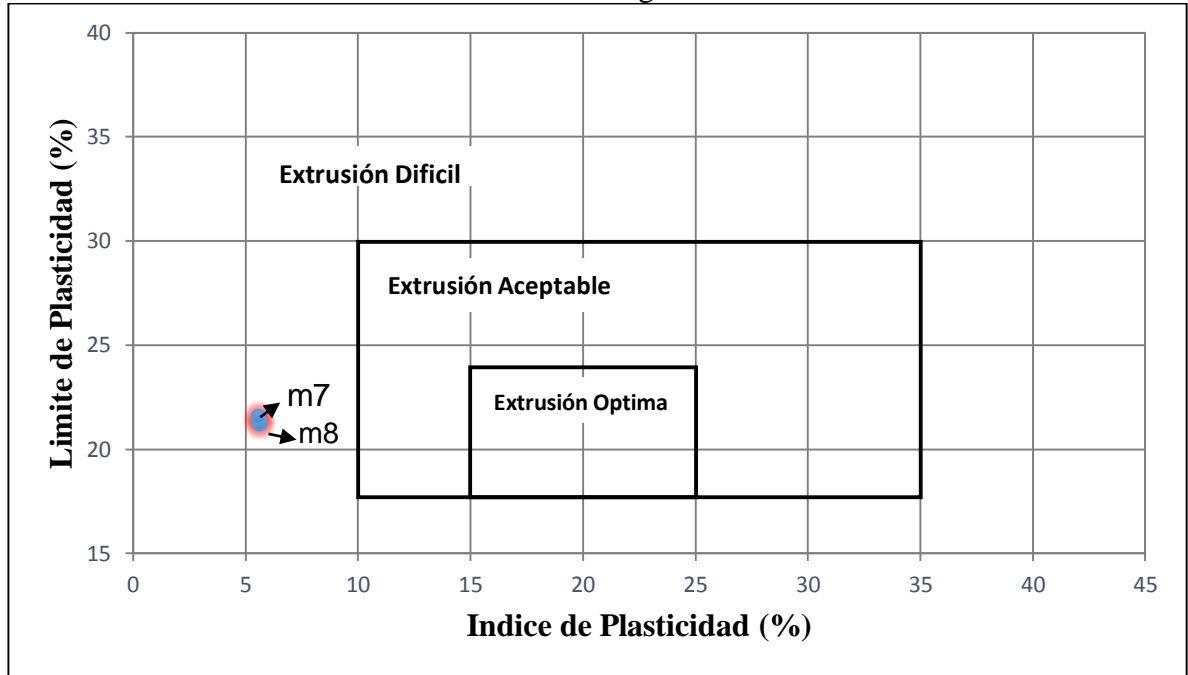
Teniendo en cuenta la tabla 30 se grafica en el diagrama de Casagrande (figura 74) y el de predicción de extrusión (figura 75) los valores del límite líquido e índice de plasticidad para determinar el porcentaje de agua que debe ser aplicada a la pasta cerámica para su conformación:

Figura 74. Plasticidad en el diagrama Casagrande para las mezclas m7 y m8.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 75. Diagrama de predicción de la extrusión y/o moldeo a través de los Límites de Atterberg.



Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta la tabla 30 y las figuras 74 y 75, se considera que las mezclas de arcilla son de compleja extrusión debido a su bajo índice de plasticidad que además se encuentra en la zona CL-ML.

9.5.2. Conformado del material

El conformado de las mezclas m7 y m8, se realizó por el método de extrusión, debido a que es el utilizado por la empresa. En la tabla 31 se pueden apreciar los parámetros obtenidos por el laboratorio:

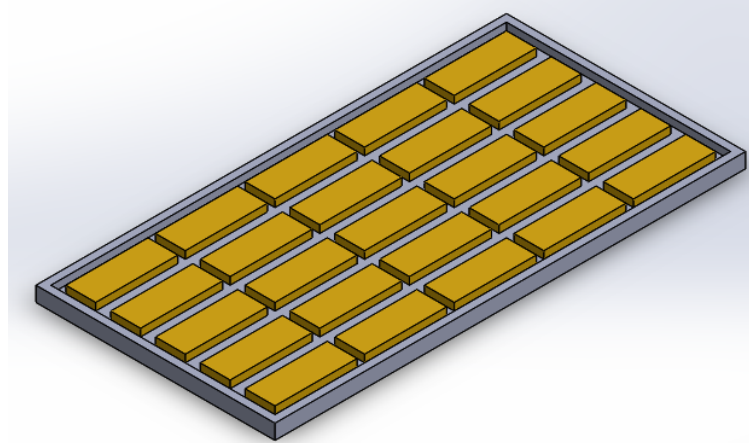
Tabla 31. Condición de las mezclas para el conformado.

PARÁMETRO	VALOR PARA m7	VALOR PARA m8
Humedad Inicial (%)	3,60	2,68
Masa de Agua (gramos)	3871	3523
Masa de la Muestra (gramos)	15800	15800
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 probetas de geometría rectangular de 11 cm de longitud por 4 cm de ancho y 1 cm de espesor. El análisis y conformación de las muestras se llevó a cabo mediante los procedimientos establecidos en el laboratorio CIMAC (figura 76).

Figura 76. Conformación de las probetas en el laboratorio.



Fuente: Elaboración propia.

El secado se realizó durante doce horas a temperatura ambiente y después en estufa de secado desde 60°C ($\pm 5^\circ\text{C}$) hasta 110°C ($\pm 5^\circ\text{C}$), con una velocidad de calentamiento de 10°C/hora y una vez alcanzada esta temperatura se mantuvo durante veinticuatro (24) horas de secado.

9.5.3. Contracción lineal

Este análisis se realizó con la finalidad de determinar principalmente la velocidad de contracción de la muestra a las diferentes temperaturas seleccionadas y relacionando las pérdidas por secado con el porcentaje de contracción en seco de las probetas conformadas en el laboratorio.

La contracción se midió por diferencia de peso y dimensiones en secado y en cocido (figura 77). La contracción en secado se realizó a 110°C aproximadamente durante 24 horas. De lo que se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 32. Valores de contracción lineal para las probetas extruidas de la mezcla m7.

Probeta	Temperatura (°C)	Condición Seca		Condición Cocida		Contracción		Perdidas de Masa		Absorción de Agua (%)
		Longitud (mm)	Masa (g)	Longitud (mm)	Masa (g)	Seca (%)	Cocida (%)	Seca (%)	Cocida (%)	
1	1050	112,18	70,58	112,03	67,47	6,059	0,138	26,284	4,406	19,505
2	1000	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	67,7		-0,179		4,277	19,764
5	850	112,14	71,49	112,63	68,6		-0,437		4,043	19,913
6	800	113,19	71,09	113,8	68,5		-0,539		3,636	20,117

Fuente: Elaboración propia.

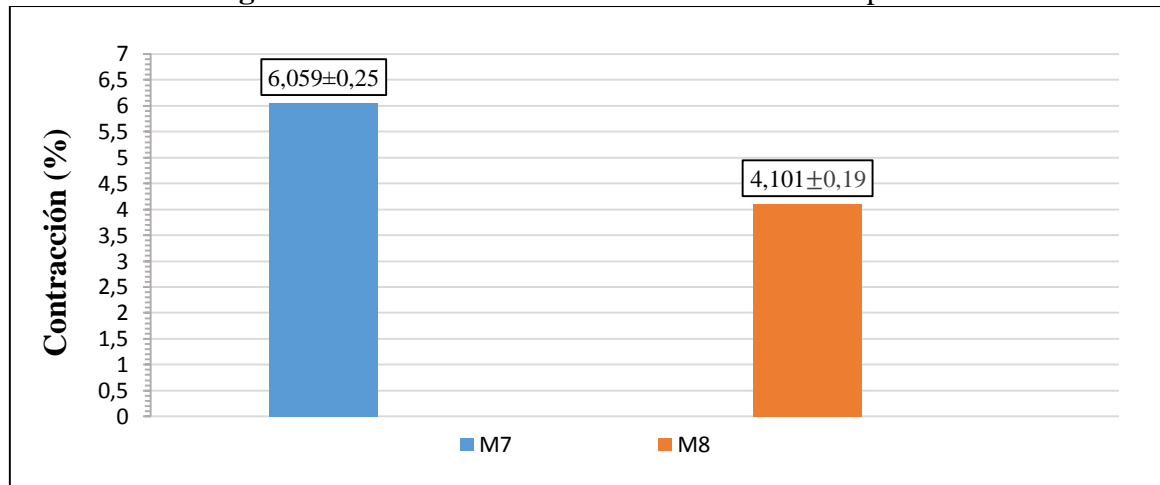
Tabla 33. Valores de contracción lineal para las probetas extruidas de la mezcla m8.

Probeta	Temperatura (°C)	Condición seca		Condición Cocida		Contracción		Perdidas de Masa		Absorción de agua (%)
		Longitud (mm)	Masa (g)	Longitud (mm)	Masa (g)	Seca (%)	Cocida (%)	Seca (%)	Cocida (%)	
1	1050	112,52	72,27	113,47	69,03	4,101	-0,849	24,608	4,490	20,934
2	1000	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.

Teniendo en cuenta las tablas 32 y 33, resulta la figura 77 de la contracción al secado y la figura 78 para contracción lineal en cocción para las mezclas óptimas:

Figura 77. Contracción al secado de las mezclas óptimas.

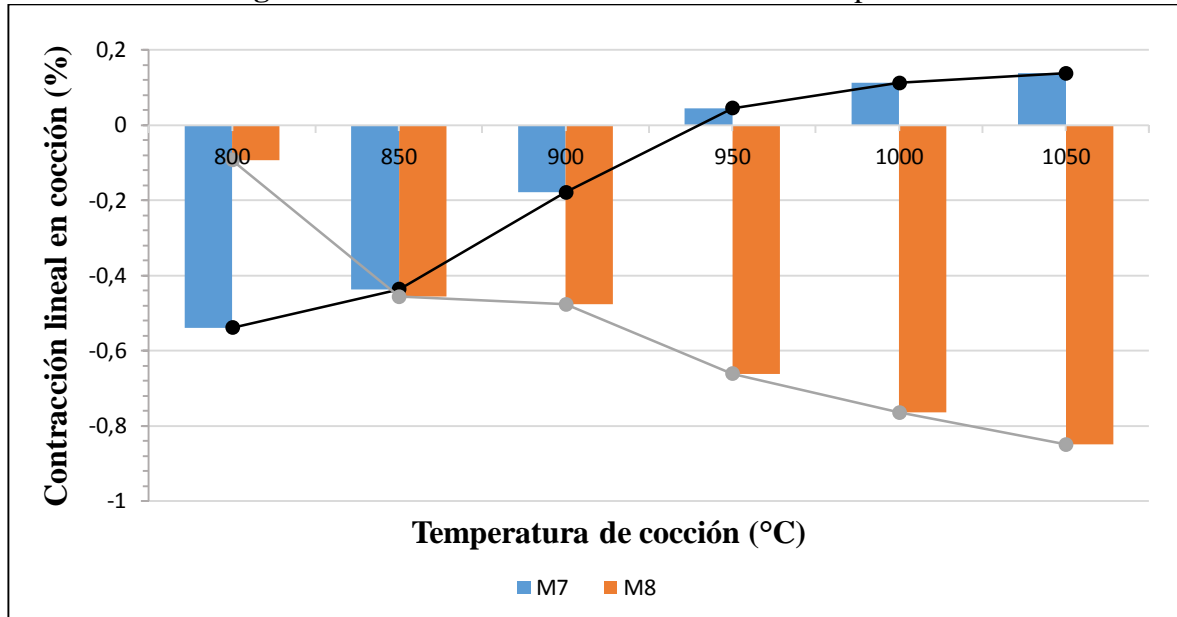


Fuente: Elaboración propia.

Se consideran contracciones normales para una arcilla conformada a aquellas que no superan el 10% para que no se presenten problemas de fisuras y deformaciones en esta etapa del proceso. Teniendo en cuenta este parámetro, las dos mezclas cumplen con la especificación, por lo que se pueden usar en ciclos rápidos de secado.

Posteriormente se realizó la siguiente figura 78 con la finalidad de validar los porcentajes de contracción en función de la temperatura.

Figura 78. Contracción lineal en cocción vs temperatura.



Fuente: Elaboración propia.

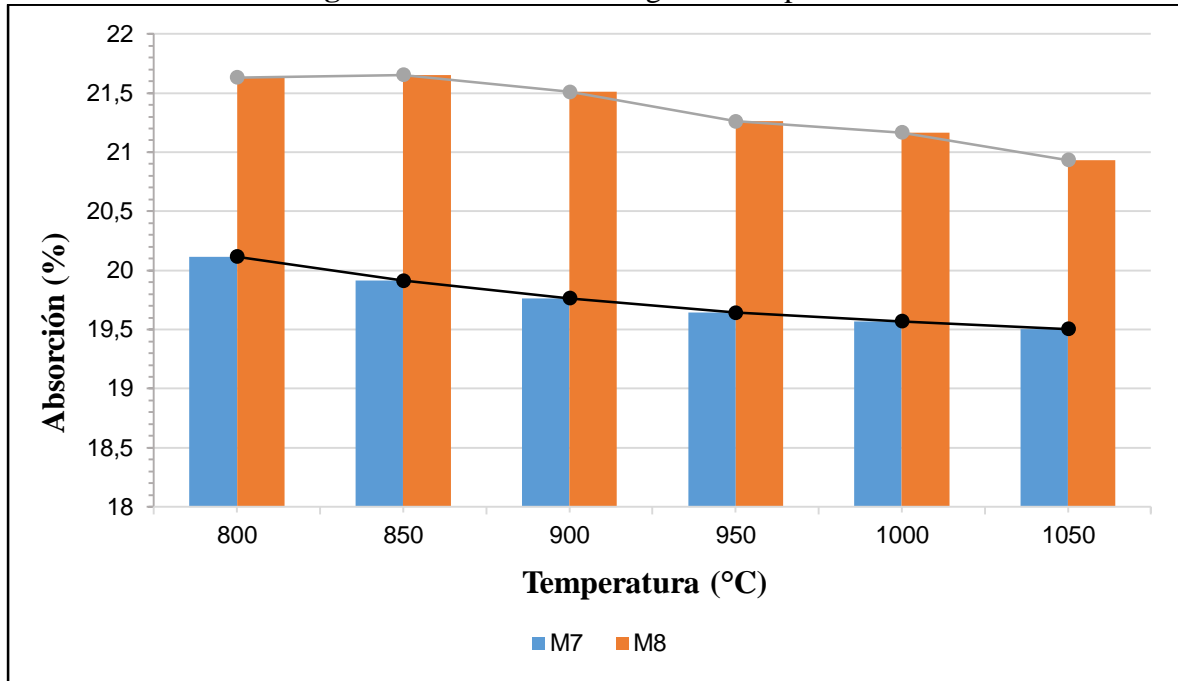
La contracción en cocido no es superior al 2,0% a las temperaturas evaluadas por lo que no se deben presentar problemas de fracturas o deformaciones en la etapa de cocción para el caso de la mezcla m7. Conjuntamente, las pérdidas por calcinación son menores al 10% por lo que tampoco se deben tener problemas 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%.

9.5.4. Absorción de Agua

La absorción de agua es una de las variables más importantes al momento de evaluar una materia prima arcillosa para uso estructural. Los valores máximos de absorción de agua según la norma NTC 4205 deben ser como máximo de 13% para uso interior y 13,5% para uso exterior.

En la siguiente figura 79, se observa el porcentaje de absorción de agua en función de la temperatura de cocción en el laboratorio:

Figura 79. Absorción de agua vs temperatura.



Fuente: Elaboración propia.

De la figura 79, se observan altos porcentajes de absorción de agua lo que se debe a que existe una porosidad abierta de la pieza que varía en función de la temperatura.

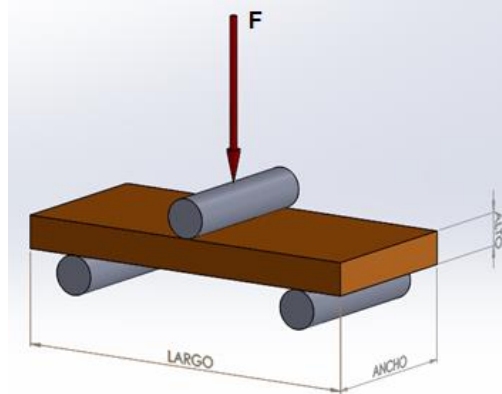
Según los valores establecido por la norma NTC 4205 (máx. 13,5%), ninguna de las muestras cumple esta especificación. Esto se debe a que las partículas de arena son de gran tamaño, donde se encontró que en el proceso de triturado no se obtienen los tamaños de las partículas de arena idóneos (> 2 milímetros), por lo que se tienen altas porosidades y por consiguiente altos porcentajes de absorción de agua (sección 8.1.1.3 y 8.1.1.4).

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 cumple con las especificaciones de la norma NTC 4205.

9.5.5. Resistencia mecánica a la flexión en Cocción.

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. Se llevó a cabo teniendo en cuenta lo establecido por la norma NTC 4321-4 (figura 80) [99].

Figura 80. Resistencia Mecánica a la Flexión y a la carga de rotura.



Fuente: Elaboración propia.

Se determinó la resistencia a la flexión a probetas obtenidas a diferentes temperaturas. La carga fijada a la probeta se aplicó en dos apoyos, en donde posteriormente se realizaron las conversiones necesarias ($\text{N/mm}^2 \rightarrow 10,2 \cdot \text{KgF/cm}^2$) (anexo 15 y 16). Se obtuvo la siguiente información como se puede apreciar en la tabla 34:

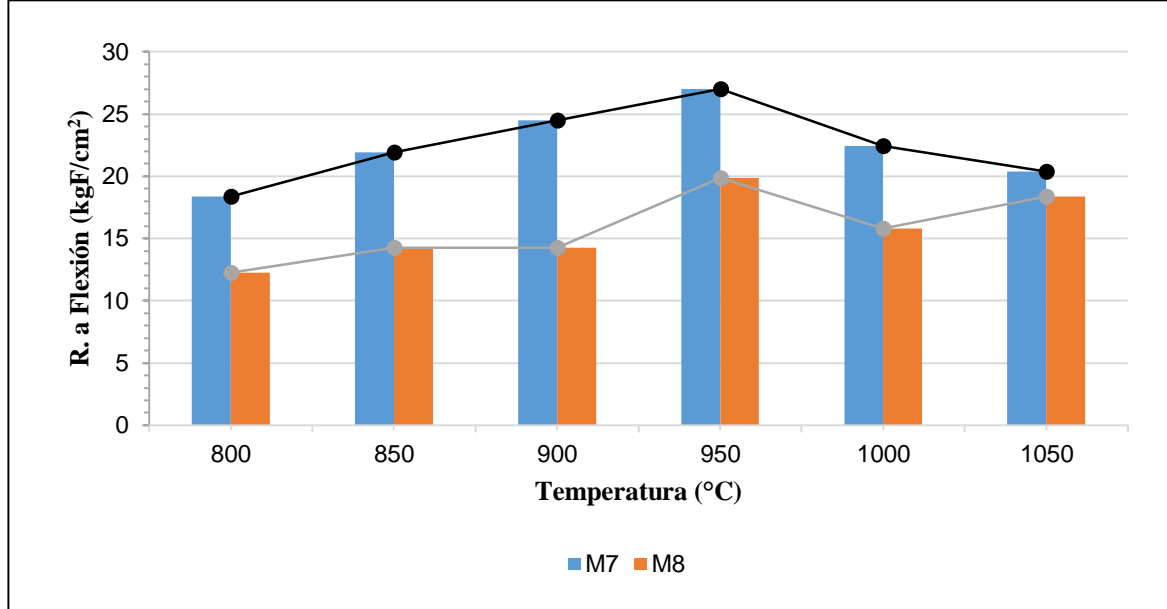
Tabla 34. Esfuerzo ultimo a flexión en función de la temperatura.

Temperatura (°C)	Esfuerzo Ultimo (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 anterior tabla 34, resulta la siguiente representación figura 81 para las dos mezclas seleccionadas:

Figura 81. Temperatura Vs Resistencia a la flexión.



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados para cualquiera de las temperaturas y mezclas trabajadas, están por debajo de los valores normales de resistencia mecánica para productos de mampostería estructural, los cuales están comprendidos entre 100 Kg/cm² (9,81 N/mm²) y 150 Kg/cm² (14,72 N/mm²) según [28]. Además en la figura 81 se observa además que ambas mezclas presentan mayor resistencia a los 950°C.

Asimismo, las propiedades mecánicas en los materiales cerámicos están influenciadas por la porosidad relacionadas con la resistencia mecánica a la flexión y al disminuir la porosidad del material inevitablemente se aumenta y mejoran las características de los materiales (tamaño de las partículas).

9.5.6. Curva de Bigot

Se realizó con la finalidad de observar el comportamiento del material en la etapa de secado, determinando principalmente la velocidad de contracción de la muestra a las diferentes temperaturas seleccionadas y relacionando las pérdidas por secado con el porcentaje de contracción en seco de las probetas conformadas.

El proceso de secado se llevó a cabo en dos temperaturas de $60 \pm 5^\circ\text{C}$ y $80 \pm 5^\circ\text{C}$, de la cual se promedió la temperatura inicial de $30 \pm 5^\circ\text{C}$ (anexo 16 y 17). De los datos obtenidos del análisis físico cerámico, resultan los siguientes valores para la curva de Bigot, teniendo en cuenta el porcentaje de contracción y la pérdida de masa en relación con la temperatura presentes en la tabla 35:

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

Ciclo Térmico		Promedios		
		Contracción Seca	Perdidas de masa	Velocidad de Contracción
Temperatura °C	Mezcla	%	%	(%/Min)
±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	0,00186
±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 ($\pm 30^{\circ}\text{C}$). La velocidad de contracción es menor a esta temperatura por lo cual no tendrá un alto riesgo de rotura durante el proceso.

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

9.6. Caracterización química y mineralógica

Esta caracterización se realizó mediante fluorescencia de rayos X (FRX) y difracción de rayos X (DRX). Los análisis se llevaron a cabo en los laboratorios GmasLab de Bogotá [9] [100] [101].

Para la realización de estos análisis se usaron 20 gramos de las mezclas seleccionadas (m7 y m8).

9.6.1. 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 [102] [100] [25] [103].

La fluorescencia de rayos X, también llamada espectrografía de rayos X, es un método físico para el análisis de los materiales arcillosos, su objetivo final es el determinar cualitativa y cuantitativa de 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.

9.6.1.1. Procedimiento de preparación de las muestras

La preparación de las muestras para análisis consistió en la trituración según la norma ASTM C323-56, realizando el tamizado del material por malla 400, hasta obtener un tamaño de partícula de 38 μm , (si el tamaño de partícula de la muestra es mayor a 63 micras); Seis gramos de la muestra original fueron llevadas a una prensa hidráulica a 15 toneladas durante 1 minuto, con lo que se obtiene una pastilla de 30 mm de diámetro para analizar en el equipo de fluorescencia marca Bruker S4 Explorer con Detector Pro4 y Tubo de rayos X Rh a un voltaje de 40KV y 25mA.

Luego se sometió al proceso de calcinación, el cual consiste en llevar la muestra a 1000°C, y mantenerla a esa temperatura durante 1 hora, para evaluar el porcentaje en peso perdido durante el tratamiento luego de pesar la muestra antes y después, a 105°C. Estas pérdidas por calcinación (L.O.I. por sus siglas en inglés *Loss Of Ignition*) representan la cantidad de componentes volátiles (H_2O , CO_2 , F, Cl y S) y materia orgánica no detectados con el equipo de fluorescencia. Los resultados de este análisis se pueden observar en la tabla 36:

Tabla 36. Fluorescencia de rayos X para las dos mezclas óptimas (m7 y m8).

Elemento		Mezcla 7	Mezcla 8
Formula Química	Nombre	Composición %	
SiO_2	Oxido de Silicio	54,743	56,582
Al_2O_3	Oxido de Aluminio	20,670	20,565
Fe_2O_3	Óxido de Hierro	6,567	6,691
K_2O	Oxido de Potasio	2,926	3,301
CaO	Oxido de Calcio	1,845	1,274
MgO	Oxido de Magnesio	0,898	0,803
TiO_2	Oxido de Titanio	0,871	0,930
Na_2O	Oxido de Sodio	0,626	0,388
P_2O_5	Oxido de fosforo	0,448	0,452
LOI	Perdidas por Ignición	9,187	8,599
$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	Relación Molar	2,648	2,751
Total		100,00	100,00

Fuente: Elaboración propia.

La tabla anterior 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 las dos mezclas. Teniendo en cuenta que características químicas recomendadas para la construcción son de 50 a 60 %.

- Alúmina (Al_2O_3) de 20,670 y 20,565 % para las dos mezclas respectivamente, confiriéndole una resistencia a altas temperaturas y una disminución de roturas en cocción. Teniendo en cuenta que 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 [93], 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 $900^\circ C$), confiriéndole propiedades de semirefractariedad.
- 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, las demás elementos se encuentran en bajas proporciones que no afectaran la estructura del producto final [26][28].

A continuación la tabla 37 refleja los resultados del análisis para las tres muestras puras:

Tabla 37. Fluorescencia de Rayos X para las tres muestras puras (M1, M2 y M5).

Elemento		M1	M2	M5
Formula Química	Nombre	Composición %		
SiO_2	Oxido de Silicio	55,395	55,695	57,811
Al_2O_3	Oxido de Aluminio	20,649	20,568	18,521
Fe_2O_3	Óxido de Hierro	6,613	6,011	6,344
K_2O	Oxido de Potasio	3,053	3,325	3,311
CaO	Oxido de Calcio	1,656	1,593	1,609
MgO	Oxido de Magnesio	0,867	0,834	0,963
TiO_2	Oxido de Titanio	0,831	0,953	0,990
Na_2O	Oxido de Sodio	0,547	0,589	0,608
P_2O_5	Oxido de fosforo	0,449	0,472	0,499
LOI	Perdidas por Ignición	8,998	9,021	8,392
SiO_2/ Al_2O_3	Relación Molar	2,683	2,708	3,121
Total		100,00	100,00	100,00

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta lo anterior se puede concluir que:

- Los contenidos de SiO_2 están dentro de rangos normales para materiales arcillosos, hasta un 60%.
- Los contenidos de alúmina Al_2O_3 son superiores al 18% por lo que se podrían presentar productos con carácter refractario.
- El contenido de óxidos fundentes Na_2O y K_2O es bajo por lo que ellos no influyen en la gresificación de las muestras.

- En las muestras el óxido de hierro Fe_2O_3 debe alcanzar temperaturas superiores a los 700°C debido a que actúa como un fundente; los altos contenidos de óxido de hierro en las muestras predicen que se tendrán buenos comportamientos en la gresificación.
- En ninguna de las muestras existen elementos contenidos elevados de CaO y MgO , lo que refleja que no se presentaron problemas marcados de eflorescencias en el producto terminado.

9.6.1.2. Diagrama de Fases

Se realizó un análisis según los diagrama de fase ternarios (A-B-C), con la finalidad de determinar las temperaturas a las cuales se obtiene la fase mullita en función de los componentes en sus porcentajes más altos.

Se tomaron tres compuestos de las mezclas m7 y m8 y las muestras M1, M2 y M5 con más altos porcentajes que fueron: $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ y $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$, pero se obtuvo un valor de temperatura utilizando estos compuestos, como se puede observar en la tabla 38:

Tabla 38. Composición química de las mezclas m7 y m8, como también las muestras M1, M2 y M5.

Elemento		Mezcla 7	Mezcla 8	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 5
Formula Química	Nombre	Composición %				
Al_2O_3	Oxido de Aluminio	20,67	20,649	20,568	18,521	20,565
K_2O	Oxido de Potasio	2,926	3,053	3,325	3,311	3,301
Fe_2O_3	Óxido de Hierro	6,567	6,613	6,011	6,344	6,691
SiO_2	Oxido de Silicio	54,743	55,395	55,695	57,811	56,582
Temperatura según el diagrama ($^\circ\text{C}$)		1550	1490,5	1500	1499,5	1485,3

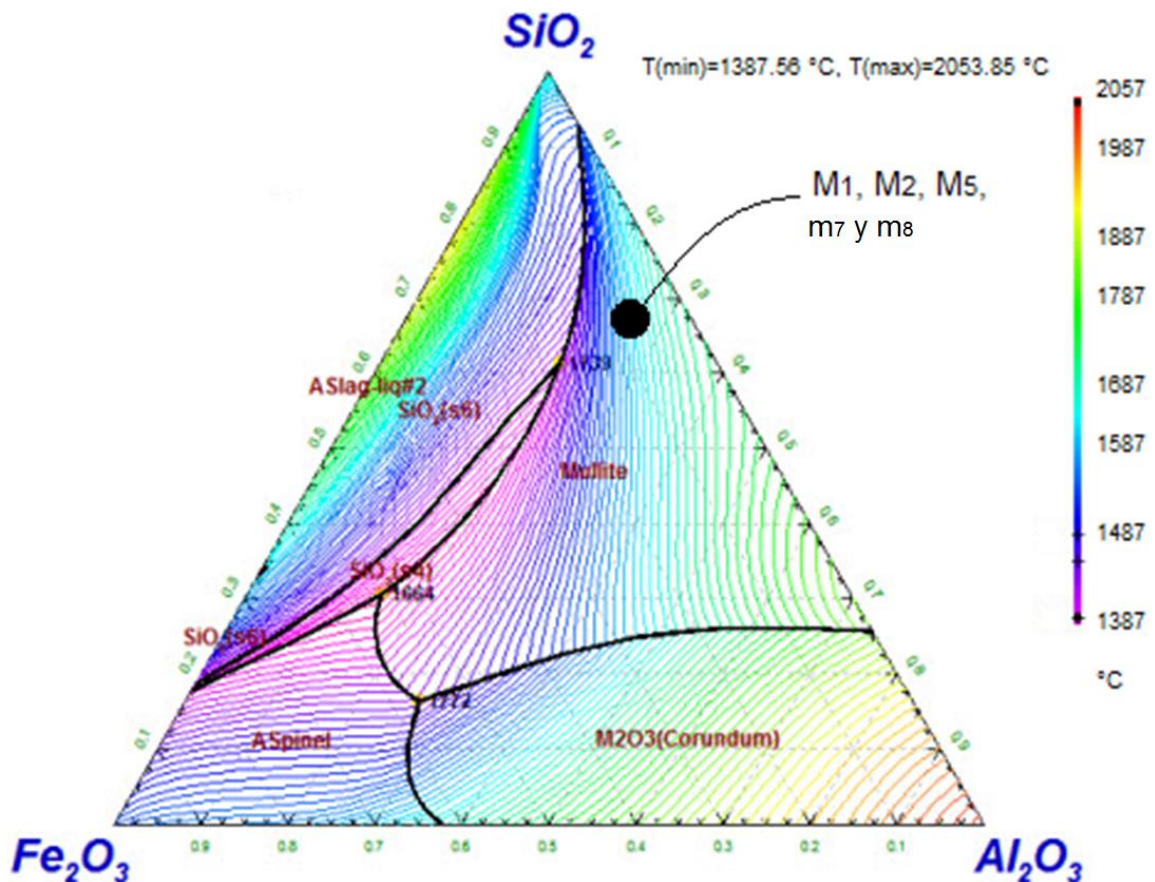
Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, se ubicaron los puntos de las composiciones en el diagrama de fase triangular mediante la utilización del software FactSage versión gratuita.

9.6.1.2.1. Diagrama SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3

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, se observa que los puntos de las mezclas y las muestras están muy cercanos como se puede ver en la siguiente figura 82:

Figura 82. Diagrama ternario FactSage SiO_2 , Fe_2O_3 y Al_2O_3 , para las mezclas (m7 y m8) y las muestras (M1, M2 y M3).



Fuente: Elaboración propia.

Para encontrar la temperatura se debe interpolar de la siguiente tabla 39, establecida por el software FactSage para el diagrama ternario:

Tabla 39. Valores de A= SiO_2 , B= Fe_2O_3 y C= Al_2O_3 para encontrar la temperatura de cocción.

No	X(A)	X(B)	X (C)	°C
1	0,16371	0,56703	0,26926	1498,71
2	0,64372	0,18026	0,20601	1382,04
3	0,30616	0,53914	0,15470	1252,85

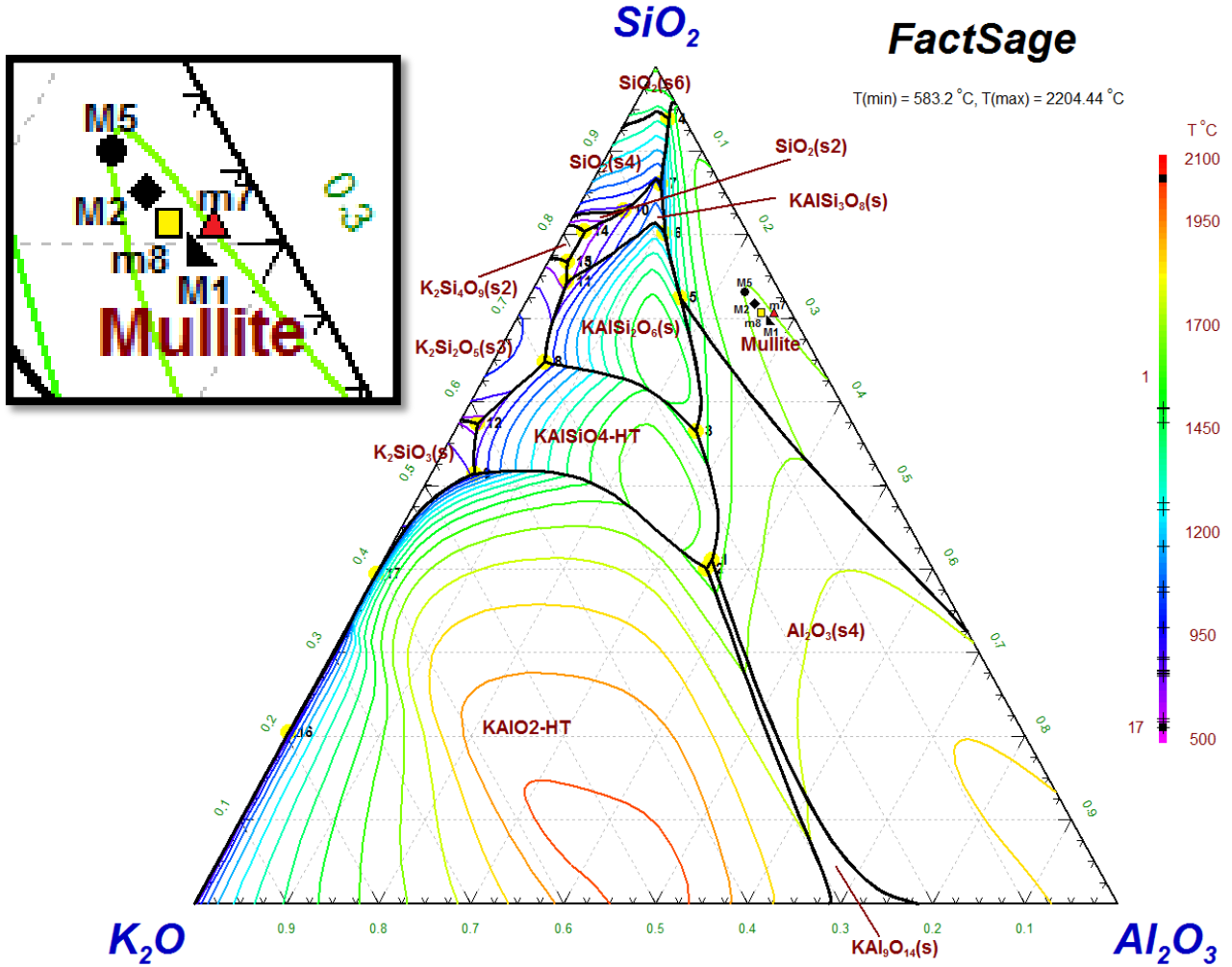
Fuente: Elaboración propia.

Para lograr que estas muestras obtenga la fase mullita, la temperatura de cocción debe alcanzar aproximadamente 1600°C . Con la actual tecnología que la empresa tiene instalada no se alcanzaría a llegar a este requerimiento. Adicionalmente según la bibliografía [32] las temperaturas usadas para los ladrillos no deben superar los 950°C .

9.6.1.2.2. Diagrama SiO₂, Al₂O₃ y K₂O

A continuación se graficaron las composiciones de sílice, alúmina y potasio, siendo este último uno de los compuestos en mayor proporción como se puede ver en la siguiente figura 83:

Figura 83. Diagrama ternario FactSage SiO₂, Al₂O₃ y K₂O, para las dos mezclas óptimas (m7 y m8) y las muestras (M1, M2 y M5).



Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta la siguiente tabla 40 con los valores de SiO₂, K₂O y Al₂O₃ se puede encontrar la temperatura de cocción establecidos por el software factsage para el diagrama ternario [104]:

Tabla 40. 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	1660,58
2	0,40017	0,24474	0,35510	1655,19
3	0,56491	0,17404	0,26105	1526,40
4	0,93808	0,01660	0,04531	1465,37
5	0,72478	0,11082	0,16440	1403,74
6	0,80082	0,08948	0,10970	1144,31
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.

Los puntos de la figura 83 en forma de triángulo (▲) y rectángulo (■) invariantes en el diagrama de equilibrio de fases ternario SiO₂-Al₂O₃-K₂O, poseen la temperatura elevada de 1500°C. Considerando el rango de temperaturas más utilizado en la industria cerámica (850°C-1000°C) y las características del horno de la empresa que solo alcanza temperaturas de 950°C [105].

La figura 83 resulta de la tabla 40, en donde se reflejan varios puntos que hacen parte del análisis por fluorescencia de rayos X, los cuales demuestran que la temperatura de fusión promedio para el tipo de mezcla formulada debe alcanzar los 1500°C aproximadamente para la conformación del producto final. Los puntos se ubican sobre la zona Mullita, la cual presenta las siguientes características:

- Es una cerámica de aluminosilicatos con buena estabilidad a temperaturas elevadas, esta composición se utiliza en las industrias del acero y el vidrio en forma de ladrillos y bloques refractarios.
- Se utiliza como una alternativa de menor costo a la alúmina, con mejores propiedades de resistencia al choque térmico [106].
- El material puede extruirse en forma de circular y ser prensado para crear productos de mampostería para la construcción.
- Presenta buena resistencia al desgaste y a la deformación.
- Tiene conductividad térmica baja.
- Se puede utilizar hasta los 1700°C de temperatura aproximadamente.

Se encontraron temperaturas diagrama de fase similares a los encontrados por segades, el cual selecciono el mismo diagrama ternario SiO_2 , Al_2O_3 y K_2O para analizar el comportamiento de las fases de las mezclas seleccionadas [40].

Posteriormente, se tuvieron en cuenta investigaciones realizadas al horno Hoffman de la empresa, el cual alcanza temperaturas de hasta $920^{\circ}C$, con el fin de proponer a la empresa que adopte las medidas de aumentar la temperatura para que el proceso propuesto en la curva de gresificación sea hasta $1050^{\circ}C$ [107].

9.6.2. 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 interpretación tanto en su aspecto cualitativo como cuantitativo, puede arrojar conclusiones acerca de su polimorfismo, transiciones de fase, soluciones sólidas, medida del tamaño de partícula y determinación de diagramas de fase [102][24][108][109][110]. La técnica de DRX realiza las caracterizaciones estructurales e identificaciones de fases cristalinas [111][112], también identifica esencialmente a 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 [113].

9.6.2.1. Procedimiento de preparación de las muestras

La preparación de las muestras para llevar a cabo el proceso de DRX consiste de un montaje en polvo para cuantificación de la mineralogía principal. Previo a la preparación del montaje en polvo, se cuarteó la muestra y por último se pulverizó hasta obtener un tamaño de partícula menor a 63 micras. Para la selección de la porción utilizada en el DRX, se cuarteó la muestra hasta obtener un peso de aproximadamente 2 gramos.

9.6.2.1.1. Montaje de agregados orientados

Esta preparación permite que las partículas con tamaño arcilla (diámetro entre 0,98 y $3,9 \mu m$) se orienten, haciendo posible a la vez que los rayos X se difracten a lo largo del eje z de los minerales. Este fenómeno da información sobre la distancia entre las capas que componen los minerales de la arcilla.

Luego de la preparación del montaje de agregados orientados, los patrones obtenidos en la difracción del montaje en polvo son estudiados con el fin de identificar si la muestra presenta óxidos y/o materia orgánica, debido a que estos compuestos afectan la identificación de los minerales de la arcilla. Las muestras analizadas para este análisis no contienen óxidos ni materia orgánica, por lo que procedimientos adicionales para retirar estos compuestos no fueron requeridos.

La preparación de agregados orientados consistió en tres tratamientos: (1) deshidratación sobre platina de vidrio, (2) solvatación con etilenglicol y (3) calcinación. Antes de los

tratamientos, las muestras fueron trituradas utilizando un mortero de ágata hasta que las partículas alcanzaron diámetros de aproximadamente 5 milímetros.

Los equipos utilizados para la realización de este análisis fueron: Un Difractómetro Bruker axs D4 Endeavor - Serie I con detector LYNXEYE, Tubo de rayos-X Cu 1.9Kw (K alpha $\lambda = 1,5406$) con Filtro de Níquel a 40KV 40mA. Admite muestras en polvo: 2θ : 5-70° (montaje polvo), 5-35° (agregados orientados) con un tamaño de paso: 0,014. La velocidad de barrido: 0,4 segundos por paso para los montajes de agregados orientados [114].

9.6.2.1.2. Disgregación y deshidratación sobre platina de vidrio

Con el fin de determinar qué tratamiento debe aplicarse para separar los minerales arcillosos, las rocas pueden ser clasificadas dentro de uno de los siguientes cuatro grupos: rocas clásticas, calizas, rocas que contienen sulfatos y material no consolidado. Las muestras tratadas en este análisis corresponden a sedimentos no consolidados.

El tratamiento para la separación de minerales arcillosos de este tipo de material consiste en: Separar 10 gramos, mezclarlos con 200 mililitros de agua destilada y agitar. Luego, irradiar la muestra con ultrasonido cerca de 1 minuto y dejarla reposar durante 1 minuto y decantar la fracción fina a un envase para centrifugar. Por último, los primeros centímetros de suspensión fueron tomados con una pipeta y depositados sobre una platina de vidrio. Esta preparación se dejó secar a temperatura ambiente para luego ser examinada con el difractómetro que presenta el patrón de difracción denominado “orientado”.

9.6.2.1.3. Solvatación con etilenglicol

Posterior a la deshidratación sobre platina de vidrio, el agregado se satura con etilenglicol en desecadores durante 8 horas a 60°C. Este solvente se introduce en las capas de los minerales de la arcilla incrementando, para algunos tipos de arcillas es el espacio entre capas. El agregado es difractado de nuevo para obtener el patrón denominado “glicolado”.

9.6.2.1.4. Calcinación

Luego de la solvatación con etilenglicol, el agregado se calcina a 550°C durante 4 horas con el fin de colapsar las capas expandibles. Este procedimiento permite el reconocimiento de algunas fases arcillosas luego de difractado el agregado calcinado con el que se obtiene el patrón denominado “calcinado”.

9.6.2.1.5. Análisis de minerales de la arcilla

Con este montaje se identificaron las fases presentes en los especímenes seleccionados de las muestras antes de cocción, se realizaron mediante la comparación de los perfiles observados con 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, de lo que se obtuvieron los siguientes resultados para las mezclas m7 y m8 (tabla 41):

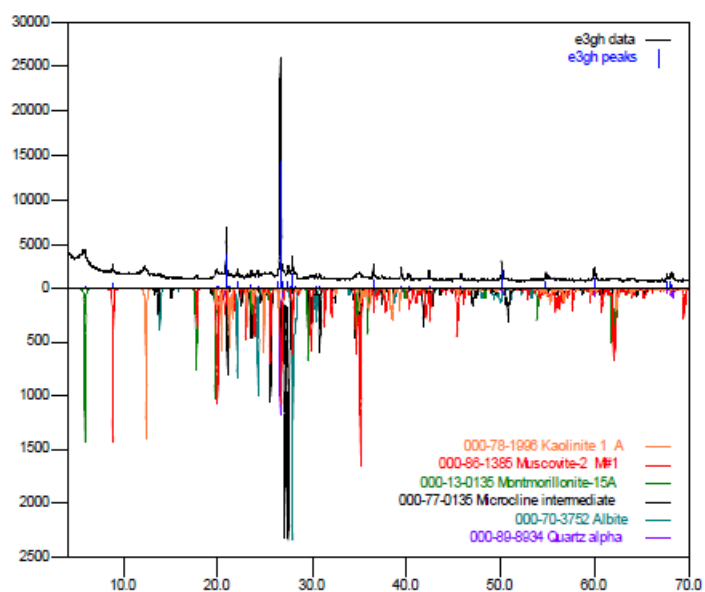
Tabla 41. Estructuras mineralógicas del análisis DRX, para la mezcla m7.

Código de referencia ICDD	NOMBRE DEL MINERAL	FORMULA QUÍMICA	PORCENTAJE (%)
000-89-8934	Cuarzo	SiO ₂	38,1
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
000-78-1996	Caolinita	Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄	16,2
000-70-3752	Albita	(Na _{0,98} Ca _{0,02})(Al _{1,02} Si _{2,98} O ₈)	13,7
000-77-0135	Microclina	K(Si _{0,75} Al _{0,25}) ₄ O ₈	10,3
000-13-0135	Montmorillonita	Ca _{0,2} (Al, _n Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ · 4 H ₂ O	2,6

Fuente: Elaboración propia.

La composición de feldespatos constituyentes de rocas corresponde a un sistema ternario compuesto de Cuarzo (SiO₂), Moscovita (K_{0,86}Al_{1,94}(Al_{0,965}Si_{20,895} O₁₀)((OH)_{1,744} F_{0,256}) y Caolinita (Al₂(Si₂O₅)(OH)₄). Obteniendo el difractograma de la figura 84:

Figura 84. Difractograma para la mezcla m7.



Fuente: Elaboración propia.

A continuación en la tabla 42, se presentan los resultados del análisis cuantitativo para la mezcla m8:

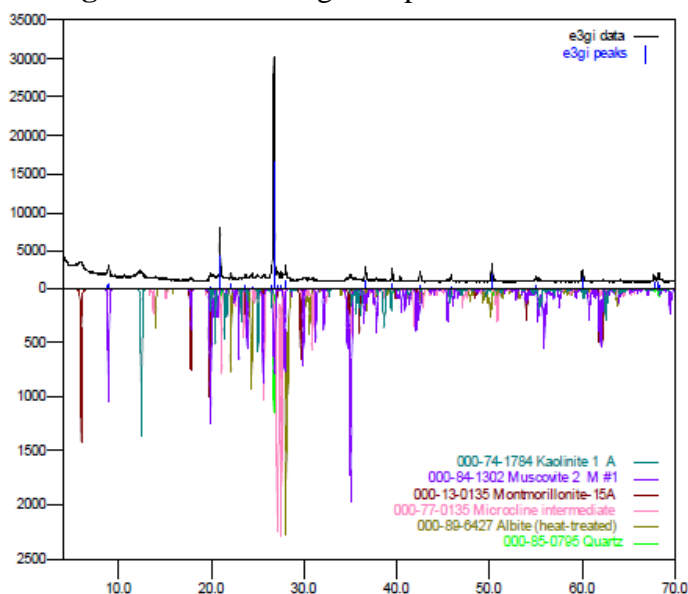
Tabla 42. Estructuras mineralógicas del análisis DRX, para mezcla m8.

Código de referencia ICDD	NOMBRE DEL MINERAL	FORMULA QUÍMICA	PORCENTAJE (%)
000-85-0795	Cuarzo	SiO ₂	40,9
000-74-1784	Caolinita	Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄	21,4
000-86-1385	Moscovita	K _{0,86} Al _{1,94} (Al _{0,965} Si _{20,895} O ₁₀)((OH) _{1,744} F _{0,256})	18,4
000-77-0135	Microclina	K(Si _{0,75} Al _{0,25}) ₄ O ₈	9,1
000-89-6427	Albita	Na (Al Si ₃ O ₈)	8,7
000-13-0135	Montmorillonita	Ca _{0,2} (Al,nMg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ !4 H ₂ O	1,5

Fuente: Elaboración propia.

La composición de feldespatos constituyentes de rocas corresponde a un sistema ternario compuesto de Cuarzo (SiO₂), Moscovita (K_{0,86}Al_{1,94}(Al_{0,965}Si_{20,895} O₁₀)((OH)_{1,744} F_{0,256}) y Caolinita (Al₂(Si₂O₅)(OH)₄). Obteniendo el difractograma de la figura 85:

Figura 85. Difractograma para la mezcla m8.



Fuente: Elaboración propia.

En general a las arcillas que se utilizan en construcción se las denomina arcillas cerámicas o arcillas comunes; las cuales están compuestas por dos o más minerales de la arcilla, generalmente illita, caolinita y esmectita, con importantes cantidades de otros minerales que no son filosilicatos (carbonatos, cuarzo, etc.) y generalmente se utilizan para la fabricación de materiales de construcción y agregados [115].

Las muestras presentan una composición diversa, de las cuales se aprecian ciertas tendencias. Algunas arcillas encuentran su principal campo de aplicación en el sector de los absorbentes debido a que pueden retener agua u otras moléculas en el espacio interlamilar (esmectitas) o en los canales estructurales (sepiolita y paligorskita). La hidratación y deshidratación del

espacio interlamina son propiedades características de las esmectitas, y cuya importancia es crucial en los diferentes usos industriales. Por lo anterior, se consideran que las esmectitas en forma de montmorillonita absorben gran cantidad de agua entre sus espacios interlaminares que son su principal característica [116].

En cuanto a los minerales arcillosos, se observa que la mayoría de las muestras está constituido por la illita en una importante proporción (generalmente es el segundo mineral en importancia luego del cuarzo).

Igualmente se presentan los difractogramas de la mezcla m7 antes y después de la cocción de lo que se obtuvo la siguiente tabla 43 del análisis cuantitativo:

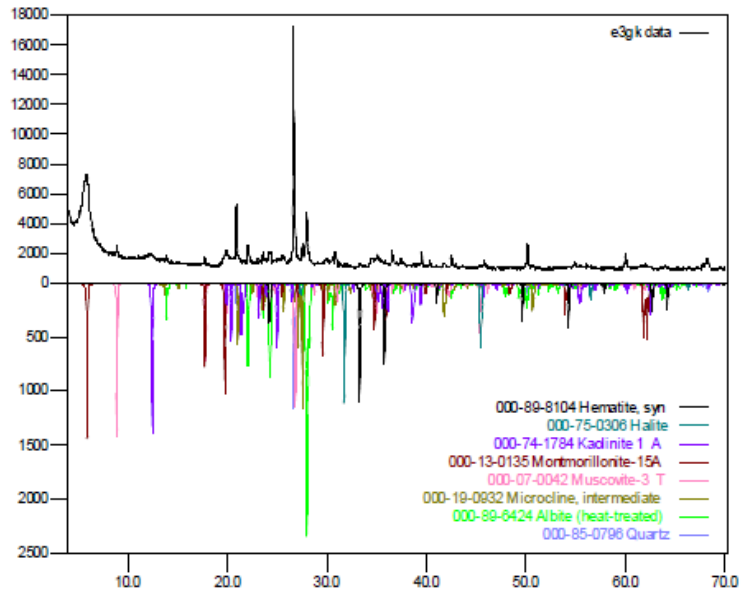
Tabla 43. Estructuras mineralógicas del análisis DRX, para mezcla m7 antes de cocción.

Código de referencia ICDD	NOMBRE DEL MINERAL	FORMULA QUÍMICA	PORCENTAJE (%)
000-85-0795	Cuarzo	SiO ₂	27,5
000-89-6427	Albita	Na (Al Si ₃ O ₈)	18,6
000-74-1784	Caolinita	Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄	16,7
000-77-0135	Microclina	K(Si _{0,75} Al _{0,25}) ₄ O ₈	9,4
000-13-0135	Montmorillonita	Ca _{0,2} (Al _n Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ !4 H ₂ O	1,5
000-86-1385	Moscovita	K _{0,86} Al _{1,94} (Al _{0,965} Si _{20,895} O ₁₀)((OH) _{1,744} F _{0,256})	5,9
000-75-0306	Halita	NaCl	<1
000-87-1166	Hematita	Fe ₂ O ₃	<<1

Fuente: Elaboración propia.

La composición de feldspatos constituyentes de rocas corresponde a un sistema ternario compuesto de Cuarzo (SiO₂), Albita (Na (AlSi₃O₈)) y Caolinita (Al₂(Si₂O₅)(OH)₄). Obteniendo el difractograma de la figura 86:

Figura 86. Difractograma para la mezcla m7, antes de cocción.



Fuente: Elaboración propia.

A continuación en la tabla 44, se presentan los resultados del análisis cuantitativo para la mezcla m7 después de la cocción a una temperatura de 950°C:

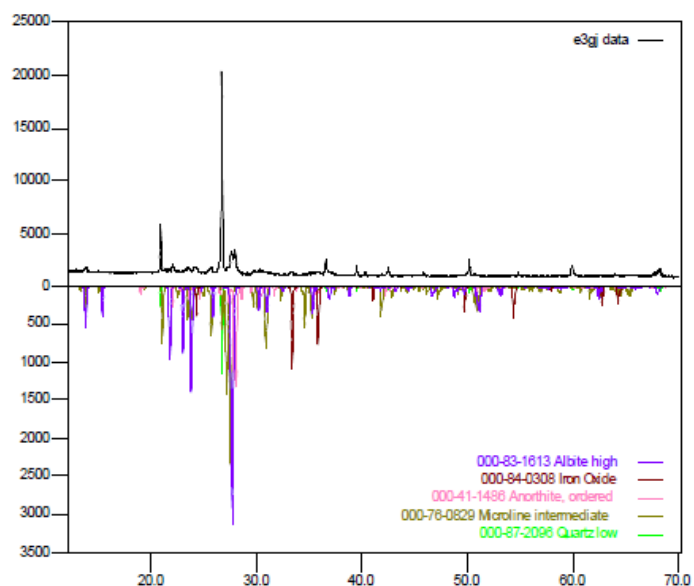
Tabla 44. Estructuras mineralógicas del análisis DRX, para mezcla m7 después de cocción.

Código de referencia ICDD	NOMBRE DEL MINERAL	FORMULA QUÍMICA	PORCENTAJE (%)
000- 87-2096	Cuarzo	SiO ₂	40,9
000-83-1613	Albita	Na(AlSi ₃ O ₈)	28,1
000-76-0829	Microclina	K _{0,94} Na _{0,06} Al _{0,95} Si _{3,05} O ₈	18,9
000-41-1486	Anortita	Ca Al ₂ Si ₂ O ₈	9,7
000-84-0308	Óxido de hierro	Fe ₂ O ₃	2,4

Fuente: Elaboración propia.

La composición de feldespatos constituyentes de rocas corresponde a un sistema ternario compuesto de Cuarzo (SiO₂), Albita (Na (AlSi₃O₈)) y Caolinita (Al₂(Si₂O₅)(OH)₄). Obteniendo el difractograma de la figura 87:

Figura 87. Difractograma para la mezcla m7, luego de cocción.



Fuente: Elaboración propia.

9.6.2.1.6. Evaluación de los resultados obtenidos.

En el análisis por DRX, indica que los minerales arcillosos están constituidos principalmente por sílice y aluminosilicatos hidratados con 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, lo cual justifica su color amarillo [117]. Asimismo, este tipo de análisis es fundamental para determinar la calidad de las mismas en función del contenido de SiO₂ y Al₂O₃.

En la siguiente tabla 45 se reflejan las propiedades de los elementos presentes en los difractogramas presentan las siguientes características:

Tabla 45. Propiedades de los elementos.

ELEMENTO	FORMULA QUÍMICA	CATEGORÍA	PROPIEDADES
Caolinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	Filosilicatos	Es higroscópico. Plasticidad baja. Resiste altas temperaturas.
Moscovita o Illita	(K,H ₃ O)(Al, Mg, Fe) ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀ [(OH) ₂ , (H ₂ O)]	Filosilicatos	Inestables. Inexpansibles. Plasticidad media.
montmorillonitas	(Na,Ca) _{0,3} (Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·nH ₂ O	Filosilicatos	Expansivas. Tiropoxico. Inestable.
Cuarzo	SiO ₂	Tectosilicatos	Disminuye la contracción Fácil fusión Estable

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados indican un sistema ternario de feldespatos por la presencia de albita, anortita y feldespato potásico. La albita se presenta de tipo alta debido a la poca ordenación de Al-Si teniendo en cuenta que aparece a temperaturas entre 700 y 980°C [28].

El análisis químico de FRX realizado a la materia prima utilizada para la mezcla de la pasta se indica en las tablas 36 y 37. 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 [3]. Para los resultados obtenidos estos valores se encuentran entre 54,73-56,52% de SiO₂, Al₂O₃ entre el 20,56-20,67% y Fe₂O₃ entre 6,56-6,61%, por lo que los valores se encuentran muy similares.

No obstante, la composición de estas dos arcillas no se aleja mucho del rango óptimo, además dicha composición puede alcanzarse fácilmente con la mezcla de tales arcillas. Por su parte, la mezcla m1, por su composición química, podría utilizarse sin mezclarla con otras. El contenido de alúmina en las mezclas repercute directamente en la resistencia mecánica del producto de mampostería, como también se evidencia la presencia en las mezclas 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 y m8) 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%). Estos 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 según lo obtenido en la sección 9.6.2.

Puede indicar una presencia significativa de sílice libre porque en el pico de intensidad del cuarzo y la relación molar es baja SiO₂/Al₂O₃. Según los resultados del análisis químico por fluorescencia que se muestra en las tablas 36 y 37, K₂O contenido de las muestras alcanza un valor de 2,926 y 3,301%, hecho que sugiere la existencia de micáceos en proporciones relativamente elevadas, aunque la existencia de otros minerales en capas no puede ser descartada. El Fe₂O₃ contenido parece indicar 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.

Teniendo en cuenta los diagramas ternarios y los resultados de los difractogramas, se pudo evidenciar que no se obtuvo la fase de Mullita debido a que se alcanza a 1500°C y el horno de la empresa logra una temperatura de 950°C. Por lo cual se presentaron las fases de albita, microclina y anortita.

9.6.3. Caracterización Térmica

Este análisis se llevó a cabo para determinar las posibles variaciones en cuanto a dimensiones y características morfológicas de la arcilla, mediante los análisis térmicos diferencial (ATD) y análisis termogravimétrico (ATG), mediante una termobalanza Q600 de alta sensibilidad, en los laboratorios de la Universidad de Pamplona.

9.6.3.1. 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. Estas medidas se pueden realizar en condiciones ambientales o bajo una atmósfera controlada, con el fin de determinar los efectos endotérmicos y exotérmicos que acompañan a las reacciones de la muestra en la cocción [118] [113] [119].

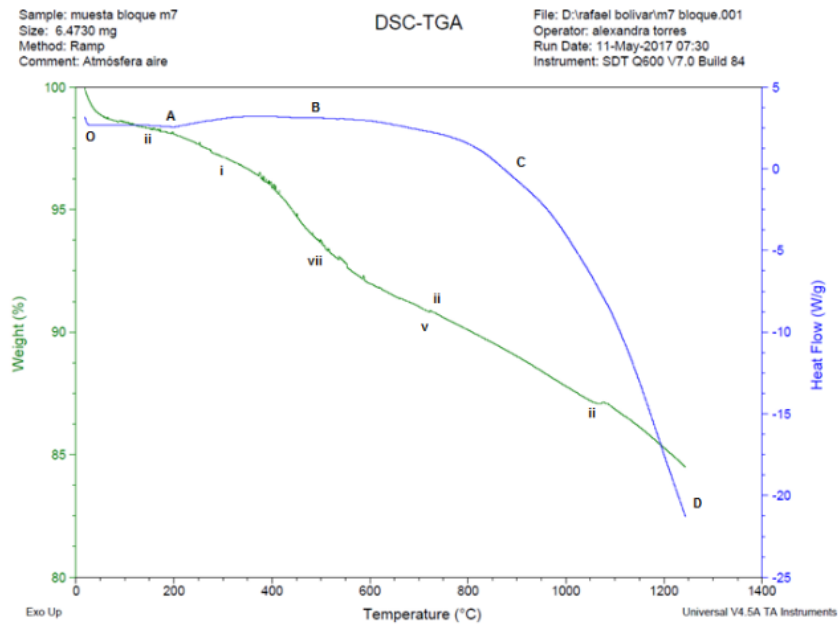
9.6.3.2. Análisis Termogravimétrico (ATG)

Es una técnica en la que la masa de la muestra es controlada a una temperatura programada, con lo que se puede 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 [120] [121] [122] [123].

Los se realizaron sobre una muestra sólida conformada por el método de moldeo de extrusión y otra en polvo de las mezclas m7 y m8, en un rango de temperatura entre 20°C y 1200°C en presencia de una atmosfera controlada de oxígeno y en un ciclo térmico de 5°C/min. Las curvas ATD y ATG obtenidas permitieron observar los picos endotérmicos y exotérmicos acompañado de las pérdidas de peso que sufre el material, utilizando el software Data Analysis que posee el equipo para el ensayo.

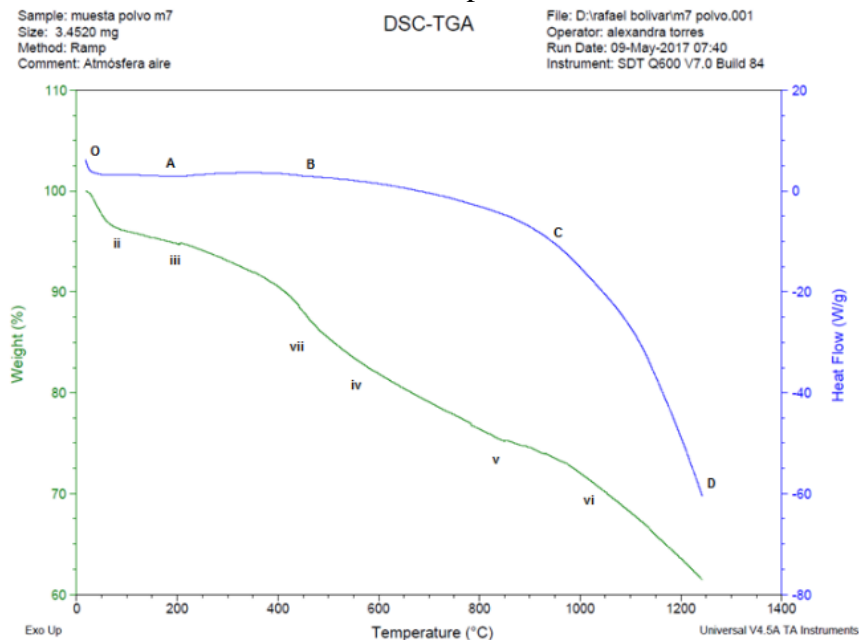
A continuación en la figura 88 y 89, se presentan los resultados del análisis para la mezcla m7 conformada y en polvo:

Figura 88. Termograma de los análisis térmicos de ATD y ATG, para la mezcla m7 – muestra conformada.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 89. Termograma de los análisis térmicos de ATD y ATG, para la mezcla m7 – muestra en polvo.



Fuente: Elaboración propia.

Para las curvas las figuras 88 y 89, se observa el siguiente comportamiento:

Tabla 46. Análisis de las gráficas ATD y ATG para la mezcla m7.

Temperatura °C	Curva			
	ATD (azul)		ATG (verde)	
	Figura 88	Figura 89	Figura 88	Figura 89
0-50	Cambio endotérmico, asociada a procesos de desorción o secado. Entre los puntos O-A		Pérdida de peso del 1,25% relacionada a la pérdida de agua higroscópica, libre o la humedad residual de la muestra. Se presenta una curva característica tipo II.	Pérdida de peso del 2,60% relacionada a 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.	Se presenta una pérdida de masa de 2,40%, producto de la evaporación de agua, ligada a las estructuras de las muestras. Se presenta una curva característica tipo III.
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).	Se presenta una pérdida de masa de 7,5%. Entre los 440°C aparece la curva característica tipo VII 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.	En el puntos B, se inicia una reacción endotérmica con un pequeño salto 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%	Se presenta la expulsión del agua cristalizada, como también la curva característica tipo IV y VII, con una pérdida de peso del 11%
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 .	La curva presenta un descenso gradual y progresivo, con curvas características de tipo V y VI, con una pérdida de peso del 12%. 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 a que el material ya se haya fusionado, la cual no se estabiliza debido a que la fase encontrada para la muestra m7 está a los 1500°C aproximadamente que es donde se obtiene mullita. La cual 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%	Se presenta una pérdida de peso del 7%. En total se obtiene a esta temperatura una pérdida de peso del 37%

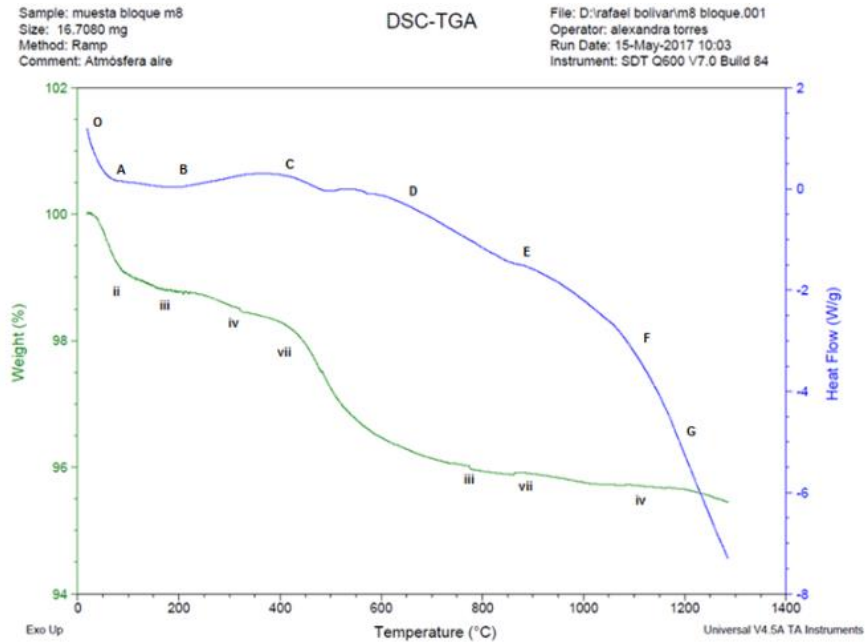
Nota: Para las curvas características (ver anexo 18) [124].

Fuente: Elaboración propia.

El inicio de la vitrificación aumenta la resistencia mecánica de la pieza, esta fase se obtiene a partir de los 1200°C (tabla 46) [26]. Además, no se aprecia una estabilización de la curva ATD porque la fase mullita se obtiene a los 1500°C aproximadamente, si se alcanzara esta temperatura, se obtendrían bloques refractarios. Ambos diagramas presentan un comportamiento similar, aunque se comporta mejor la muestra m7 en polvo (figura 89).

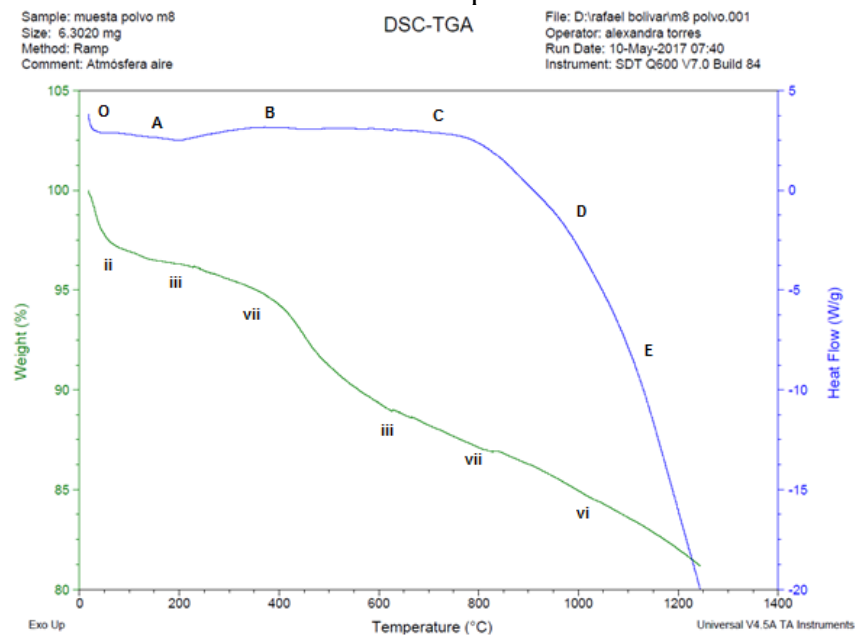
A continuación en la figura 90 y 91, se presentan los resultados del análisis para la mezcla m8 conformada y en polvo:

Figura 90. Termograma de los análisis térmicos de ATD y ATG, para la mezcla m8 – muestra conformada.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 91. Termograma de los análisis térmicos de ATD y ATG, para la mezcla m8 – muestra en polvo



Fuente: Elaboración propia.

Para las curvas las figuras 99 y 100, se observa el siguiente comportamiento:

Tabla 47. Análisis de las gráficas ATD y ATG para la mezcla m8.

Temperatura °C	Curva			
	ATD (azul)		ATG (verde)	
	Figura 100a	Figura 100b	Figura 100a	Figura 100b
0-50	Se produce un cambio endotérmico, asociada a procesos de desorción o secado. Entre los puntos O-A.		Pérdida de peso del 0,9% relacionada a la pérdida de agua higroscópica, libre o la humedad residual de la muestra. Se presenta una curva característica tipo II.	Pérdida de peso del 2,5% relacionada a 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 A-B, se aprecia una ligera estabilización, debido a que no se generan reacciones químicas importantes.	Entre los puntos O-A, se aprecia una ligera estabilización, debido a que no se generan reacciones químicas importantes.	Se presenta una pérdida de masa de 0,4%, producto de la evaporación de agua, ligada a las estructuras de las muestras. Se presenta una curva característica tipo III.	Se presenta una pérdida de masa de 1,25%, producto de la evaporación de agua, ligada a las estructuras de las muestras. Se presenta una curva característica tipo III.
200-450	Entre los puntos B-C, se produjo una reacción exotérmica. Por la disociación oxidante de los hidróxidos de hierro (Fe ₂ O ₃).	Entre los puntos A-B, se produjo una reacción exotérmica. Por la disociación oxidante de los hidróxidos de hierro (Fe ₂ O ₃).	Se presenta una pérdida de masa de 0,8%. Entre los 300°C aparece la curva característica tipo IV relacionada con la presencia de montmorillonita (desorción de agua).	Se presenta una pérdida de masa de 3,75%. Entre los 350°C aparece la curva característica tipo VII relacionada con la presencia de montmorillonita (desorción de agua).
400-650	Entre los puntos C-D, se observa una reacción exotérmica relacionada con la transformación alotrópica del cuarzo α a β, común a temperaturas de 573°C	Entre los puntos B-C, se observa una reacción exotérmica constante 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 2%	Se presenta la expulsión del agua cristalizada, como también la curva característica tipo III, con una pérdida de peso del 5,8%
600-1050	Entre los puntos D-E a los 800 y 850°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.	Entre los puntos C-D a los 800 y 1000°C aproximadamente se presenta la reacción endotérmica constante, 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 III y VII, con una pérdida de peso del 0,8%. En donde se pudo haber presentado la liberación de CO ₂ .	La curva presenta un descenso gradual y progresivo, con curvas características de tipo VI y VII, con una pérdida de peso del 5%. En donde se pudo haber presentado la liberación de CO ₂ .
1050-1250	Entre los puntos F-G, se observa el descenso progresivo constante de la curva, probablemente a que el material ya se haya fusionado, la cual no se estabiliza, debido a que la fase encontrada para la muestra m8 está a los 1500°C aproximadamente que es donde se obtiene mullita. La cual se comienza a formar a los 980°C aproximadamente.	Entre los puntos D-E, se observa el descenso progresivo constante de la curva, probablemente a que el material ya se haya fusionado, la cual no se estabiliza, debido a que la fase encontrada para la muestra m8 está a los 1500°C aproximadamente que es donde se obtiene mullita. La cual se comienza a formar a los 980°C aproximadamente.	Se presenta una curva característica de tipo IV, con una pérdida de peso del 0,4%. En total se obtiene a esta temperatura una pérdida de peso del 4,7%. Se supone debido al tamaño de las partículas de arena.	Se presenta una pérdida de peso del 2,5%. En total se obtiene a esta temperatura una pérdida de peso del 18,75%. Se supone debido al tamaño de las partículas de arena.

Nota: Para las curvas características (ver anexo 18) [124].

Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de la mezcla m8, esta presenta un comportamiento variado en relación a la mezcla m7, y es debido a la cantidad de partículas en forma de arena lo cual hace que las partículas no se fusionen rápidamente generando cambios en peso, por lo que se observa que a temperaturas superiores a 1000°C el valor del peso comienza a ser constante (tabla 47).

Teniendo en cuenta que la temperatura de cocción de 950°C que se lleva actualmente para los productos fabricados por la empresa, se observa un comportamiento adecuado, dado a que a esta temperatura comienza a ser constante para encontrar la fase de mullita.

El porcentaje de contracción lineal de las mezclas después del tratamiento de cocción fueron de $6,059 \pm 0,25$ y $4,101 \pm 0,19$ para la mezcla m7 y m8 respectivamente. Los anteriores resultados son comparables con los que se evidencian en la literatura evaluada.

Las contracciones en cocido para la arcilla son elevadas y tienen un marcado aumento a partir de los 1050°C, sin terminar de contraer a 1200°C. Este comportamiento es típico en materiales de características arenosas [125].

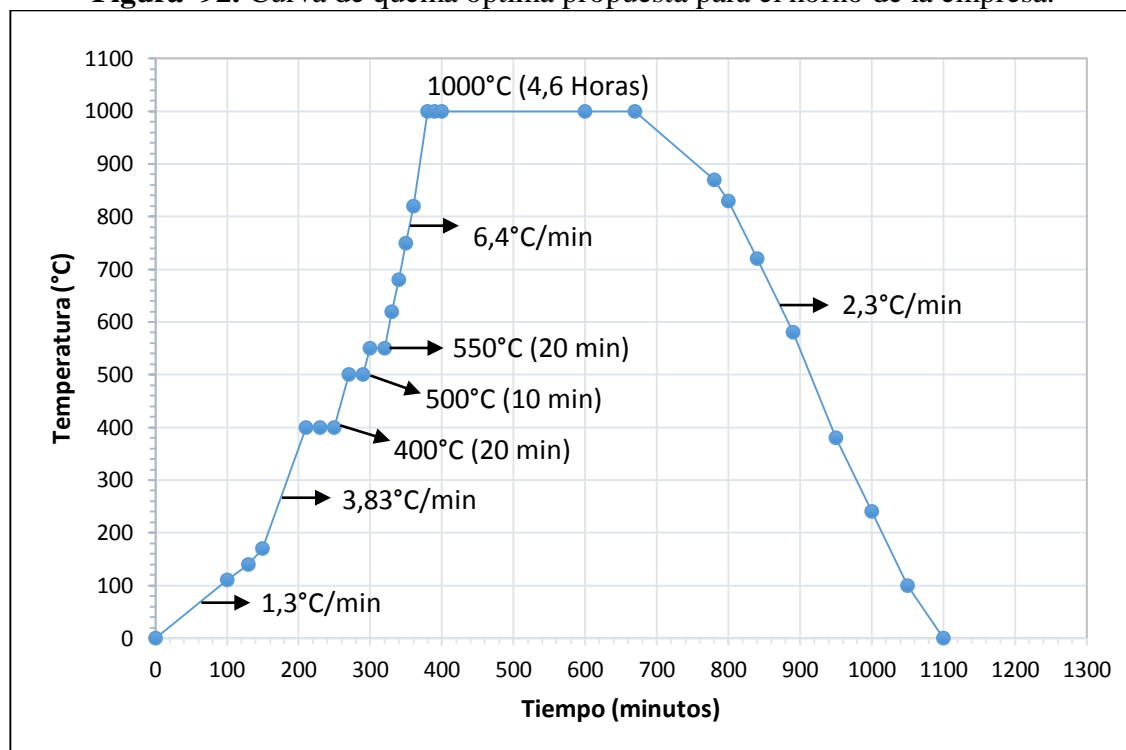
9.6.4. Determinación de la curva ideal de cocción para las mezclas estudiadas

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

Por lo tanto, el bloque responde a las temperaturas de cocción deformándose elásticamente, la cual tiene un límite que se puede llegar a sobrepasar si el calentamiento o enfriamiento son muy rápidos. Por lo tanto la pieza queda sometida a tensión y se deforma. En otras ocasiones si dichas tensiones son superiores a la resistencia que el material, 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 tal que las tensiones derivadas de los factores señalados fuesen siempre inferiores a la resistencia del 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 siguiente figura 92 muestra la curva de cocción propuesta a nivel laboratorio para la mezcla m7, teniendo en cuenta los análisis térmicos:

Figura 92. Curva de quema óptima propuesta para el horno de la empresa.



Fuente: Elaboración Propia.

Se propuso que durante la etapa de precalentamiento en el inicio del ciclo térmico alcanzará una temperatura de 170°C con una velocidad de calentamiento aproximadamente 1,3°C/min de 2,5 horas para ayudar a la pérdida de agua higroscópica (evaporación del agua) y evitar fisuras debido a que las muestras poseen partículas grandes de arena.

Luego cuando ya obtiene la temperatura de 170°C, es la etapa donde se ha evaporado la humedad residual, desde este punto se propone una velocidad de calentamiento de 3,83°C/min hasta alcanzar una temperatura de 400°C donde permanecerá por un tiempo de 20 minutos (Evaporación de agua ligada), luego para alcanzar una temperatura de 550°C con una velocidad de 2,5°C/min con la finalidad de descomponer y disociar los hidróxidos de hierro.

Luego para hasta alcanzar los 1000°C se propone una velocidad de calentamiento de 6,4°C/min debido a que a los 573°C se produce una reacción exotérmica relacionada con la transformación alotrópica del cuarzo α a β , con la la curva característica tipo VII.

Posteriormente, se propuso una temperatura ideal de 1000°C que es donde se estabilizan las curvas ATD y ATG para la mezcla m7 donde se mantendrá por 4,6 horas para garantizar la fusión de las partículas y obtener a temperaturas de aproximadamente 1500°C la fase de mullita para unos bloques con características refractarias con mejores propiedades.

Finalmente en la etapa de enfriamiento se propuso una velocidad de $2,3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ en un tiempo de aproximadamente 7,2 horas, con la finalidad de que el producto no tenga choques térmicos y por consiguiente fisuras y deformaciones.

Teniendo en cuenta lo anterior, los productos de la industria cerámica se pueden clasificar según varios criterios, separados en dos grupos: De pasta porosa, los cuales son cocidos a menos de 1200°C y los de pasta compacta los cuales son cocidos a más de 1200°C para obtener una fusión que aglomere todas las partículas de la mezcla. Por lo que se concluye que el horno para la cocción de la empresa no alcanza una curva con la cual se garantice la calidad del producto final.

9.6.4.1. Evaluación de los resultados obtenidos.

El proceso de cocción de la empresa no cuenta con la instrumentación y control que le permita el registro de datos de temperatura, suministro de aire y carbón, lo que no le permite mejorar las condiciones de dosificación manual adicionalmente rastrear problemas particulares del horno en cada disminución de la temperatura no evidenciada [126].

Las mezclas estudiadas (m7 y m8) no presentan contracciones normales, debido que se consideran optimas a aquellas que no superen el 2,0% a temperaturas hasta 970°C y a 1050°C no mayores al 4,0% para arcillas utilizadas en la fabricación de productos extruidos.

Se puede afirmar que una buena arcilla para ser usada en la producción de productos de mampostería aquellas muestras que funcionan a bajas temperatura, es decir entre 950°C y 1050°C . En donde además, presentan valores de absorción de agua que cumplen con la norma de producto terminado que se quiere producir, como lo establece la norma NTC 4017 y 4205.

De los anteriores resultados podemos concluir que para tener la seguridad de cumplir con lo exigido por la norma técnica, es necesario establecer cocciones a temperaturas entre los 1000°C y 1050°C , donde se dejan de producir reacciones exotérmicas producto de los componentes de las muestras. Donde evidentemente se debe disminuir el tamaño de partícula mediante molienda o tamizado, con lo que evidentemente los poros del material se cierran más fácilmente con la temperatura que alcancen en el horno.

10. ANÁLISIS 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 bloque con la calidad establecida por las normas colombianas actuales vigentes, a través de las siguientes actividades:

10.1. Análisis de los resultados obtenidos

Se tuvieron en cuenta los análisis físico cerámicos realizados en los laboratorios, con lo cual se compararon los resultados con los obtenidos en los ensayos destructivos estudiando principalmente la resistencia mecánica y la absorción de agua (tabla 48) de lo que se obtuvo la siguiente información:

Tabla 48. 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
Mezcla 7	19,50	27,03
Mezcla 8	20,90	19,89
Producto Actual	19,56	11,43

Fuente: Elaboración propia

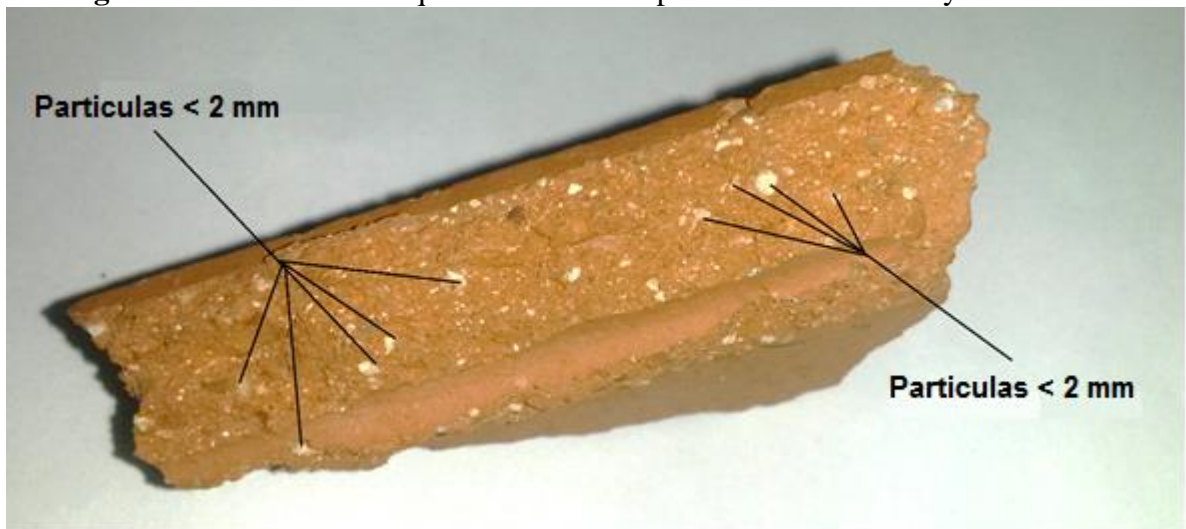
Cabe resaltar que no se mejoró el producto en cuanto a absorción de agua debido al tamaño y la cantidad de partículas de arena en forma de esmectita, por lo que se sugiere que la empresa realice un rediseño del triturador o la inversión en la compra de un equipo más potente el cual logre tamaños de partículas 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, las cuales poseen granulometría fina que mejoraría las propiedades de la pasta y por consiguiente reducir los desperdicios.

Además comparando la mezclas optimas encontradas (mezclas m7 y m8), la mezcla m7 posee mejores características relacionada con el bloque H-10, por lo que se seleccionó como la óptima para la materia prima, la cual funciona en excelentes condiciones teniendo en cuenta la tecnología actual de la empresa, estableciendo como parámetros una temperatura de cocción de 950°C y la composición mineralógica ideal obtenida desde hidrometría la cual encaja perfectamente para las condiciones de la zona 2 del diagrama de Winkler con las predicciones establecidas en la investigación. Teniendo en cuenta que los análisis arrojaron que se debe mejorar el proceso de triturado, para encontrar parámetros cercanos a los establecidos por la Norma técnica colombiana.

10.1.1. 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 milímetros (figura 93), por lo que se propuso cambiar el tipo de trituración o rediseñar el existente a base de martillos, el cual puede ser también a base de bolas con lo cual se obtendrán las características idóneas en cuanto al tamaño de las partículas de arena y de esta manera lograr que las partículas se conformen mejor en el laminado, mezclado y extruido, donde además en cocción las partículas conseguirán más rápidamente el punto de fusión.

Figura 93. Sección de bloque terminado con partículas de arena mayores a 2 mm.



Fuente: Elaboración propia.

11. CONCLUSIONES

Se evidencia, que el tamaño de las partículas en su mayoría de arena al pasar por las etapas de triturado y laminado no poseen la granulometría adecuada, afectando la absorción de agua. La bibliografía establece que el tamaño de estas partículas debe ser menores de 2 milímetros. Por lo anterior, se propone el rediseño los componentes de estos equipos, se ajusten los parámetros de funcionamiento o el cambio por otra máquina con mejor tecnología (como un molino trapezoidal), incluir una etapa tamizado al inicio del proceso debido a que la línea de producción (alimentación en la tolva hasta la extrusión), se encuentra definida por medio de bandas transportadoras.

El espesor de las paredes de los bloques H10 no cumple con los parámetros establecidos en la norma NTC 4205, debido a que se encuentran por debajo del valor mínimo requerido, mientras que el espesor de los tabiques y el nervio se encuentran por encima del valor mínimo establecido en la norma.

La norma NTC 4205 establece que para productos cerámicos de mampostería no estructural el porcentaje la absorción de agua debe ser máximo de 13,5%. Como resultado de los datos obtenidos se puede concluir que los bloques seis huecos no cumplen con lo estipulado por la norma.

Los valores de resistencia están por debajo de los establecido por la norma NTC 4205 entre los bloques son similares por lo cual se puede decir que estos bloques tienen baja resistencia mecánica relacionado con la cantidad de partículas de arena de la pasta cerámica.

El número de las muestras óptimas determinadas en esta etapa fueron dos (2) m7 y m8 con la combinación de tres (3) muestras (M1, M2 y M5). Una vez obtenido el producto de las diferentes mezclas, se compararon los resultados basados en la norma NTC 4017 y 4205, las cuales determinan los procedimientos y parámetros para determinar rangos de calidad del producto final.

Dentro de la clasificación de Winkler, las muestras se comportan como suelos Franco-Arcillo-Limosos lo que implica que deben usarse temperaturas superiores a los 950°C para obtener productos que cumplan con los requisitos establecidos de la Norma Técnica Colombiana NTC 4205. Además, como los porcentajes de arena que están entre el 40 y 60% y los porcentajes de arcilla que no superan el 35%; estos valores ratifican que estas materias primas no pueden usarse como único componente en las pastas de producción.

De acuerdo al sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) y al diagrama de Casagrande, se puede observar que todas las muestras se encuentran en la zona CL – ML, sabiendo que (ML, son Limos inorgánicos y arenas muy finas, limos limpios, arenas finas, limosas o arcillosas, o limos arcillosos con ligera plasticidad. – CL, son Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas.), de lo que se puede concluir que las muestras de arcillas seleccionadas se puede utilizar para la fabricación de productos de mampostería para la construcción.

Las mezclas presentaron la misma tendencia para los análisis físico cerámicos realizados; pero la mezcla preparada con la composición de las muestras (33,33 – 33,33 – 33,33 %), obtuvieron el mejor comportamiento la mezcla m7, en cuanto a: hidrometría de (58,99 arena, 20,93 limo y 20,06 arcilla), resistencia mecánica de 27,03 KgF/cm², contracción lineal de 6,059±0,25% y absorción de agua de 20,117% siendo esta última inevitable por el comportamiento de las partículas de gran tamaño.

Dentro de las observaciones asociadas a los análisis realizados, se puede apreciar que las muestras 1 y 2 obtenidas son aptas para la utilización de cerámica roja, pero se hace necesario la mezcla con otra arcilla con la cual se maximicen los recursos en cuanto a materia prima de la empresa.

Resultados de medidas de difracción de rayos X mostraron una secuencia de modificaciones químicas y estructurales, como la descomposición y formación de nuevas fases, en las muestras de arcilla sometidas a tratamiento térmico. Los componentes de las muestras fueron determinados, identificándose cuarzo en un 38,1%, albita en un 13,7%, microclina en un 10,3%, montmorillonita en un 2.6%, moscovita en un 19,1% y caolinita en un 16,2%.

Con los análisis de fluorescencia de rayos X, se obtuvo la presencia de Arcillas montmorilloníticas debido a que su composición química es: SiO₂=48-56%, Al₂O₃=11-22%, MgO=0,3-0,8%, teniendo en cuenta los valores para la mezcla m7 de: SiO₂=54,743%, Al₂O₃=20,670, MgO=0,898, CaO=1,845, Fe₂O₃=6,567 y K₂O=2,926, Como las más importantes.

Los resultados encontrados en este trabajo demuestran la posibilidad de utilizar la arcilla evaluada como materia prima para la fabricación de ladrillos de coloración rojiza. La caracterización físico-química y cerámica permitió identificar una composición elemental y la existencia de fases cristalinas.

Los análisis térmicos presentan información consecuente con las fases encontradas; el comportamiento a altas temperaturas demostró imposibilidad fusionar la arcilla a temperaturas mayores de 1000°C debido a las características de la materia prima, mientras que a temperaturas de 950°C predominan los fenómenos de sinterización y la integridad del material no se vio afectada, lo cual fue validado con los diagramas ternarios y los análisis físico cerámico realizado a las posibles dos mezclas óptimas encontradas a nivel experimental.

Se encontró que el material analizado se categoriza como “Arcilla inorgánica de baja plasticidad” según los resultados del análisis de Límites de Atterberg, también se determinó que se trata de una arcilla de extrusión complicada, lo cual es un punto a tratar para los procesos de manufactura de los bloques en la empresa.

Los procesos de fabricación actual establecido por la empresa no cuenta con los parámetros de cocción en los cuales se pueda mantener la temperatura ideal para el proceso de quema, por lo que en muchas ocasiones presentan alta variabilidad en sus resultados debido a que carecen de métodos adecuados para la toma de datos; produciendo unidades menos densas,

aumento en el porcentaje de poros y disminución de resistencias debido a que principalmente preocupación garantizar el despacho de la producción hacia los clientes sin tener como factor principal la calidad de la pieza de mampostería basados en las normas técnicas nacionales vigentes.

Es de gran importancia mantener una curva óptima de cocción para garantizar la homogenización de la fusión de las partículas como también reducir las imperfecciones que se pueden presentar al momento de no alcanzar las temperaturas establecidas en la literatura.

Se hace necesaria la mejora de los equipos existentes, con la finalidad de optimizar la calidad del producto final en cuanto a absorción de agua además de realizar seguimiento a los procesos para posteriormente solicitar la certificación de calidad del producto, teniendo en cuenta que la empresa está certificada en su proceso productivo.

12. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se recomienda hacer análisis con diferentes tamaños de partículas menores a los 2 milímetros, para determinar el incremento o decremento en la absorción y de esta manera cumpla con las especificaciones para el bloque H-10. Una vez determinado esto, comprar una máquina que reduzca el tamaño de las partículas de arena o rediseñar la maquina existente (Triturador) con lo cual se mejorara evidentemente el producto final en cuanto a absorción de agua porque la resistencia mecánica ya la cumple.

Se recomienda hacer seguimiento y mejora de las variables del proceso como: tamaños de partículas, absorción de agua, plasticidad y temperatura, con la finalidad de controlar las variables definidas de mezcla cerámica para la fabricación de productos cerámicos de mampostería para la construcción, y de esta manera garantizar la trazabilidad de la ventana del proceso productivo propuesta. Como también la implementación de nuevas arcillas para optimizar la calidad del producto actual.

Se propone en trabajos futuros, realizar pruebas aleatorias a las etapas del proceso para definir los tamaños de las partículas como también validar la incorporación de una muestra con los tamaños de partícula óptimas.

Actualmente debido a que la empresa no cuenta con un seguimiento de la temperatura en el horno, se propone como trabajo futuro y recomendación implementar herramientas tecnológicas como arduino y termocuplas para controlar la curva optima de cocción que según los análisis realizados los productos se conforman a una temperatura de 1500°C, temperaturas mayores incurrir a mayores gastos de carbón.

Si se tuviera la licencia del software para el análisis de los diagramas ternarios, se podrían determinar las fases y temperaturas equivalentes para cada porcentaje de los componentes y de esta manera realizar experimentos para obtener ladrillos refractarios en la forma de fase mullita.

13. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y ELECTRÓNICAS

- [1] F. Alvarez Blanco, “Lección 3. Propiedades de las arcillas,” *Universidad de Oviedo*, 2005. [Online]. Available: www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion3.PropiedadesArcillas.pdf.
- [2] C. Hernando, H. Sandoval, J. Carolina, G. Cristancho, Ó. Eduardo, and P. Naranjo, “Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio,” *Rev. Fac. Ing. UPTC.*, vol. 21, no. 32, pp. 21–40, 2012.
- [3] L. Duitama, C. Espitia, and J. Mojica, “Composición mineralógica y química de las arcillas empleadas para cerámica roja en las zonas de Medellín,” *Rev. Acad. Colomb.*, no. 34, pp. 555–564, 2004.
- [4] I. Bernal, H. M. Cabeza, J. Espitia, J. Mojica, and J. Quintero, “Análisis próximo de arcillas para cerámica,” *Rev Acad. Colomb. Cienc*, vol. XXVII, no. 105, pp. 569–578, 2003.
- [5] INYPSA and ITGE, *Inventario Nacional de Arcillas Especiales*, Ministerio. España: Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 2000.
- [6] R. S. Macedo, R. R. Menezes, G. A. Neves, and H. C. Ferreira, “Estudo de argilas usadas em cerâmica vermelha,” *Ceramica*, vol. 54, no. 332, pp. 411–417, 2008.
- [7] S. Mahmoudi, E. Srasra, and F. Zargouni, “The use of Tunisian Barremian clay in the traditional ceramic industry: Optimization of ceramic properties,” *Appl. Clay Sci.*, vol. 42, no. 1–2, pp. 125–129, Dec. 2008.
- [8] C. M. F. Vieira, R. Sánchez, and S. N. Monteiro, “Characteristics of clays and properties of building ceramics in the state of Rio de Janeiro, Brazil,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 5, pp. 781–787, May 2008.
- [9] Swisscontact, “Mejoramiento de la materia prima para la producción de ladrillos de calidad,” Bolivia, 2011.
- [10] G. A. Carvajalino Gentil and J. P. Hernandez Pallares, “Estudio de las Propiedades Físicas y Mecánicas de los Bloques H-10 Utilizados en el Municipio de Ocaña,” 2014.
- [11] D. Zuluaga Castrillón, A. P. Henao Arrieta, D. F. García Palacio, J. E. Rodríguez, Á. M. Hoyos Machado, M. E. López, and C. Gómez Álvarez, “Caracterización térmica, química y mineralógica de un tipo de arcilla roja propia de la región andina Colombiana, empleada para la producción de ladrillos para construcción,” *Rev. Colomb. Mater.*, no. 9, pp. 53–63, 2016.
- [12] J. Sánchez Molina, J. A. Orozco Cacique, and L. Peñaloza Isidro, “Evaluación de mezclas de arcillas para la fabricación de ladrillos refractarios que sirvan para la reconversión tecnológica de los hornos utilizados en Norte de Santander,” *Rev. Investig. - Univ. del Quindío*, vol. 26, no. 1, pp. 57–64, 2014.
- [13] J. Sánchez Molina and D. Alvarez Rozo, “Evaluación de materias primas utilizadas en la fabricación de baldosas de gres en el sector cerámico de Norte de Santander (Colombia),” *Respuestas*, vol. 21, no. 2, pp. 48–56, 2016.
- [14] L. J. Quintero Lemus and R. J. Gallardo Amaya, “Caracterización mineralógica de arcillas expansivas con fines de estabilización,” *Ingenio UFPSO*, vol. 8, pp. 83–92, 2015.
- [15] B. K. Ngun, H. Mohamad, K. Katsumata, K. Okada, and Z. A. Ahmad, “Using design of mixture experiments to optimize triaxial ceramic tile compositions incorporating

- Cambodian clays,” *Appl. Clay Sci.*, vol. 87, pp. 97–107, Jan. 2014.
- [16] H. Gutiérrez Pulido and R. De La Vara Salazar, *Análisis y diseño de experimentos.*, McGraw-Hil., vol. 1. Mexico, 2015.
- [17] M. Coronado, A. M. Segadães, and A. Andrés, “Combining mixture design of experiments with phase diagrams in the evaluation of structural ceramics containing foundry by-products,” *Appl. Clay Sci.*, vol. 101, pp. 390–400, Nov. 2014.
- [18] M. Lassinantti Gualtieri, M. Romagnoli, and A. F. Gualtieri, “Influence of body composition on the technological properties and mineralogy of stoneware: A DOE and mineralogical-microstructural study,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 31, no. 5, pp. 673–685, 2011.
- [19] R. R. Menezes, H. G. M. Neto, L. N. L. Santana, H. L. Lira, H. S. Ferreira, and G. A. Neves, “Optimization of wastes content in ceramic tiles using statistical design of mixture experiments,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 28, no. 16, pp. 3027–3039, 2008.
- [20] E. A. Castiblanco Rodríguez, “Evaluación del Comportamiento Geomecánico de Arcillas en el Sector de Campoalegre – Ciudad de Barranquilla,” Universidad Nacional de Colombia, 2014.
- [21] E. E. González Villegas, “Modificación y caracterización de un material arcilloso tipo esmectita de potencial aplicación en catálisis,” Universidad Nacional de Colombia, 2013.
- [22] R. P. J. E. Muñoz Meneses R. A., Muñoz Chaves J.A., Mancilla P, “Caracterización fisicoquímica de arcillas del municipio de Guapi- costa pacífica caucana (Colombiana),” *Química*, vol. 31, pp. 537–544, 2007.
- [23] S. a Ibitoye and a a Afonja, “Characterization of Cold Briquetted Iron (CBI) By X-Ray Diffraction Technique,” *J. Miner. Mater. Charact. Eng.*, vol. 7, no. 1, pp. 39–48, 2007.
- [24] J. Środon, “Identification and Quantitative Analysis of Clay Minerals,” *Dev. Clay Sci.*, vol. 1, no. C, pp. 765–787, 2006.
- [25] N. J. ; Perales López and M. Barrera Vargas, “Análisis Estructural Por Drx De Una Arcilla Natural Structural Analysis By Drx of a Modified Colombian Natural Clay,” *Rev. Investig. - Univ. del Quindío*, vol. 24, no. 1, pp. 100–106, 2013.
- [26] J. D. S. Amado, P. Y. M. Villafrades, and E. M. C. Tuta, “Caracterización de arcillas y preparación de pastas cerámicas para la fabricación de tejas y ladrillos en la región de Barichara, Santander,” *DYNA*, vol. 78, no. 167, pp. 50–58, 2011.
- [27] N. Afanador, A. Carolina, I. Jaime, C. Alberto, and L. Durán, “Caracterización de arcillas empleadas en pasta cerámica para la elaboración de ladrillos en la zona de Ocaña , Norte de Santander,” *Epsilon*, vol. 20, no. ISSN 1692-1259, pp. 101–119, 2013.
- [28] L. Cely Illera, *Comportamiento Térmico y Mecánico de una arcilla de la región de Norte de Santander*. 2012.
- [29] J. Barranzuela, *Proceso productivo de los ladrillos de arcilla producidos en la región piura*. 2014.
- [30] S. A. Jácome Manzano, *Evaluación termodinámica del proceso de cocción y análisis de gases en hornos a cielo abierto y Hoffman en Ocaña*, Universida. Ocaña: Repositorio ufps, 2012.
- [31] T. V. Rodríguez, *Los minerales industriales en Castilla y León.*, Domènech e., vol. 1,

- no. 1500. España, 2007.
- [32] M. G. R. Emilia and Suárez Barrios, “Las arcillas (propiedades y usos),” *Univ. Complut. (Madrid); Univ. Salamanca*, p. 25, 2004.
- [33] F. A. V. L. Andrade, E.F. Covelo, “Uso de Arcillas Especiales para Depuración de Aguas Residuales,” *Inf. Tecnológica*, vol. 16, no. 1, pp. 1–15, 2005.
- [34] L. A. Díaz Rodríguez and R. Torrecillas, “Arcillas cerámicas: Una revisión de sus distintos tipos, significados y aplicaciones,” *Bol. la Soc. Esp. Ceram. y Vidr.*, vol. 41, no. 5, pp. 459–470, 2002.
- [35] Fedesarrollo, “La Minería en Colombia : Impacto Socioeconómico y Fiscal,” 2012.
- [36] G. P. Montoya rivas and R. Montoya rivas, “Caracterización del sector cerámico tradicional del valle de Aburrá y los riesgos profesionales latentes en su proceso productivo.,” *Lámpsakos*, vol. 12, pp. 34–42, 2014.
- [37] Fedesarrollo, “Prospectiva Macroeconómica 2016,” 2016.
- [38] E. Kamseu, C. Leonelli, D. N. Boccaccini, P. Veronesi, P. Miselli, G. Pellacani, and U. C. Melo, “Characterisation of porcelain compositions using two china clays from Cameroon,” *Ceram. Int.*, vol. 33, no. 5, pp. 851–857, 2007.
- [39] S. N. Monteiro and C. M. F. Vieira, “Influence of firing temperature on the ceramic properties of clays from Campos dos Goytacazes, Brazil,” *Appl. Clay Sci.*, vol. 27, no. 3–4, pp. 229–234, 2004.
- [40] J. A. Junkes, M. A. Carvalho, A. M. Segades, and D. Hotza, “Ceramic tile formulations from industrial waste,” *InterCeram Int. Ceram. Rev.*, vol. 60, no. 1, pp. 36–41, 2011.
- [41] Y. Q. Martinez, “Caracterización fisicoquímica de cuarzo en el municipio de la playa de belén (Norte de Santander),” *Univ. Fr. paula santander ocaña*, p. 84, 2012.
- [42] G. P. A. Y. V. Rodriguez, “Deasarrollo de cerámicos refractarios Sílico-Aluminosos a partir de arcillas caoliníticas de Barichara Santander,” *Univ. Ind. Santander*, vol. 1, no. 1, pp. 1–127, 2009.
- [43] Luis A Cisternas, *Diagramas de fases y su aplicación*, Reverte. España, 2009.
- [44] Y. L. Morales Pérez and Z. P. Niño Caceres, “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, 2006.
- [45] Y. L. Morales Pérez and Z. P. Niño Caceres, “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 energeticos.,” Universidad Industrial de Santander, 2006.
- [46] J. F. Bartolomé, “El Caolín: composición, estructura, génesis y aplicaciones,” *Bol. Soc. española Cerámica y Vidr.*, vol. 36, p. 20, 1997.
- [47] G. Mendoza, H, Bautista, “Diseño Experimental,” *Universidad Nacional de Colombia*, 2002. .
- [48] C. Martínez Bencardino, *Estadística y Muestreo*, ECOE. Colombia, 2012.
- [49] D. C. Ortega Pérez, M. O. Bustamante Rua, D. F. Gutiérrez Rôa, and A. A. Correa Espinal, “Mixture experiments in industrial formulations Diseño de mezclas en formulaciones industriales,” *DYNA*, vol. 82, no. 189, pp. 149–156, 2015.
- [50] H. Gutiérrez Pulido and R. De La Vara Salazar, *Análisis y diseño de experimentos*, Mc Graw Hi. Mexico, 2008.

- [51] Stargraphics, “Diseño de Experimentos –Diseños de Mezclas,” in *Biblioteca Stargraphics*, 2006, p. 32.
- [52] S. F. Álvarez Guerrero, “Optimización del proceso de mezcla de arcilla para la producción de ladrillos, en el sector artesanal,” Universidad de Cuenca, 2015.
- [53] R. A. García-León, M. A. Acosta Pérez, and E. Flórez Solano, “Análisis del comportamiento de los frenos de disco de los vehículos a partir de la aceleración del proceso de corrosión,” *Tecnura*, vol. 19, no. 45, pp. 53–63, 2015.
- [54] D. S. Behar, “Introducción a la Metodología de la Investigación,” *Shalom*, vol. 1, no. 978-959-212-783-7, pp. 1–94, 2010.
- [55] R. Hernández-Sampieri, C. Fernández-Collado, and P. Baptista-Lucio, *Análisis de los datos cuantitativos*. 2006.
- [56] Ecocarbon, *Muestreo y Análisis*. Bogota, Colombia, 1995.
- [57] M. Benassini, “Investigación de Mercados. Segunda Edición,” in *Pearson*, México: Pearson Prentice Hall, 2006, p. 266.
- [58] O. Riojas Castillo and N. E. Rodríguez Montaña, “Características de hornos para productos cerámicos del Parque Minero Industrial El Mochuelo, localidad 19 de Bogotá, D.C.,” *Con-Ciencias*, 2004.
- [59] Google Maps, “Maps of World,” 2016. [Online]. Available: <https://www.google.com.co/maps/@8.2366978,-73.3015168,14z>.
- [60] C. A. Payares Perez, “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,” 2014.
- [61] S. A. Jacome Manzano, “Evaluación termodinámica del proceso de cocción y análisis de gases en hornos a cielo abierto y Hoffman en Ocaña,” 2015.
- [62] Gerencia Hora Ltda, “Empresa Hora Ltda - Ladrillera Ocaña,” Ocaña, Norte de Santander, 2015.
- [63] R. A. García-León and E. Flórez Solano, “Determinación de la ventana del proceso productivo en la fabricación de bloques H-10 en Ocaña Norte de Santander y la región,” *Ingenio UFPSO*, vol. 9, no. 2011–642X, pp. 35–43, 2016.
- [64] I. S. A. S. Vacío y Presión, “Bomba de Vacío,” 2016. [Online]. Available: <http://insutecsas.com/wp-grass/>.
- [65] M. A. Morales Galoc, “Ladrillos, Tecnología de los materiales en la construcción,” Peru, 2012.
- [66] F. Blanco Álvarez, “Cerámicos lección 7. Cocción.,” in *Universidad de Oviedo*, 2011, pp. 1–26.
- [67] M. S. A. S. Maquinaria para Ladrilleras, “Carbojet,” 2016. [Online]. Available: <http://maquilob.net/carbojet/>.
- [68] S. Rozo Rincón, J. Sánchez Molina, and D. Alvarez Rozo, “Propiedades físico mecánicas de bloques H10 fabricados en el área metropolitana de Cúcuta,” *Cienc. e Ing. Neogranadina*, vol. 24, no. 1, pp. 67–78, 2014.
- [69] R. A. García-León, R. Bolívar León, and E. Flórez Solano, “Validación de las propiedades físico-mecánicas de bloques H-10 fabricados en Ocaña Norte de Santander y la región,” *Ingenio UFPSO*, vol. 10, no. 2011–642X, pp. 17–26, 2016.
- [70] R. A. García-León and R. Bolívar León, “Caracterización Hidrométrica de las Arcillas Utilizadas en la Fabricación de Productos Cerámicos en Ocaña , Norte de Santander,”

- INGE CUC*, vol. 13, no. 1, pp. 1–9, 2017.
- [71] ICONTEC, “Norma Técnica Colombiana NTC 4321-3. Ingeniería Civil y Arquitectura. Baldosas Cerámicas. Parte 3. Método de ensayo para determinar la absorción de agua, porosidad aparente, densidad relativa aparente y densidad aparente,” 1998.
- [72] ICONTEC, “NTC-4017. Métodos para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla,” *Norma Técnica Colomb.*, pp. 1–30, 2005.
- [73] C. Augusto García and M. L. García Vaca, María Camila, Vaca Bohórquez, “Resistencia mecánica de ladrillos preparados con mezclas de arcilla y lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales.,” *Tecnura*, vol. 17, no. 38, pp. 68–81, 2013.
- [74] ICONTEC, “NTC-1522. Ensayo para determinar la granulometría por tamizado.,” *Norma Técnica Colomb.*, pp. 1–8, 1979.
- [75] INV.E–123, “Análisis granulométrico de suelos por tamizado.,” *Normas Invias*, pp. 1–6, 1998.
- [76] M. Das Braja, *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*, Thomson Le. México, 2001.
- [77] L. Bañon Blázquez, “Clasificación De Suelos,” in *Generalidades*, 2012, pp. 1–9.
- [78] D. A. Amariz Martínez, “Influencia del Hollín sobre la Resistencia a la Compresión de Ladrillos Cerámicos,” *Inge Cuc*, vol. 12, no. 2, pp. 97–102, 2016.
- [79] D. F. Navarro, E. Góngora Leyva, A. Rodríguez Suárez, and O. Martínez Frómata, “Evaluación de mezclas de arcillas de la región de Centeno, Moa, Cuba,” *Ingenierías*, vol. VII, no. 22, pp. 45–54, 2004.
- [80] ASTM D422-63, “Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils,” *ASTM Int.*, vol. 63, 2007.
- [81] INV.E–124, “Análisis Granulométrico por medio de Hidrómetro,” pp. 1–20, 2013.
- [82] INVIAS, “Análisis granulométrico por medio del hidrómetro (I.N.V.E -124 - 2007),” pp. 1–20, 2007.
- [83] A. Fernández Martínez, C. J. Sánchez, J. Parras, and A. Acosta, “Caracterización Tecnológica de las materias primas Cerámicas de la Sagrada (Toledo),” *Geogaceta*, vol. 3, no. 0213683X, p. 4, 1996.
- [84] J. García, H. Medina, and D. Núñez, “El método del hidrómetro: influencia de los tiempos de lecturas en el cálculo de la distribución del tamaño de partículas en suelos de la Habana,” *Cultiv. Trop.*, vol. 29, no. 2, pp. 21–26, 2008.
- [85] J. S. S. Román, “Diagramas triangulares,” *Dpto. Geología. Universidad de Salamanca*. España, Salamanca., pp. 1–2, 2014.
- [86] L. Mintec Ceramic, “Resultados Caracterización Tecnológica de Materias Primas Honduras y Desarrollo de Nuevas Alternativas de Pastas de Producción ”, 2015.
- [87] ICONTEC, “NTC-4630. Método de ensayo para la determinación del límite líquido, del límite plástico y del índice de plasticidad de los suelos cohesivos.,” *Norma Técnica Colomb.*, pp. 1–10, 1999.
- [88] INV.E–125, “Determinación del límite líquido de los suelos,” *Normas Invias*, vol. 1999, pp. 1–13.
- [89] INV.E–126, “Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos,” *Normas Invias*, pp. 1–7, 1999.
- [90] J. Morales Gúeto, *Tecnología de los Materiales Ceramicos*, Diaz Santo. España, 2005.

- [91] R. Holtz and W. Kovacs, *An introduction to geotechnical engineering*, Prentice H. New Jersey, 1987.
- [92] F. Blanco Álvarez, “Cerámicos lección 6. Plasticidad.,” in *Universidad de Oviedo*, 2011, pp. 1–11.
- [93] C. M. F. Vieira, R. Sánchez, and S. N. Monteiro, “Characteristics of clays and properties of building ceramics in the state of Rio de Janeiro, Brazil,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 5, pp. 781–787, 2008.
- [94] M. Marsigli and M. Dondi, “Plasticità delle argille italiane per laterizi e previsione del loro comportamento in foggatura.” *L’Industria di laterizi*, Francia, pp. 214–222, 1997.
- [95] D. C. Ortega-pérez, M. O. Bustamante-rua, D. F. Gutiérrez-rôa, and A. A. Correa-espinal, “Mixture experiments in industrial formulations Diseño de mezclas en formulaciones industriales,” *DYNA*, vol. 82, no. 189, pp. 149–156, 2015.
- [96] L. Cely-Illera, “Raw materials for the ceramics industry from norte de santander. I. Mineralogical, chemical and physical characterization,” *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, no. 80, pp. 31–37, 2016.
- [97] SECV, “Boletín de la sociedad Española de Cerámica y Vidrio,” *Cerámica y Vidr.*, vol. 50, no. 0366–3175, pp. 1–76, 2011.
- [98] J. F. Gelves and J. Sánchez, “Comportamiento de las arcillas del Área Metropolitana de Cúcuta sometidas a proceso de moldeo por extrusión.,” *Respuestas*, vol. 14, no. 2, pp. 32–38, 2009.
- [99] Norma-Tecnica-Colombiana, “Determinación del módulo de rotura y la resistencia a la flexión en probetas cerámicas NTC 4321-4,” 1997.
- [100] S. M. Rozo Rincón, J. Sánchez Molina, and J. F. Gelves Díaz, “Evaluación de minerales alumino silicatos de Norte de Santander para fabricar piezas cerámicas de gran formato Norte de Santander Alumino silicates Minerals ’ Evaluation for the Big Scale Ceramic Pieces Manufacturing Avaliação de minerais aluminossilicato,” *Fac. Ing.*, vol. 24, pp. 53–61, 2015.
- [101] S. Selmani, N. Essaidi, F. Gouny, S. Bouaziz, E. Joussein, A. Driss, A. Sdiri, and S. Rossignol, “Physical-chemical characterization of Tunisian clays for the synthesis of geopolymers materials,” *J. African Earth Sci.*, vol. 103, pp. 113–120, 2015.
- [102] B. Roquet María, “Métodos analíticos en geoquímica (DRX-FRX) y Pegmatitas,” pp. 1–12, 2012.
- [103] R. Ramírez, G. Andrade, J. José, S. Juárez, and M. Carmen, “Caracterización de arcillas del Estado de Guanajuato y su potencial aplicación en cerámica,” *Acta Univ. ISSN*, vol. 12, no. 1, pp. 23–30, 2002.
- [104] C. W. Bale, E. Béglise, P. Chartrand, S. A. Deckerov, G. Eriksson, A. E. Gheribi, K. Hack, I. H. Jung, Y. B. Kang, J. Melançon, A. D. Pelton, S. Petersen, C. Robelin, J. Sangster, P. Spencer, and M. A. Van Ende, “FactSage thermochemical software and databases, 2010-2016,” *Calphad Comput. Coupling Phase Diagrams Thermochem.*, vol. 54, pp. 35–53, 2016.
- [105] N. . Quaranta, M. . Caligaris, M. . Unsen, H. . López, N. . Lalla, G. . Pelozo, and A. . Cristobal, “Diseño de productos cerámicos con la incorporación de diversos residuos siderúrgicos,” *Iberimet XI*, pp. 1–14, 2010.
- [106] Goodfellow, “División cerámica y vidrio,” 2016. [Online]. Available: <http://www.goodfellow-ceramics.com/sp/productos/ceramicas/mullita/>.

- [107] C. Castell, *Tecnología Cerámica Aplicada*, SACMI. Castellon, España, 2001.
- [108] S. M. Roza Rincón, J. Sánchez Molina, and J. F. Gelves Díaz, “Evaluación de minerales aluminio silicatos de Norte de Santander para fabricar piezas cerámicas de gran formato,” *Fac. Ing.*, vol. 24, no. 38, pp. 53–61, 2014.
- [109] L. Duitama, C. Espitia, J. Mojica, J. Quintero, and F. Romero, “Composición mineralógica y química de las arcillas empleadas para cerámica roja en las zonas de Medellín,” *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, vol. 34, no. 109, pp. 555–564, 2004.
- [110] E. L. Zeballos-velásquez, P. C. Melero, A. L. Trujillo, M. E. Mejía, and M. Ceroni, “Estudio estructural de arcillas de Chulucanas por difracción de rayos-X y método de Rietveld,” *Rev. Mater.*, vol. 19 N 2, no. 1517–7076, pp. 159–170, 2014.
- [111] L. C. Illera, C. C. Illera, and K. A. Contreras, “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 la Soc. Española Cerámica y Vidr.*, vol. 54, no. 2, pp. 77–83, 2015.
- [112] G. Peña Rodríguez and L. R. Ortega Triana, “Caracterización morfológica y estructural de polvos de cenizas volantes,” *i+D*, vol. 14, no. 2, pp. 14–19, 2014.
- [113] C. M. Rendon Ríos, “Uso de materias primas colombianas para el desarrollo de baldosa cerámicas con alto grado de gresificación,” Universidad Nacional de Colombia sede Medellin, 2009.
- [114] W. H. Bragg, “The Reflection of X-rays by Crystals,” *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 89, no. 610, pp. 246–248, 1913.
- [115] M. A. Macías López, “Estudio de las transformaciones en estado sólido de las arcillas de San José de Cúcuta utilizadas en la fabricación de baldosas mediante caracterización mineralógica por difracción de rayos x de muestras policristalinas,” Universidad Industrial de Santander, 2006.
- [116] R. Amorocho Parra, “Análisis de la interacción química entre los fluidos de formación, fluidos de perforación y composición mineral de rocas arcillosas en la estabilidad del pozo,” Universidad Industrial de Santander, 2004.
- [117] J. Linares, F. Huertas, and J. Capel, “La arcilla como material cerámico. Características y comportamiento,” in *Universidad de Granada*, 2008, pp. 479–490.
- [118] A. Douglas, F. Skoog, J. Holler, and N. Timothy A, *Principios de análisis instrumental 5ª edición.*, McGraw-Hil. Interamericana de España, 2001.
- [119] H. A. Sáenz García, “Caracterización fisicoquímica de ultrafinos de arcillas y su efecto sobre comportamiento reológico,” Universidad Nacional de Colombia, 2014.
- [120] Linseis., “Thermal Analysis,” 2012. .
- [121] Y. E. Ramírez Calderón, “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, 2012.
- [122] A. Florez Arenas, “Caracterización de arcillas y preparación de pastas cerámicas para la fabricación de ladrillos en la ladrillera Mariscal Robledo S.A.,” *Fac. Tecnol. Química Ind. Univ. tecnológica Pereira*, pp. 1–19, 2015.
- [123] L. Cely Illera and R. Bolívar León, “Materia prima para la industria cerámica de Norte de Santander . II . Evaluación del comportamiento térmico y su incidencia en las propiedades tecnológicas,” *Respuestas*, vol. 20, no. 1, pp. 84–94, 2015.
- [124] L. Sanchez, “Tema 6. Análisis térmico: TG y DTA,” *Universidad de Cordoba*, 2016.

- [Online]. Available: <http://www.uco.es/~iq2sagrl/TranspATG.pdf>.
- [125] A. Barba, V. Beltrán, C. Feliu, J. Garcia, F. Gines, E. Y. Sánchez, and V. Sanz, *Manual para el control de la calidad de materias primas arcillosas*, Instituto. Castellon, España, 2004.
- [126] G. Guerrero Gomez, D. Marrugo Carreazo, and J. Gomez Camperos, “Desarrollo de instrumento virtual enfocado en la adquisición de datos para generar perfiles de temperatura en hornos,” *Ingenio UFPSO*, vol. 8, no. 2011–642X, pp. 47–58, 2015.
- [127] M. A. Sanchez Criado, “Planificar un sistema de gestión ambiental para la Empresa Hora Ltda -Ladrillera Ocaña, según lo establecido en la Norma Técnica colombia NTC-ISO 14001:2004.,” 2014.
- [128] ICONTEC, “NTC-4205. Unidades de mamposteria de arcilla cocida. Ladrillos y bloques ceramicos,” *Norma Técnica Colomb.*, no. 571, p. 14, 2000.
- [129] G. T. Plan Basico de Ordenamiento Territorial, “Plano Geologico y Morfodinamico,” Colombia, 2002.

14. ANEXOS

Anexo 1. Procedimiento para la toma de muestras.

Para la toma de una muestra por canal, se debe seleccionar la pila de material cerámico y tener en cuenta los siguientes pasos se deben seguir para la toma muestras:

- El sitio a muestrear debe estar perfectamente localizado, en lo posible se realizará el respectivo levantamiento topográfico.
- Describir, registrar y levantar una columna local del manto de material cerámico y las condiciones del entorno.
- La muestra se obtiene por la elaboración de un canal mediante un corte uniforme y continuo.
- Se debe lograr una superficie lo más regular posible, con la implementación de picos, palas y espátulas.
- Se debe limpiar bien la superficie a muestrear hasta una profundidad de 5 centímetros como mínimo. En el caso particular a juicio geológico cuando sea necesario toma la muestra en un frente de mina inactiva, la profundidad deberá ser mayor de 10 centímetros.
- Delimitar la zona con tiza o cintas, así como los materiales y toma de datos.
- A continuación se procederá a realizar una limpieza de la zona de la pila teniendo en cuenta el formato de ubicación de la zona de muestreo (anexo 2).
- Extender sobre el piso una lona, sobre el cual caerá la muestra que se tome en el sitio, buscando aislarla de cualquier otro tipo de componentes.
- Una vez cumplidos los pasos anteriores, se procederá a cortar un canal en la pila perpendicular al techo y hasta la base. Este canal tendrá un ancho de 15 centímetros por 8 centímetros de profundidad.
- Se toma la muestra punzando con el pico de arriba hacia abajo, teniendo precaución de no profundizar más de un lado que de otro, hasta obtener las 2 muestras de 50 Kg cada una aproximadamente. Una de las muestras deberá ser conservada como muestra testigo.
- Para ese caso se usa el formato de identificación de la muestra (anexo 3).
- Finalmente, se empacan las muestras de 50 Kg para cada tipo de ensayo en bolsas plásticas dobles y cuidadosamente marcadas las que se introducirán en sacos de polietileno y se incluirá el anterior formato.
- La muestra de arcilla recolectada en el campo de 50 Kg, se le debe reducir de tamaño para ser enviada al laboratorio, donde se practicarán los análisis requeridos.

Anexo 2. Formato ubicación de la zona de muestreo.

		Hoja			
		Numero Muestra			
1. LOCALIZACIÓN					
Departamento		Municipio		Corregimiento	
Vereda		Zona		Sector	
Formación Geológica				Manto	
Canal		Otros			
Tipo de registro		Tomado por	Profesión	Entidad	Fecha
Nuevo	Actualizado				
Coordenadas (m)	Norte (Y)	Este (X)	Altitud	Posición del muestreo	
Referencia					
Trabajo realizado	Tipo	Fecha	Entidad	Referencia	Observaciones
Exploración					
Otro					
2. ANÁLISIS					
Cuarteo o preparación en sitio		Consideraciones sobre condiciones de observación y humedad			
Si	No				
Laboratorio para análisis	Cuarteo	A parcial	A completo	A testigo	Otros
3. MUESTRAS DE CANAL Y PRODUCCIÓN					
Segmento	Bolsa	Caja	Peso	Observaciones	Manto
Intercalación					
Roca de techo				Notas:	
Roca de piso					
Otros					
4. CONTROL					
Laboratorio	Fecha de Envío	Remisión	Enviado por	Recibido por	Resultados N°
Evaluación	Iniciación		Revisión		Aprobación
Fecha					
Nombre					
Firma					

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 3. Formato de identificación de la muestra.

		Fecha Muestreo	
Proyecto			
Numero de Muestra		Bolsa N°	
Tipo de Muestreo:	Canal		Otro
Tomado por			
Manto			
Mina			
Municipio			
Vereda			
Tipo de Análisis			
Observaciones			

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 4. Descripción de la empresa.

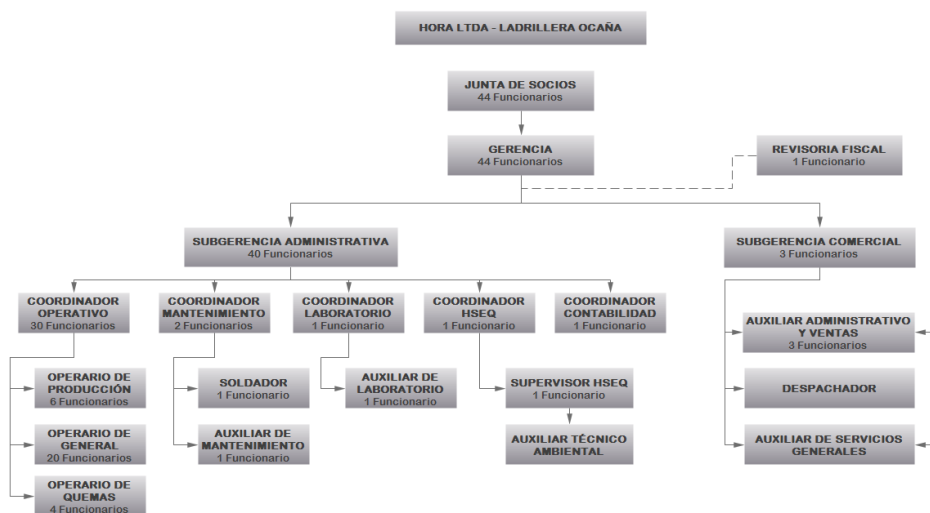
Misión. HORA LTDA. LADRILLERA OCAÑA es una empresa que se dedica a la fabricación y comercialización de productos de calidad en mampostería para la construcción, a través del uso y actualización de su recurso humano y tecnológico, orientado a la generación de un producto de alta calidad que cuenta con un proceso amigable con el medio ambiente, de bajo impacto en la salud y la seguridad de los trabajadores [127].

Visión. HORA LTDA. LADRILLERA OCAÑA será para el año 2015 una organización reconocida como una de las principales empresas del oriente colombiano en la fabricación y comercialización de productos de mampostería de alta calidad, contará con procesos altamente tecnificados y personal competente en las diferentes áreas logrando satisfacer la necesidad del cliente [127].

Objetivos de la empresa.

- Mantener el nivel de satisfacción de nuestros clientes
- Cumplir con los compromisos adquiridos demostrando disciplina y puntualidad con el tiempo de nuestra promesa de venta.
- Controlar los aspectos e impactos significativos asociados a la generación de residuos, buscando minimizar la contaminación y el consumo de recursos naturales.
- Promover condiciones de salud y seguridad que favorezcan el bienestar físico y mental de los trabajadores en sus puestos de trabajo.
- Asegurar el cumplimiento de los requisitos legales y de otra índole relacionada con las actividades de la empresa.
- Promover la mejora continua del Sistema Integral de gestión en la organización.

Descripción de la estructura organizacional



Anexo 5. Criterios de aceptación o rechazo.

En los resultados de los ensayos de absorción (inicial y final) como el de resistencia, se admite que una de las cinco muestras ensayadas alcance el límite individual en un 10 %, siempre y cuando se cumpla para el valor promedio señalado. En el caso de no cumplir con este requisito, se debe hacer un nuevo muestreo del lote y se deben repetir los ensayos, en donde si resultan nuevamente negativos, se debe rechazar definitivamente el lote [128]. Teniendo en cuenta lo anterior, se considera que el lote cumple si el 95 %, cumple totalmente con los requisitos establecidos por la norma técnica colombiana.

Tolerancia Dimensional. Las dimensiones exteriores de las muestras de cualquier tipo o clase pueden variar en un 2% por encima o por debajo de las medidas nominales especificadas, para todas las formas y tamaños que se fabriquen.

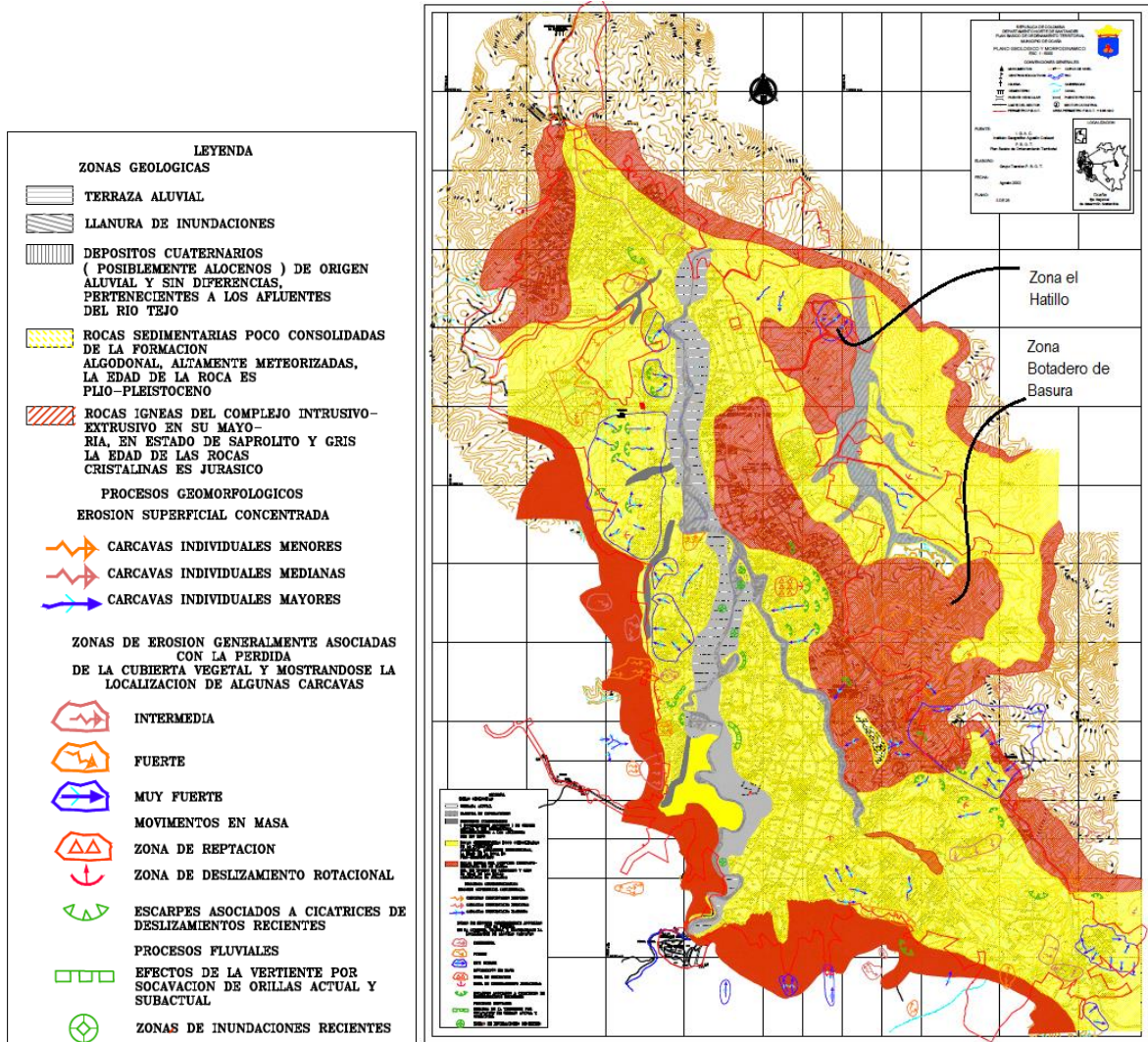
Textura y Color. La textura y el color deben especificarse libremente por el fabricante. Toda modificación a la textura lisa de la superficie de las muestras, tales como estrías, grabados, etc., se debe realizar preferiblemente sobre el producto luego de la extrusión o por cualquier método que no produzca fisuras o debilitamiento de las paredes. Las estrías, además de cubrir por lo menos el 50 % de la superficie de colocación, no pueden disminuir el espesor de la pared en más de 5 mm, su profundidad mínima debe ser de 1,5 mm y el ancho menor que 10 mm.

El color varía dentro de una gama, según el tipo de arcilla y el proceso de fabricación, y no puede usarse como parámetro de evaluación de calidad, sin que antes se realicen los ensayos de resistencia y absorción.

Fisuras. Los lados expuestos en las unidades de fachada no pueden tener fisuras que atraviesen el espesor de la pared o que tengan una longitud mayor que el 25 % de la dimensión de la pieza en la dirección de la fisura.

Consideraciones. Las unidades de mampostería pueden tener características especiales de diseño y calidad, por razones de exigencias acústicas, térmicas, de resistencia al fuego, arquitectónicas o constructivas, pero deben mantener los requisitos de absorción de agua y resistencia a la compresión para su uso principal (interior, exterior o estructural).

Anexo 6. Plano Geológico y Morfodinámico de Ocaña.



Fuente: [129]

Anexo 7. Clasificación USCS de los suelos.

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.
			CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas.
			OL	Limos orgánicos y arcillas orgánicas limosas de baja plasticidad.
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.
			CH	Arcillas inorgánicas de plasticidad alta.
			OH	Arcillas orgánicas de plasticidad media a elevada; limos orgánicos.
Suelos muy orgánicos			PT	Turba y otros suelos de alto contenido orgánico.

Fuente: [77]

Anexo 8. 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)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
Grupo:	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Porcentaje que pasa:											
N° 10 (2mm)	50 máx.	-	-	-				-			
N° 40 (0,425mm)	30 máx.	50 máx.	51 mín.	-				-			
N° 200 (0,075mm)	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. (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 subgrado	Excelente a bueno							Pobre a malo			

Fuente: [77]

Anexo 9. Distribución granulométrica por tamizado para todas las muestras.

TAMIZ (mm)	Abertura del Tamiz (mm)	Granulometría 1 Pasa (%):	Granulometría 2 Pasa (%):	Granulometría 3 Pasa (%):	Granulometría 4 Pasa (%):	Granulometría 5 Pasa (%):
4"	100	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
13/4"	80	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
21/2"	63	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2"	50	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1 - 1/2"	40	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1"	25	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4	20	96,90	97,02	100,00	98,46	100,00
1/2	12,5	96,14	96,09	97,13	97,08	99,87
3/8	10	95,31	93,90	94,98	94,50	97,15
#4	5	91,25	85,17	89,19	84,97	90,89
#10	2	82,71	66,27	79,97	66,31	79,54
#20	1,25	70,82	52,11	69,75	53,47	64,95
#40	0,4	62,05	44,42	59,49	47,03	50,18
#100	0,160	43,46	40,25	47,49	43,07	42,93
#200	0,080	42,01	38,97	43,70	40,26	41,28

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 10. Distribución granulométrica por Hidrometría para todas las muestras.

TAMIZ	Abertura del Tamiz (mm)	Granulometría 1 Pasa (%):		Granulometría 2 Pasa (%):		Granulometría 3 Pasa (%):		Granulometría 4 Pasa (%):		Granulometría 5 Pasa (%):	
		% Retenido	% Pasa	% Retenido	% Pasa	% Retenido	% Pasa	% Retenido	% Pasa	% Retenido	% Pasa
4"	100	0,0396227	41,1	0,0478874	35,2	0,0482543	16,6	0,0463905	22,6	0,0454299	25,6
13/4"	80	0,0299940	41,0	0,0345065	29,2	0,0348878	12,6	0,0338615	17,6	0,0328030	22,6
21/2"	63	0,0255476	40,9	0,0281745	29,2	0,0288957	10,6	0,0279650	15,6	0,0271109	20,6
2"	50	0,0225200	40,0	0,0243998	29,2	0,0251123	9,6	0,0243998	14,6	0,0236658	19,6
1 - 1/2"	40	0,0167342	39,2	0,0173170	28,2	0,0177571	9,6	0,0173806	13,6	0,0168655	18,6
1"	25	0,0123168	37,2	0,0126466	28,2	0,0131481	7,6	0,0127392	12,9	0,0123645	17,6
3/4	20	0,0088433	31,8	0,0089753	27,8	0,0093287	6,6	0,0091376	10,9	0,0088100	16,6
1/2	12,5	0,0063000	29,2	0,0063696	25,2	0,0066408	5,6	0,0065740	7,9	0,0062532	15,9
3/8	10	0,0045365	23,2	0,0045688	21,2	0,0046957	5,9	0,0047269	4,6	0,0044548	14,6
#4	5	0,0031654	21,8	0,0031765	19,2	0,0032749	4,9	0,0032857	3,6	0,0031986	8,6
#10	2	0,0021416	19,8	0,0021713	15,8	0,0022152	3,9	0,0022152	3,9	0,0021787	6,9
#20	1,25	0,0013465	13,8	0,0013555	12,6	0,0013780	2,9	0,0013780	2,9	0,0013555	5,9
#40	0,4	0,0011661	13,8	0,0011739	11,8	0,0011933	2,6	0,0011933	2,9	0,0011739	5,9
#100	0,160	0,0009521	13,8	0,0009585	11,8	0,0009775	1,9	0,0009744	2,9	0,0009649	4,9
#200	0,080	0,0007826	11,2	0,0007878	9,2	0,0007981	1,9	0,0007981	1,9	0,0007878	4,9

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 11. Lectura Hidrometría método de la empresa. Datos Hora Ltda.

Lecturas de Hidrometría							
LADRILLERA OCAÑA							
Muestra	Wi	Hora Inicial	Li	Ti	Hora Final	Lf	Tf
# 1-1	50 Gr	14:50	20	25°C	16:50	1	26°C
# 1-2	50 Gr	14:58	21	25°C	16:58	1	26°C
# 1-3	50 Gr	15:05	19	25°C	17:05	1	26°C
# 2-1	50 Gr	15:07	24	25°C	17:07	2	26°C
# 2-2	50 Gr	15:15	24	25°C	17:15	2	26°C
# 2-3	50 Gr	15:22	23	25°C	17:22	2	26°C
# 3-1	50 Gr	14:58	23	25°C	16:58	2	26°C
# 3-2	50 Gr	15:05	24	25°C	17:05	2	26°C
# 3-3	50 Gr	15:18	23	25°C	17:18	2	26°C
# 4-1	50 Gr	10:04	20	24°C	12:04	1	26°C
# 4-2	50 Gr	10:10	19	24°C	12:10	2	26°C
# 4-3	50 Gr	10:17	19	24°C	12:17	1	26°C
# 5-1	50 Gr	14:40	19	25°C	16:40	3	26°C
# 5-2	50 Gr	14:45	20	25°C	16:45	3	26°C
# 5-3	50 Gr	14:54	21	25°C	16:54	3	26°C
# 6 - 1	50 Gr	08:10	27	24°C	10:10	3	24°C
# 6 - 2	50 Gr	08:20	26	24°C	10:20	3	24°C
# 6 - 3	50 Gr	08:28	27	24°C	10:28	2	24°C

Lecturas inicial (Li), final (Lf), temperatura inicial (Ti), final del fluido (Tf) y el peso de la muestra (Wi).

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 12. Lectura Hidrometría método de la empresa. Datos Zonas Cercanas.

Lecturas de Hidrometría							
ARCILLAS DE LAS ZONAS CERCANAS							
Muestra	Wi	Hora Inicial	Li	Ti	Hora Final	Lf	Tf
#7 – PP	50 Gr	14:58	29	25°C	16:58	3	27°C
#7 – AB	50 Gr	10:05	19	25°C	12:05	1	25°C
#7 – AR	50 Gr	9:51	42	24°C	11:51	4	25°C
#8 – PP	50 Gr	14:50	25	24°C	16:50	1	26°C
#8 – AB	50 Gr	11:59	24	25°C	13:59	1	27°C
#8 – AR	50 Gr	12:05	34	25°C	14:05	0	27°C
#9 – PP	50 Gr	09:38	25	24°C	11:38	0	27°C
#9 – AB	50 Gr	14:10	28	25°C	16:10	2	27°C
#9 – AR	50 Gr	14:15	42	25°C	16:15	0	27°C
#10 – U	50 Gr	10:08	20	24 °C	12:08	5	26 °C

Lecturas inicial (Li), final (Lf), temperatura inicial (Ti), final del fluido (Tf) y el peso de la muestra (Wi).

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 13. Resultados Hidrometría método de la empresa. Datos Hora Ltda.

Muestra	Hora lectura	Lectura Hidrómetro 152H	Temperatura (°C)	Factor de Corrección	% Arena	% Arcilla	% Limo
#1-1	02:50:00 p. m.	20,0	25,0	2,01	56,0	6,8	37,2
	04:50:00 p. m.	1,0	26,0	2,41			
#1-2	02:58:00 p. m.	21,0	25,0	2,01	54,0	6,8	39,2
	04:58:00 p. m.	1,0	26,0	2,41			
#1-3	03:05:00 p. m.	19,0	25°C	2,01	58,0	6,8	35,2
	05:05:00 p. m.	1,0	26°C	2,41			
#2-1	03:07:00 p. m.	24,0	25,0	2,01	48,0	8,8	43,2
	05:07:00 p. m.	2,0	26,0	2,41			
#2-2	03:15:00 p. m.	24,0	25°C	2,01	48,0	8,8	43,2
	05:15:00 p. m.	2,0	26°C	2,41			
#2-3	03:22:00 p. m.	23,0	25°C	2,01	50,0	8,8	41,2
	05:22:00 p. m.	2,0	26°C	2,41			
#3-1	02:58:00 p. m.	23,0	25,0	2,01	50,0	8,8	41,2
	04:58:00 p. m.	2,0	26,0	2,41			
#3-2	03:05:00 p. m.	24,0	25°C	2,01	48,0	8,8	43,2
	05:05:00 p. m.	2,0	26°C	2,41			
#3-3	03:18:00 p. m.	23,0	25°C	2,01	50,0	8,8	41,2
	05:18:00 p. m.	2,0	26°C	2,41			
#4-1	10:04:00 a. m.	20,0	24,0	1,61	56,8	6,8	36,4
	12:04:00 p. m.	1,0	26,0	2,41			
#4-2	10:10:00 a. m.	19,0	24°C	1,61	58,8	8,8	32,4
	12:10:00 p. m.	2,0	26°C	2,41			
#4-3	10:17:00 a. m.	19,0	24°C	1,61	58,8	6,8	34,4
	12:17:00 p. m.	1,0	26°C	2,41			
#5-1	02:40:00 p. m.	19,0	25,0	2,01	58,0	10,8	31,2
	04:40:00 p. m.	3,0	26,0	2,41			
#5-2	02:45:00 p. m.	20,0	25°C	2,01	56,0	10,8	33,2
	04:45:00 p. m.	3,0	26°C	2,41			
#5-3	02:54:00 p. m.	21,0	25°C	2,01	54,0	10,8	35,2
	04:54:00 p. m.	3,0	26°C	2,41			
#6-1	08:10:00 a. m.	27,0	24,0	1,61	55	9,2	35,8
	10:10:00 a. m.	3,0	24,0	1,61			
#6-2	08:20:00 a. m.	26,0	24,0	1,61	56,5	9,2	34,3
	10:20:00 a. m.	3,0	24,0	1,61			
#6-3	08:28:00 a. m.	27,0	24,0	1,61	49,5	7,2	43,3
	10:28:00 a. m.	2,0	24,0	1,61			

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 14. Resultados Hidrometría método de la empresa. Datos Zonas Cercanas.

Muestra	Hora lectura	Lectura Hidrómetro 152H	Temperatura (°C)	Factor de Corrección	% Arena	% Arcilla	% Limo
#7-PP	02:58:00 p. m.	29,0	25,0	2,01	38,0	8,8	53,2
	04:58:00 p. m.	2,0	26,0	2,41			
#7-AB	10:05:00 a. m.	19,0	25°C	2,01	58,0	6,8	35,2
	12:05:00 p. m.	1,0	25°C	2,41			
#7-AR	09:51:00 a. m.	42,0	24,0	1,61	12,8	12,8	74,4
	11:51:00 a. m.	4,0	26,0	2,41			
#8-PP	02:50:00 p. m.	25,0	25,0	2,01	46,0	8,8	45,2
	04:50:00 p. m.	2,0	26,0	2,41			
#8-AB	11:59:00 a. m.	24,0	25,0	2,01	48,0	8,6	43,4
	01:59:00 p. m.	1,0	27,0	3,31			
#8-AR	12:05:00 p. m.	34,0	25,0	2,01	28,0	6,6	65,4
	14:05:00 p. m.	0,0	27,0	3,31			
#9-PP	09:38:00 a. m.	25,0	24,0	1,61	46,8	6,6	46,6
	11:38:00 a. m.	0,0	27,0	3,31			
#9-AB	02:10:00 p. m.	28,0	25,0	2,01	40,0	10,6	49,4
	04:10:00 p. m.	2,0	27,0	3,31			
#9-AR	02:15:00 p. m.	42,0	25,0	2,01	12,0	6,6	81,4
	04:15:00 p. m.	0,0	27,0	3,31			
#10 – U	10:08:00 a. m.	20	24,0	1,61	56,8	14,8	28,4
	12:08:00 p. m.	5,0	26,0	2,41			

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 15. Resistencia a la flexión para la mezcla 7.

Espécimen N°	Largo (mm)	Espacio entre barras de soporte (mm)	Distancia entre puntos de apoyo (mm)	Espesor mínimo (mm)	Ancho (mm)	Carga de Rotura de Flexión (N)	Resistencia a la Flexión (N)	Módulo de Rotura (N/mm ²)	Esfuerzo Ultimo (KgF/cm ²)
800°C									
1	114,7	90	12,4	10	38,8	42,8	99,2	1,5	15,3
2	112,7	90	11,4	9,9	37,8	57,1	135,7	2,1	21,42
Promedios	113,7	90	11,9	9,95	38,3	49,95	117,45	1,8	18,36
850°C									
1	113,6	90	11,8	10	37,9	60,8	144,3	2,2	22,44
2	114,3	90	12,1	9,8	37,7	57,5	137,1	2,1	21,42
Promedios	113,95	90	11,95	9,9	37,8	59,15	140,7	2,15	21,93
900°C									
1	114,4	90	12,2	9,7	37,9	65,6	155,8	2,5	25,5
2	111,9	90	11	9,9	38,3	63	147,9	2,3	23,46
Promedios	113,15	90	11,6	9,8	38,1	64,3	151,85	2,4	24,48
950°C									
1	112,4	90	11,2	9,9	38,3	75,1	176,6	2,7	27,54
2	110,8	90	10,4	9,7	38,1	70,6	166,9	2,6	26,52
Promedio	111,6	90	10,8	9,8	38,2	72,85	171,75	2,65	27,03
1000°C									
1	112,7	90	11,4	9,8	37,8	67,8	161,4	2,5	25,5
2	113	90	11,5	9,6	38	47,9	113,5	1,9	19,38
Promedio	112,85	90	11,45	9,7	37,9	57,85	137,45	2,2	22,44
1050°C									
1	113,1	90	11,6	9,7	37,9	41,4	98,3	1,6	16,32
2	111,8	90	10,9	9,8	37,7	66,1	157,7	2,4	24,48
Promedio	112,45	90	11,25	9,75	37,8	53,75	128	2	20,4

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 16. Resistencia a la flexión para la mezcla 8.

Espécimen N°	Largo (mm)	Espacio entre barras de soporte (mm)	Distancia entre puntos de apoyo (mm)	Espesor mínimo (mm)	Ancho (mm)	Carga de Rotura de Flexión (N)	Resistencia a la Flexión (N)	Módulo de Rotura (N/mm ²)	Esfuerzo Ultimo (KgF/cm ²)
800°C									
1	115,1	90	12,6	9,9	38,5	30,3	70,9	1,1	11,22
2	113,5	90	11,8	9,9	39,7	37,8	85,6	1,3	13,26
Promedios	114,3	90	12,2	9,9	39,1	34,05	78,25	1,2	12,24
850°C									
1	112,8	90	11,4	10,1	38,6	41,1	95,8	1,4	14,28
2	113,3	90	11,7	10,2	39,2	40,4	92,8	1,4	14,28
Promedios	113,05	90	11,55	10,15	38,9	40,75	94,3	1,4	14,28
900°C									
1	115,9	90	12,9	10	38,7	34,8	81	1,2	12,24
2	113,8	90	11,9	9,8	39,2	45,4	104,2	1,6	16,32
Promedios	114,85	90	12,4	9,9	38,95	40,1	92,6	1,4	14,28
950°C									
1	115,7	90	12,8	9,9	38,7	53,9	125,4	1,9	19,38
2	114,5	90	12,2	10,1	39,2	58,6	134,5	2	20,4
Promedio	115,1	90	12,5	10	38,95	56,25	129,95	1,95	19,89
1000°C									
1	113,9	90	12	9,5	39,2	39,2	90,2	1,5	15,3
2	115,3	90	12,6	9,3	39,1	41,2	94,9	1,6	16,32
Promedio	114,6	90	12,3	9,4	39,15	40,2	92,55	1,55	15,81
1050°C									
1	112,4	90	11,2	10,1	38,9	42,7	98,6	1,5	15,3
2	115,1	90	12,5	9,8	39,1	57,7	132,9	2,1	21,42
Promedio	113,75	90	11,85	9,95	39	50,2	115,75	1,8	18,36

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 17. Valores de la curva de Bigot para la mezcla 7.

Tiempo	Temperatura 60° C				Temperatura 80° C			
	Probeta N° 1		Probeta N° 2		Probeta N° 1		Probeta N° 2	
Cada 15 min	Longitud (mm)	Masa (g)	Longitud (mm)	Masa (g)	Longitud (mm)	Masa (g)	Longitud (mm)	Masa (g)
0	118,17	90,23	118,65	91,99	120,80	91,14	119,24	91,01
1	117,16	88,47	117,65	90,02	117,24	85,01	114,71	84,20
2	116,06	86,96	117,17	88,70	114,71	80,31	113,16	80,02
3	114,99	85,58	115,46	87,40	114,71	77,21	112,80	77,09
4	113,74	83,82	114,95	86,05	114,71	75,20	112,70	75,07
5	112,72	82,36	114,40	84,82	114,71	73,67	112,70	73,62
6	112,10	80,91	113,08	83,59	114,59	72,79	112,70	72,62
7	111,43	79,24	112,58	82,10	114,59	72,06	112,70	71,89
8	111,12	78,03	111,96	80,84	114,42	71,76	112,65	71,53
9	111,02	76,65	111,92	79,15	114,32	71,52	112,55	71,29
10	110,95	75,78	111,69	78,16	114,32	71,44	112,55	71,20
11	110,84	75,00	111,60	77,21	114,11	71,38	112,55	71,13
12	110,80	74,25	111,54	76,26	113,86	71,35	112,55	71,07
13	110,79	73,54	111,47	75,39	113,86	71,32	112,55	71,05
14	110,79	72,12	111,47	73,63	113,86	71,06	112,55	70,90
15	110,79	71,99	111,14	73,45	113,86	71,06	112,55	70,90
16	110,79	71,82	111,14	73,09	113,86	71,06	112,55	70,90
17	110,79	71,82	111,14	73,09	113,86	71,06	112,55	70,90
18	110,79	71,82	111,14	73,09	113,86	71,06	112,55	70,90

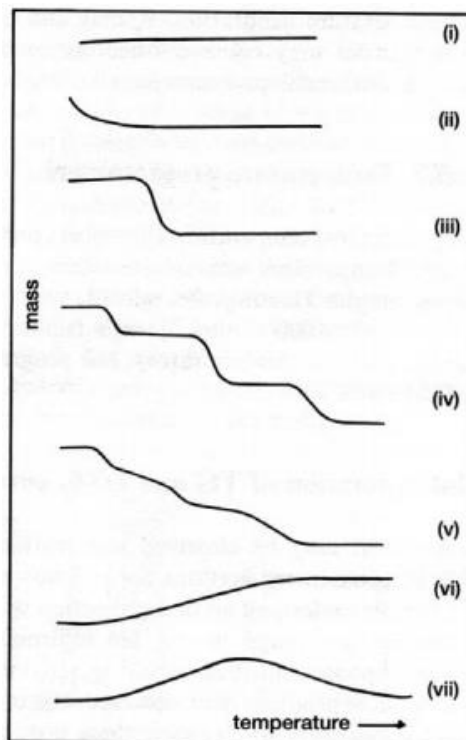
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 18. Valores de la curva de Bigot para la mezcla 8.

Tiempo	Temperatura 60° C		Temperatura 80° C	
	Probeta N° 1		Probeta N° 1	
Cada 15 min	Longitud (mm)	Masa (g)	Longitud (mm)	Masa (g)
0	119,69	90,83	120,12	91,3
1	119,18	89,83	119,93	90,55
2	117,18	87,02	117,61	87,62
3	115,5	83,28	116,6	84,64
4	114,68	79,2	115,33	81,57
5	114,52	77,45	115,06	80,08
6	114,52	76,2	114,97	78,48
7	114,35	75,18	114,91	77,19
8	114,35	74,56	114,91	76,14
9	114,35	74,16	114,91	75,56
10	114,35	73,64	114,91	74,86
11	114,35	73,32	114,91	74,25
12	114,35	72,94	114,91	73,75
13	114,35	72,5	114,91	73,15
14	114,35	72,22	114,91	72,75
15	114,35	72,22	114,91	72,75
16	114,35	72,22	114,91	72,75
17	119,69	90,83	114,97	78,48
18	119,18	89,83	114,97	78,48

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 19. Principales tipos de curvas termogravimétricas.



Fuente: [124]

Tipo (i). La muestra no sufre descomposición con pérdida de productos volátiles en el rango de temperatura mostrado. Pudiera ocurrir reacciones tipo: transición de fase, fundido, polimerización.

Tipo (ii). Una rápida pérdida de masa inicial es característica de procesos de desorción o secado.

Tipo (iii). Esta curva representa la descomposición de la muestra en un proceso simple. La curva se puede utilizar para definir los límites de estabilidad del reactante, determinar la estequiometría e investigar la cinética de las reacciones.

Tipo (iv). Se indica una descomposición multietapa con intermedios relativamente estables. Se puede definir los límites de estabilidad del reactante e intermedios, y de forma más compleja la estequiometría la reacción.

Tipo (v). También indica una descomposición multietapa, pero los productos intermedios no son estables, y poca información se obtiene de la estequiometría de la reacción.

Tipo (vi). Se observa una ganancia de masa como consecuencia de la reacción de la muestra con la atmósfera que la rodea.

Tipo (vii). El producto de una reacción de oxidación se descompone a temperaturas más elevadas: $2 \text{ Ag} + \frac{1}{2} \text{ O}_2 \rightleftharpoons \text{ Ag}_2\text{O} \rightleftharpoons 2 \text{ Ag} + \frac{1}{2} \text{ O}_2$.