



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Análisis del desempeño mecánico de mineral de uso industrial en zonas comunitarias mineras del municipio de Valledupar.

Cristian Antonio Daza Alvarez

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales

Medellín, Colombia

2022

Análisis del desempeño mecánico de mineral de uso industrial en zonas comunitarias mineras del municipio de Valledupar.

Cristian Antonio Daza Alvarez

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería – Recursos Minerales

Director (a):
Ph.D., Moisés Oswaldo Bustamante Rúa

Línea de Investigación:
Explotación y Beneficio – Tecnología Cerámica

Grupo de Investigación:
Instituto de minerales CIMEX

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales
Medellín, Colombia

2022

“No temas, porque yo estoy contigo; no desmayes, porque yo soy tu Dios que te fortalezco; siempre te ayudaré; siempre te sustentaré con la diestra de mi justicia.”

Isaías 41:10

“Esto es por ustedes y para ustedes.”

Cristian Antonio Daza Álvarez

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Cristian Antonio Daza Alvarez

Fecha 02/08/2022

Agradecimientos

Quiero agradecer a Dios por permitirme vivir esta maravillosa experiencia de vida y de formación académica en la Universidad Nacional de Colombia, a mis padres, hermanos, abuelos, tíos y primos por todo el apoyo incondicional y la fuerza necesaria para salir adelante en los momentos de mayor dificultad durante este proceso, al doctor José Gregorio Hernández por su acompañamiento integral en todo momento que lo requerí, al profesor Oswaldo Bustamante por ser no solamente mi guía sino mi padre académico, enseñándome que el camino para el desarrollo de la sociedad se genera a través del conocimiento, a mi primo Alan Daza por confiar en mis capacidades y impulsarme a seguir preparándome académica y profesionalmente, a Carlos Morelly, Napoleón Ruiz, Pablo Bustamante y Benito Guerrero por enseñarme el valor de la amistad incondicional y desinteresada, al Instituto de minerales CIMEX y todos su equipo por recibirme con los brazos abiertos y darme la confianza formarme como profesional, brindarme los espacios para el desarrollo de esta investigación, formarme de conocimiento y de mucho carácter para afrontar cualquier situación sin importar su complejidad, al profesor Pablo García por su apoyo y acompañamiento en el laboratorio de materiales de construcción de la facultad de arquitectura de la universidad nacional de Colombia sede Medellín, a la comunidad minera y en general del corregimiento de las casitas por escuchar esta propuesta de investigación aplicada, apoyarla y respaldarla en pro de mejorar las condiciones de vida de sus habitantes, a mi primo Antonio García por brindarme su experiencia, conocimiento y los espacios de su laboratorio de suelos para el desarrollo de actividades investigativas, a la Fundación Universitaria Del Área Andina por brindarme sus laboratorios y aulas para aplicar y compartir mis experiencias y conocimiento, y a todas las personas que de alguna manera influyeron de manera positiva en alcanzar los objetivos de esta investigación.

Resumen

En el presente trabajo de investigación, se realizó el análisis del desempeño mecánico de mineral de uso industrial en zonas comunitarias mineras del municipio de Valledupar, mediante la caracterización fisicoquímica, térmica y mecánica de los materiales presentes en los frentes de explotación activos de la zona en estudio.

Las caracterizaciones fisicoquímicas, térmicas y mecánicas se realizaron a partir de las siguientes técnicas: Distribución de tamaño de partículas a partir de tamizado mecánico, límites de consistencia y plasticidad a partir de los límites de Atterberg, análisis químico elemental mediante fluorescencia de rayos X (FRX), análisis mineralógico mediante difracción de rayos X (DRX), análisis térmico mediante técnicas termogravimétricas (TGA) y termodiferenciales (DSC) y análisis mecánicos realizado utilizando prensa hidráulica para medir la resistencia a la compresión simple de las muestras.

El análisis permitió comparar las variables de procesos asociadas con la distribución de tamaño de partículas, límites de consistencia y plasticidad, composición química elemental, composición mineralógica y la variación de las temperaturas de cocción de los elementos de prueba, con respecto a las resistencias mecánicas de los materiales arcillosos elaborados a partir de las condiciones operativas de campo y las condiciones operativas controladas en laboratorio.

Se concluye que a medida que se aumenta la temperatura de cocción y se ajustan algunas variables de procesos de los materiales en estudio, se genera un aumento significativo en las resistencias mecánicas y una disminución de los porcentajes de humedad de los productos finales elaborados.

Palabras clave: (Ladrillo, Caracterización fisicoquímica, mineralogía, resistencia mecánica, temperatura).

Abstract

Mechanical performance analysis of industrial use mineral in community mining areas in the municipality of Valledupar.

In this research work, the mechanical performance analysis of industrial use mineral in community mining areas in the municipality of Valledupar was carried out through the physicochemical, thermal and mechanical characterization of the materials present in the active exploitation fronts of the area under study.

The physicochemical, thermal and mechanical characterizations were carried out using the following techniques: Particle size distribution from mechanical sieving, consistency and plasticity limits from atterberg limits, elemental chemical analysis by X-ray fluorescence (XRF), mineralogical analysis by X-ray diffraction (XRD), thermal analysis by thermogravimetric (TGA) and thermodifferential (DSC) techniques and mechanical analysis performed using hydraulic press to measure the simple compressive strength of the samples.

The analysis allowed comparing the process variables associated with particle size distribution, consistency and plasticity limits, elemental chemical composition, mineralogical composition and the variation of firing temperatures of the test elements, with respect to the mechanical strengths of the clay materials produced from the field operating conditions and the laboratory controlled operating conditions.

It is concluded that as the firing temperature is increased and some process variables of the materials under study are adjusted, a significant increase in the mechanical strength and a decrease in the humidity percentages of the final products produced are generated.

Keywords: (Brick, physicochemical characterization, mineralogy, mechanical strength, temperature).

Contenido

	Pág.
Resumen.....	IX
Lista de figuras	XIV
Lista de tablas.....	XVI
Lista de Símbolos y abreviaturas.....	XVII
Introducción	1
1. Marco Teórico	3
1.1 Arcillas.....	3
1.1.1 Las arcillas y sus usos como minerales industriales	4
1.1.2 Composición de las arcillas como mineral de uso industrial	4
1.1.3 Tipos de arcillas como mineral de uso industrial.....	6
1.2 Generalidades, estructura y propiedades del material.....	8
1.2.1 Características generales del material	8
1.2.2 Características mineralógicas del material.....	9
▪ Filossilicatos Bilaminares (T-O).....	9
▪ Filossilicatos trilaminares (T-O-T).....	10
1.2.3 Influencia de la composición mineralógica en el comportamiento en la cocción de las pastas cerámicas.....	13
1.2.4 Propiedades del material.....	17
▪ Superficie específica.....	18
▪ Capacidad de Intercambio catiónico	18
▪ Capacidad de absorción.....	18
▪ Hidratación e hinchamiento	19
▪ Plasticidad	20
▪ Tixotropía.....	20
1.3 Análisis termodinámico, fisicoquímico y mecánico aplicado al material.	21
1.3.1 Análisis termodinámico.....	21
▪ Análisis Termogravimétrico (ATG).....	21
▪ Análisis Termo diferencial (ATD - DSC)	22
1.3.2 Análisis fisicoquímicos.....	24
▪ Difracción de rayos X (DRX).....	24
▪ Fluorescencia de rayos X (FRX).....	25
1.3.3 Análisis mecánico	26
▪ Caracterización del tamaño de partículas por el método del tamizado.....	26
▪ Límites de consistencia.....	28

▪	Limites de Atterberg	29
▪	Ensayo de compresión simple.....	32
1.3.4	Procesos de sinterización.....	33
▪	Efectos físicos del proceso.....	34
▪	Sinterización por un flujo plástico o viscoso	34
▪	Procesos de difusión de átomos o iones.....	34
▪	Etapas de evaporación de las materias relativamente volátiles de las superficies convexas y procesos de condensación en las cóncavas	36
▪	Solución-precipitación, en presencia de fases líquidas y con diferencias de transferencia masas	36
2.	Desarrollo experimental	39
2.1	Metodología de trabajo.....	39
2.2	Obtención y preparación de muestras de campo	40
2.3	Condiciones de operación.....	43
2.4	Equipos utilizados	43
3.	Análisis de resultados	45
3.1	Caracterización fisicoquímica, termodinámica y mecánica inicial del material en estudio.	45
3.1.1	Caracterización fisicoquímica.....	46
▪	Análisis químico de las muestras en estudio a través de la técnica FRX	46
▪	Análisis mineralógico de las muestras en estudio a través de la técnica DRX	48
3.1.2	Caracterización termica.....	50
▪	Análisis térmico gravimétrico y termodiferencial	51
3.1.3	Caracterización mecánica	53
▪	Distribución granulométrica y características asociadas a la consistencia y plasticidad del material.....	54
3.2	Estudio del diseño de mezcla propuesto	56
3.2.1	Estudio de variables de procesos para la selección del diseño de mezclas...56	
3.2.2	Ajuste de la distribución granulométrica y límites de consistencia del material a partir del diseño de mezcla.	58
3.2.3	Análisis químico de las muestras obtenidas a partir del diseño de mezcla mediante la técnica FRX	60
3.2.4	Caracterización termica de las muestras obtenidas a partir del diseño de mezcla	61
3.3	Caracterización de los productos elaborados a partir del diseño de mezcla final	63
3.3.1	Pruebas mecánicas iniciales aplicadas a las muestras del material de la zona en estudio sin modificar bajo condiciones operativas de campo.	63
3.3.2	Pruebas mecánicas elaboradas a partir del diseño de mezcla bajo condiciones operativas de campo	65
3.3.3	Pruebas mecánicas del material de la zona en estudio bajo condiciones controladas en laboratorio.....	66
▪	Cronogramas y rampas de cocción de los especímenes en estudio bajo condiciones de control en laboratorio	66
▪	Pruebas de humedad y absorción del material de la zona en estudio bajo condiciones controladas en laboratorio.....	68

▪ Pruebas mecánica aplicadas al material de la zona en estudio bajo condiciones controladas en laboratorio	69
4. Discusión general.....	71
5. Conclusiones y recomendaciones	73
5.1 Conclusiones.....	73
5.2 Recomendaciones.....	75
Bibliografía	77
Anexos.....	81

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Esquema informativo, terminología y procesos aplicados.....	3
Figura 1-2: El tetraedro elemental, o la pirámide triangular, muestra un átomo central de silíceo	8
Figura 1-3: Lámina T-O (estructura de la caolinita).....	9
Figura 1-4: Lámina T-O-T (estructura elemental de la montmorillonita).....	11
Figura 1-5: Termogramas diferencial (b) y convencional (a).....	22
Figura 1-6: Esquema de un aparato de DSC	23
Figura 1-7: Esquema espectrómetro de Bragg	24
Figura 1-8: Esquema funcionamiento fluorescencia de rayos X	26
Figura 1-9: Rango de Tamices clasificados ASTM	27
Figura 1-10: Gradación gruesa según sistemas de clasificación	27
Figura 1-11: Clasificación de suelo mediante diagrama de curvas	28
Figura 1-12: Limites de estado para suelos finos.....	29
Figura 1-13: Respuesta general de esfuerzo - deformación de material arcilloso frente al contenido de agua.....	30
Figura 1-14: Carta de plasticidad	31
Figura 1-15: Esquema de esfuerzo vs deformación.....	33
Figura 1-16: Escenarios de superficie de las partículas y sus estados de equilibrio	37
Figura 1-17: Interacción procesos de sinterización solido-liquido.....	37
Figura 2-1: Diagrama metodológico de trabajo propuesto	40
Figura 2-2: Protocolo utilizado para la obtención de las muestras de estudio	41
Figura 3-1: Difractograma muestra Barreal 1	49
Figura 3-2: Difractograma muestra Barreal 2	49
Figura 3-3: Difractograma muestra Barreal 3	49
Figura 3-4: Análisis termogravimétrico y termodiferencial de la muestra Barreal 1	51
Figura 3-5: Análisis termogravimétrico y termodiferencial de la muestra Barreal 2	51
Figura 3-6: Análisis termogravimétrico y termodiferencial de la muestra Barreal 3	51
Figura 3-7: Distribución grafica promedio de partículas presentes en la muestra en estudio	55
Figura 3-8: Distribución grafica promedio de partículas presentes en los diseños de mezcla propuestos a partir de la muestra en estudio seleccionadas	59

Figura 3-9: Análisis termogravimétrico y termodiferencial de la muestra 70% B1 + 30% B3	61
Figura 3-10: Análisis termogravimétrico y termodiferencial de la muestra 50% B1 + 50% B3	61
Figura 3-11: Análisis termogravimétrico y termodiferencial de la muestra 30% B1 + 70% B3	61
Figura 3-12: (Fecha de color rojo) – Elaboración de elementos de prueba elaborados a partir del material de la zona de estudio	63
Figura 3-13: Resistencias mecánicas iniciales de las muestras de la zona en estudio sin modificar	64
Figura 3-14: Resistencias mecánicas de las muestras elaboradas a partir de los diseños de mezcla bajo condiciones operativas de campo	65
Figura 3-15: Cronograma y rampa de cocción de las muestras a 600°C	66
Figura 3-16: Cronograma y rampa de cocción de las muestras a 800°C	67
Figura 3-17: Cronograma y rampa de cocción de las muestras a 1000°C	67
Figura 3-18: Porcentajes de humedad promedio de las muestras procesadas bajo condiciones de temperatura controladas en laboratorio	68
Figura 3-19: Resistencia a la compresión promedio de las muestras procesadas bajo condiciones de temperatura controladas en laboratorio	70

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Minerales de arcilla.....	12
Tabla 1-2: Clasificación de los minerales arcillosos más comunes.....	12
Tabla 1-3: Influencia de la composición mineralógica en el comportamiento en la cocción de las pastas cerámicas.....	13
Tabla 2-1: Nomenclatura utilizada para marcación de especímenes de suelo en estudio.....	42
Tabla 3-1: Análisis químico elemental a través de la técnica fluorescencia de rayos X (FRX).....	47
Tabla 3-2: Análisis químico elemental en forma de óxidos a través de la técnica fluorescencia de rayos X (FRX).....	47
Tabla 3-3: Minerales reportados por medio de técnica de difracción de rayos X.....	50
Tabla 3-4: Análisis de resultados estudios TGA y DSC en muestras bajo condiciones operativas de campo.....	52
Tabla 3-5: Distribución de tamaño de partículas y características de consistencia de los materiales en estudio.....	54
Tabla 3-6: Distribución de tamaño de partículas y características de consistencia de los diseños de mezcla elaborados a partir de los materiales en estudio.....	58
Tabla 3-7: Análisis químico elemental aplicado al diseño de mezcla de las muestras seleccionadas a través de la técnica fluorescencia de rayos X (FRX).....	60
Tabla 3-8: Análisis químico elemental en forma de óxidos aplicado al diseño de mezcla de las muestras seleccionadas a través de la técnica fluorescencia de rayos X (FRX) ...	60
Tabla 3-9: Análisis de resultados de los estudios TGA y DSC aplicados al diseño de mezclas planteado.....	62
Tabla 3-10: Clasificación por grupos de las muestras procesadas para la determinación de condiciones de humedad y absorción de agua bajo condiciones de temperatura controladas en laboratorio.....	68
Tabla 3-11: Clasificación por grupos de las muestras procesadas bajo condiciones de temperatura controladas en laboratorio.....	69

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI
A	Área	m^2
w	Peso de la muestra analizada	gr
T	Temperatura	$^{\circ}$
$^{\circ}C$	Grados centígrados	1
Cm	Centímetros	1
P	Carga axial	1

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI
μm	Micrómetro	1
λ	Longitud de onda de los rayos X	1
θ	Angulo de difracción	1
σ	Esfuerzo axial	1
ε	Deformación unitaria	1
δ	Alargamiento del material	1
Å	Longitud en Armstrong	1
Δw	Gradiente de peso del material	1

Subíndices

Subíndice	Término
E_m y E_r	Energías eléctricas suministradas por las resistencias del equipo
W_m y W_R	Constantes características de cada material
T_p	Temperatura programa para el ensayo
T_m y T_p	Temperatura instantánea de cada célula del equipo
K_0	Constante de proporcionalidad
L_0	Contracción inicial

Superíndices

Superíndice	Término
-------------	---------

n	Exponente, potencia
---	---------------------

Abreviaturas

Abreviatura	Término
-------------	---------

<i>FRX</i>	Fluorescencia de rayos X
<i>DRX</i>	Difracción de rayos X
<i>ATG</i>	Análisis termogravimétrico
<i>DSC</i>	Análisis termodiferencial
<i>L.L</i>	Límite líquido
<i>L.P</i>	Límite plástico
<i>I.P</i>	Índice de plasticidad

Introducción

A través de la historia, las arcillas han sido uno de los materiales más utilizados por el hombre para la elaboración de todo tipo de utensilios, desde los utilizados para el almacenamiento de víveres y agua, hasta la fabricación de porcelanas, baldosas y ladrillos para la construcción de viviendas. Y que con el paso del tiempo se han buscado alternativas que permitan mejorar las características de estos materiales, asociados a disminuir su desgaste mediante el mejoramiento de sus propiedades mecánicas (Prieto R. et al., 2019).

Generalmente las arcillas están constituidas por filosilicatos hidratados como la moscovita, sericita, biotita, clorita, talco y pirofilita; además, por otros minerales arcillosos como las illitas, vermiculitas, esmécticas y caolinitas. Estos materiales de tipo arcillosos también incluyen otros minerales asociados a los silicatos, feldespatos, piroxenos y anfíboles, los cuales se encuentran compuestos por algunos elementos químicos de interés como es el caso del silicio, aluminio, magnesio, potasio y el hierro, además de otros compuestos orgánicos como los sulfatos, carbonatos y algunas sales, que son los encargados de proporcionarles a estos materiales algunas propiedades y características que los diferencian de otros tipos de minerales (Thorez, 2005).

El estudio de las propiedades en las arcillas tiene incidencia directa en sus potenciales usos industriales; entre las cuales se destacan el análisis de su estructura laminar, composición química y mineralógica, tamaño de partículas, propiedades de consistencia y plasticidad, capacidad de intercambio catiónico, pérdidas de masa y la capacidad de endurecimiento a través de los procesos de cocción, las cuales son variables de procesos que se pueden modificar y que influyen en la calidad de los productos finales o en el propio desarrollo de fabricación o de elaboración de los productos a partir de los minerales de tipo arcilloso. (Galindo, 2017; Thorez, 2005).

Por lo cual el análisis de las propiedades de los materiales arcillosos permite comprender mas a fondo sus características particulares, dependiendo del tipo de mineral arcilloso en estudio. No obstante, existen antecedentes de trabajos anteriormente realizados (García, 1997), en el cual se indica que el conocimiento de los materiales de tipo arcilloso comienza con el estudio inicial de sus materias primas, los cuales permiten obtener información detallada de estos materiales y de esta manera comprender sus complejas características estructurales y ajustar las variables operativas en la industria con el fin de obtener productos de alta calidad, durabilidad y excelente resistencia mecánica.

En este trabajo se realizo el análisis del desempeño mecánico del mineral de uso industrial en zonas comunitarias mineras del municipio de Valledupar, el cual se postula como uno de los primeros antecedentes de tipo científico relacionados con la caracterización de materiales arcillosos en esta región, donde se efectuaron estudios de tipo fisicoquímicos, térmicos y mecánicos, con el fin de conocer el estado inicial de los productos elaborados a partir de las condiciones operativas efectuados en la zona en estudio y compararlos con los materiales de prueba elaborados a partir de los mismos minerales de composición arcillosa, controlando algunas variables de procesos en laboratorio .

A partir de las caracterizaciones iniciales del material arcilloso de la zona de estudio, se procedió a realizar un diseño de mezclas con el fin de obtener una dosificación en peso optima, que permitiera mejorar las propiedades de los materiales presentes en la zona de estudio teniendo en cuenta su composición química, mineralógica, granulometría, limites de consistencia, propiedades térmicas y mecánicas, para posteriormente comparar los resultados mecánicos obtenidas a partir del diseño de mezcla con la de los materiales iniciales y observar el impacto de la temperatura sobre estos materiales en estudio.

Este trabajo permitirá comprender la relación del comportamiento mecánico de los especímenes en estudio, la composición fisicoquímica, mineralógica y granulométrica de estos y su relación con la variación de la temperatura durante los procesos de cocción efectuados, con lo cual se espera generar un fuerte impacto en el conocimiento y la investigación asociada con los minerales arcilloso de la región y su aplicación dentro los procesos industriales efectuados en las zonas mineras comunitarias del municipio de Valledupar y del territorio colombiano.

1. Marco Teórico

Para una mayor comprensión de la terminología y procedimientos asociados al análisis del desempeño mecánico de mineral de uso industrial en zonas comunitarias mineras del municipio de Valledupar, se realizó un esquema informativo (**Figura 1-1**), en el cual se establecieron de manera secuencial cada una de las definiciones asociadas a los procesos efectuados para lograr los objetivos del presente documento.

Figura 1-1: Esquema informativo, terminología y procesos aplicados.



Fuente: (Autor, 2022)

1.1 Arcillas

El término arcilla posee diversas definiciones, muchas de estas se encuentran asociadas a la perspectiva desde la cual sea analizada, por lo cual su definición resulta variada y compleja de precisar.

La génesis de la palabra arcilla proviene del latín "Argilla" y esta proviene del griego "Argos" o "Arguilos" (= Blanco), nombre atribuido al material utilizado en aquel entonces para su uso en cerámicos (Besoain, 1985).

- En edafología y sedimentología el término arcilla es usado como un tamaño en particular ($<2\mu$), lo que hace que este sea identificado como un material heterogéneo,

compuesto de minerales propios de las arcillas y otras sustancias, incluyendo fragmentos de roca, óxidos hidratados, geles y sustancias orgánicas.

- Petrográficamente se denominan arcillas a una gran cantidad de materiales sedimentarios, de granulometría fina y mineralógicamente poco definidos.
- Químicamente por arcilla se designa una serie de sustancias que con frecuencia se identifican con el caolín y son composiciones muy variables, los cuales incluyen elementos como el Si, Al, Fe, elementos alcalinos y alcalinotérreos.
- Como mineral de arcilla se comprende esencialmente como “Alumino-silicatos hidratados cristalinos, algunos con sustitución parcial o total del aluminio por magnesio o hierro y que incluyen como constituyentes, en ciertos casos, elementos alcalinos o alcalinotérreos”.

1.1.1 Las arcillas y sus usos como minerales industriales

A lo largo de la historia, las arcillas han sido los materiales naturales preferidos por el hombre para elaborar diversos utensilios, que le ha permitido idear objetos, en principio para el consumo de alimentos y para almacenar líquidos, y posteriormente para fabricar porcelanas, ladrillos y baldosas. En la actualidad existen muchas otras aplicaciones diferentes de las usuales; por ejemplo, en los materiales poliméricos se incluyen arcillas con el objeto de que adquieran propiedades mecánicas mejoradas, como la resistencia a las llamas y al desgaste.

Las arcillas usadas en la fabricación de materiales para la construcción y agregados se conocen como arcillas comunes, arcillas cerámicas o arcillas para la construcción. Estas arcillas están constituidas comúnmente por illita y esmectita, y por mezclas de minerales arcillosos como carbonatos, feldespatos, cuarzo, óxidos de hierro y otros (Prieto R. et al., 2019).

1.1.2 Composición de las arcillas como mineral de uso industrial

Las arcillas son materiales terrosos, de grano fino, plásticas, cohesivas, de textura suave. Entre sus características se destaca la plasticidad, que la adquiere cuando es mezclada con agua; por el contrario, cuando se encuentra seca es rígida, y la cocción por encima de los 1000 °C le confiere dureza y sonoridad.

Estos materiales arcillosos pueden dividirse de acuerdo con su naturales y ambiente de formación, por ejemplo, petrológicamente, las arcillas son rocas sedimentarias producto, en ciertos casos, de meteorización de agentes atmosféricos o de procesos hidrotermales; en general, su origen es detrítico, con unas características bien definidas. Por otro lado, sedimentológicamente se definen con un termino granulométrico que involucra sedimentos con un tamaño de grano inferior a 2 μm (micrones); sin embargo, para otros (Rusia) son representativas de arcillas y minerales arcillosos las fracciones menores de 0.5 a 1 μm , y para otros, entre 1 y 4 μm . El material arcilloso es importante, ya que representa el 67% en volumen incluido en la litosfera y conforma el 70% del material sedimentario (Thorez, 2005)

En el sentido mineralógico, la arcilla está constituida por filosilicatos hidratados como moscovita, sericita, biotita, clorita, talco y pirofilita; además, por minerales arcillosos como illita, clorita, vermiculita, esmectita y caolinita. Incluye también los otros silicatos, como el cuarzo, feldespatos, piroxenos y anfíboles, y también compuestos y elementos metálicos como el silicio, aluminio y el hierro, orgánicos como sulfatos, carbonatos y sales y, por ultimo, algunos minerales opacos.

Las arcillas poseen una clasificación de acuerdo con su naturaleza y ambiente de formación tal como se hallan en la naturaleza, están constituidas por unos minerales de origen primario y por otros de origen secundario. Los minerales primarios son los que existían en las rocas ígneas que dieron lugar a la arcilla, y que han llegado a nuestros días sin sufrir alteración apreciable en su composición. Los minerales secundarios se han formado por las diversas acciones de los agentes químicos y físicos sobre algunos minerales de las rocas originales.

Las arcillas se clasifican, a su vez, en residuales y sedimentarias. Las primeras se hallan en el lugar en que fueron formadas, o a lo sumo han sufrido un transporte muy limitado. En estas arcillas existen, con frecuencia, grandes proporciones de minerales primarios. Las arcillas sedimentarias, que han sido transportadas a grandes distancias y depositadas una o más veces a lo largo de su historia, contienen, por lo general, menor proporción de minerales primarios (Garcia Verduch, 1985b).

1.1.3 Tipos de arcillas como mineral de uso industrial

Las arcillas dentro del campo de uso industrial juegan un papel clave para el desarrollo de diversos productos que cada día se requieren mas y mas a nivel nacional y a nivel internacional, pero dependiendo de las propiedades de cada clase, estas arcillas reciben un nombre particular para caracterizarlas y diferenciarlas (Nuñez, 1987), tal como se observa a continuación:

- **Fire clays (Arcillas Refractarias)**

Arcilla silíceas con alto contenido de aluminio silicatos hidratados, compuesta de caolinita, con pequeñas cantidades de impurezas como illita, cuarzo, hierro, calcio y álcalis. Rica en óxidos metálicos, soporta temperaturas de 1500 °C o más. Se emplea en revestimientos de hornos, vasijas para productos químicos, crisoles, retortas, equipos para fundición, ladrillos refractarios y otros (Nuñez, 1987).

- **Ball clays (Arcillas plásticas)**

Con este nombre se designan las arcillas caoliníticas altamente plásticas y fácilmente dispersables en agua. Su mayor característica es el color blanco que adquiere después del proceso de quemado, aunque su color primario sea oscuro. Su principal utilidad consiste en la elevada plasticidad y la resistencia mecánica que les imprime a las pastas preparadas con este tipo de arcillas (Nuñez, 1987).

- **Flint clays (Arcilla de pedernal)**

Arcilla refractaria muy dura y lisa, de aspecto de pedernal. Se rompe con fractura concoidea y su principal constituyente es la haloisita (Nuñez, 1987).

- **Burley-clays**

Su origen no está claramente determinado, pero se utiliza este termino para denominar a aquellas arcillas que incluyen oolitos o nódulos ricos en alúmina u óxidos de hierro. Normalmente contiene diáspora (hidróxido de aluminio) y caolinita. Es una arcilla altamente refractaria debido a su contenido de alúmina (Nuñez, 1987).

▪ **Under clays**

Termino de poco uso en Colombia. Generalmente es una arcilla similar a la refractaria y se desarrolla debajo de los mantos de carbón; esto no significa que las under-clay sean refractarias ni que todas las arcillas refractarias se produzcan debajo de los mantos de carbón (Nuñez, 1987).

▪ **China clay**

Este nombre da a entender que en China existen los mejores y más apetecidos yacimientos de este tipo de arcillas; y se debe tomar como el termino comercial para el caolín obtenido de las rocas graníticas caolinizadas y utilizado en la manufactura para producir artículos de porcelana fina. Esta arcilla es más plástica que la ball-clay y al quemarse adquiere un tono blanco muy suave (Prieto R. et al., 2019).

▪ **Arcilla Ferruginosa**

Generalmente se compone de diferentes cantidades y tipos de oxido de hierro. Pueden ser de color amarillento, ocre, e incluso de aspecto negro, en cuyo caso se denominan tierras de Siena, debido a la presencia de oxido de hierro hidratado, mientras que las denominadas arcillas rojas incluyen por lo general óxidos de hierro, pero de tipo hematita. Esta particularidad explica por qué en algunas regiones el barro es negro o rojizo, lo cual incide en los colores de la cerámica que se fabrica a partir de estos materiales (Prieto R. et al., 2019).

▪ **Arcillas grasas y arcillas magras**

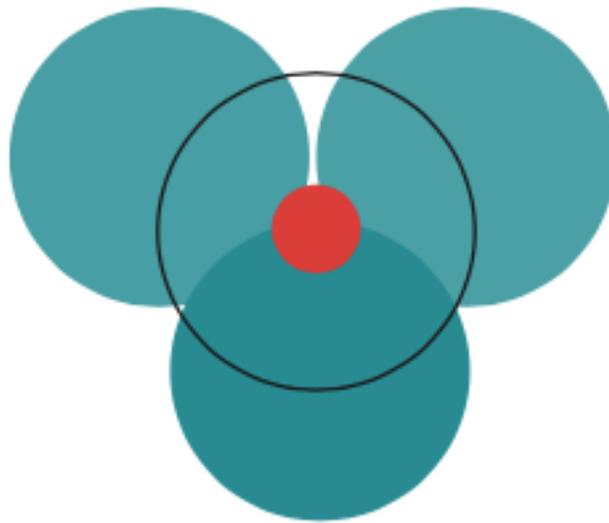
Se le llama arcilla grasa a la que es muy plástica. Hay algunas arcillas que contienen cierto grado de impurezas, lo cual hace disminuir sus propiedades plásticas, por lo que se denominan, entonces, arcillas magras (Prieto R. et al., 2019).

1.2 Generalidades, estructura y propiedades del material

1.2.1 Características generales del material

La arcilla es un aluminosilicatos hidratado; esto quiere decir que químicamente está constituida por silicio (Si), aluminio (Al), oxígeno (O) e hidrógeno (H). Mediante las propiedades de los rayos X, y posteriormente con el microscopio electrónico, fue posible determinar que los silicatos están formados por cristales regulares con una unidad básica: el tetraedro. De esta manera se ha tratado de entender la estructura a la cual están ligadas las arcillas. A continuación, se observa (**Figura 1-2**) un átomo central de silicio (Si) y cuatro átomos de oxígeno (O) en los vértices (Prieto R. et al., 2019)

Figura 1-2: El tetraedro elemental, o la pirámide triangular, muestra un átomo central de silíceo



Fuente: (Madrid, 2012)

La unión de varios tetraedros genera hojas que se extienden a lo largo y a lo ancho, y que dan origen a las estructuras laminares formando hojas tetraédricas (tipo T), a la vez, existen otros cuerpos poligonales que se pueden unir entre sí para formar cadenas, tal como sucede con el octaedro (tipo O), formando los compuestos de aluminio, por ejemplo, $Al(OH)_6$, o del magnesio (Prieto R. et al., 2019).

1.2.2 Características mineralógicas del material

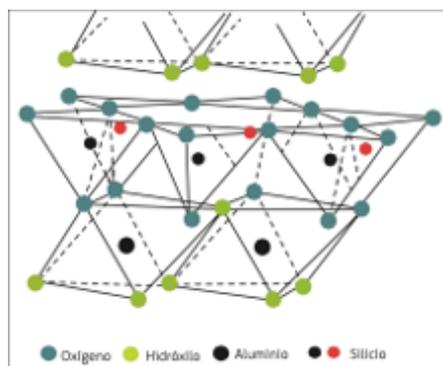
La definición de la composición mineralógica permite obtener la identificación de los minerales arcillosos simples e interestratificados, como las caolinitas, micas, esmectitas, cloritas y de los demás minerales presentes en diferentes proporciones, entre los cuales sobresalen cuarzos, feldespatos, minerales de hierro, piritas, yesos y carbonatos.

Como se anotó, la distribución estructural puede originar láminas tipo 1:1 o T-O, y láminas 2:1 o T-O-T, que se llaman comúnmente filosilicatos bilaminares y trilaminares, respectivamente (Prieto R. et al., 2019).

▪ Filosilicatos Bilaminares (T-O)

Generalmente los tetraedros son de silicio rodeados de oxígeno, aun cuando en ocasiones el silicio puede sustituirse por iones de aluminio o de hierro. Los octaedros pueden tener como ion predominante el aluminio o el magnesio y están rodeados de oxígeno o de hidroxilos (OH). Cuando el ion dominante es el aluminio, la lámina que se forma se denomina dioctaédrica, y cuando es el magnesio, se dice que la capa es trioctaédrica. Los iones están apilados de tal forma que se mantiene la electronegatividad entre ellos. La separación entre láminas es del orden de siete unidades Angstrom (Å). En esta clasificación se distinguen dos familias de minerales: la kandita (dioctaédrica) y la serpentina (trioctaédrica). A continuación, se ilustra (**Figura 1-3**) la distribución del caolín, perteneciente a la familia de la kandita (Espitia et al., 2003).

Figura 1-3: Lámina T-O (estructura de la caolinita).



Fuente: (Espitia et al., 2003)

Se puede decir que la familia de la kandita, que incluye minerales dioctaédricos como la caolinita, haloisita, nacrita y dickita, está compuesta de los minerales arcillosos más extendidos y frecuentes en el mundo. El nombre caolín proviene de la voz china Kau-Ling, nombre del cerro de una región situada en el norte de China, sitio donde se ha explotado esta arcilla desde el siglo VIII para usarla en la fabricación de porcelanas. El caolín es una arcilla formada por caolinitas, que se produce generalmente por la descomposición de feldespatos. La composición química de la caolinita puede expresarse como $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ (Espitia et al., 2003).

Una arcilla que presenté abundancia de caolinita superior al 20 % tiende a aumentar su resistencia a la cocción, es decir, requiere temperaturas mucho más altas (lo que se conoce como refractariedad), ofrece baja plasticidad, se seca fácilmente y no tiene buena resistencia mecánica (Espitia et al., 2003).

Por otra parte, la familia de la serpentina incluye los minerales trioctaédricos denominados crisotilo, lizardita, antigorita y bertierina. La composición química de una serpentina puede expresarse como $3MgO \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ (Bernal et al., 2003).

En general, las arcillas expansibles, presentan estructuras que permiten que el agua penetre entre las láminas tetraédricas y octaédricas a través de enlaces de hidrógeno, lo cual determina una expansión de la celda cristalográfica y explica su alto índice de plasticidad (Espitia et al., 2003).

▪ **Filosilicatos trilaminares (T-O-T)**

En cuanto a los filosilicatos trilaminares, se ha establecido que las láminas no son eléctricamente neutras debido a que se presentan sustituciones de unos iones por otros de diferente carga. La separación entre láminas es del orden de 10Å. Comprenden tres familias: esmectitas, micas y minerales fibrosos o atapulgitas (Bernal et al., 2003).

La familia de las esmectitas o minerales expandibles incluye especies dioctaédricas como la montmorillonita, la nontronita y la beidelita, y trioctaédricas como la saponita, la sauconita y la hectorita. También se les da el nombre de bentonitas. Su composición

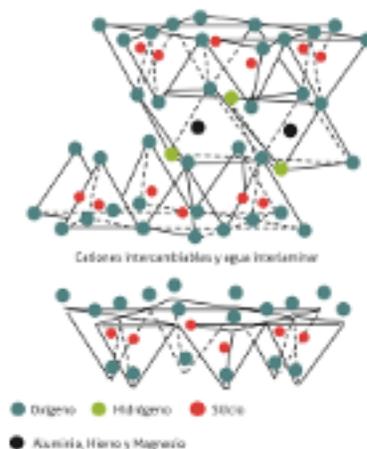
química varía por la capacidad de sustitución elemental y de absorción de agua. Una fórmula general para una esmectita es $Al_2-XMgXSi_4O_{10}(OH)_2$ (Espitia et al., 2003).

La montmorillonita deriva su nombre del francés Montmorillon, lugar de Francia donde se descubrió esta clase de arcilla en el año 1874. En general, las arcillas expansibles presentan estructuras que permiten que el agua penetre entre las láminas tetraédricas y octaédricas a través de enlaces de hidrógeno, lo cual determina una expansión de la celda cristalográfica y explica su alto índice de plasticidad. Seguidamente se muestra (**Figura 1-4**) la estructura elemental de la montmorillonita.

En cuanto a la familia de las micas, se ha establecido que son los minerales clasificados como arcillas que tienen la misma estructura de las esmectitas, con la salvedad de que el grado de sustitución y la naturaleza de los cationes que se alojan entre láminas, por ejemplo, el potasio, hacen que la carga residual sea muy alta; en estas condiciones, las láminas se fijan unas a otras, haciendo que su estructura no sea expansible, ni que tampoco los cationes interlaminares sean intercambiables (Melendez & Fuster, 2003).

A esta familia pertenecen las vermiculitas, el talco, la pirofillita, la illita y la moscovita. Los minerales de arcilla se observan en la (**Tabla 1-1**).

Figura 1-4: Lámina T-O-T (estructura elemental de la montmorillonita)



Fuente: (Bernal et al., 2003)

En la celda cristalográfica de las micas, algunos silicios pueden remplazarse por aluminio, y la diferencia de carga es balanceada por iones potasio. La composición química de la illita puede expresarse como $K Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$

A la familia de las atapulgitas, o minerales fibrosos, pertenecen la sepiolita y la paligorskita, formadas por láminas discontinuas tipo mica. A diferencia de las ya nombradas, que se presentan en láminas, estas se presentan como fibras. En su estructura se encuentra una capa basal continua de tetraedros y capas periódicamente discontinuas de octaedros. Su aplicación en el proceso cerámico es aún desconocida (Bernal et al., 2003).

Tabla 1-1: Minerales de arcilla

Minerales dioctaédricos		Minerales trioctaédricos	
Tipo 1:1			
Kaolinita		Serpentinita	
Tipo 2:1			
Pyrofilita Esmectita Vermiculita Illita, Glauconita		Talco Esmectita Vermiculita	
Micas	Al: Muscovita Paragonita Fe: Celadonita	Micas	Mg-Fe: Flogopita, Biotita, Lepidolita

Fuente: (Meunier, 2005)

En la (Tabla 1-2) se pueden observar de manera detallada otros minerales contenidos en las arcillas, como feldespatos, sílice, carbonato de calcio, mineral de hierro, ilmenita, yeso, mineral en estado coloidal como el alófono y los óxidos hidratados.

Tabla 1-2: Clasificación de los minerales arcillosos más comunes

Láminas	Dioctaédricos	Minerales	Trioctaédricos	Minerales
Bilaminares T-O; 1:1	Kanditas	Coelinta, nacrita, dickita, haloisita	Serpentinas	Antigorita, crisotilo, lizardita, bertierina
	Micas	Illita, moscovita, paragonita, pirofilita	Micas	Flogopita, biotita, lepidolita, talco,
Trilaminares T-O-T; 2:1	Esmectitas (expansibles)	Montmorillonita, beidelta, nontronita, vermiculita	Esmectitas	Saponita, hectorita, sauconita
	Atapulgitas (fibroso)	Paligorskita	Atapulgitas	Sepiolita
T-O-T-O; 2:1:1	Cloritas	Sudóitas	Cloritas	Clinocloros, proclorita

Por último, la familia de las cloritas es un grupo de minerales cuyas láminas están compuestas por dos capas tetraédricas y dos octaédricas, por lo que se las denomina 2:1:1 o T-0-T-0. Las láminas no son eléctricamente neutras debido a sustituciones de unos cationes por otros de distinta carga, pero de tamaño semejante. La neutralidad se logra por grupos hidróxidos y por cationes interlaminares como sodio, potasio, calcio o magnesio. La separación entre láminas es del orden de 14Å (un angstrom equivale en microscopia a la diezmillonésima parte de un milímetro) (Espitia et al., 2003).

1.2.3 Influencia de la composición mineralógica en el comportamiento en la cocción de las pastas cerámicas.

De acuerdo con (Galindo, 2017), la composición del soporte en las arcillas se denomina “pasta”. Una pasta cerámica es la mezcla equilibrada de materias primas (**Tabla 1-3**) plásticas (arcillas y caolines) y no plásticas (feldespatos, carbonatos, cuarzo, talco, etc.), que cumple una serie de exigencias que la hacen útil y rentable para la elaboración o fabricación de productos cerámicos (vajillas, objetos de adorno, cerámica artística, baldosas, tejas, ladrillos, cerámicas tenaces, etc.).

Tabla 1-3: Influencia de la composición mineralógica en el comportamiento en la cocción de las pastas cerámicas

Componentes		Influencia
Minerales arcillosos	Caolinita	<p>Las arcillas con predominio de estructura caolinítica requieren elevadas temperaturas para su sinterización, con formación de mullita y sílice libre. Tienen, por tanto, formación de fase vítrea más lenta y gradual lo que quiere decir que presentan rangos de cocción más amplios y mayor estabilidad dimensional, respecto a las illitas.</p> <p>Las arcillas caoliníticas alcanzan la contracción lineal máxima alrededor de 1200 °C, coincidiendo con la absorción de agua mínima. Estas propiedades se mantienen durante un intervalo bastante amplio (hasta unos 1260) al término del cual se produce un hinchamiento de la pieza</p>

		debido a la dilatación térmica de los gases ocluidos en la porosidad cerrada.
	Illita	Mayor velocidad de formación de fase vítrea, respecto a la caolinita, debido fundamentalmente a su mayor fundencia por la presencia de potasio. Las arcillas con predominio de estructura illítica presentan temperaturas de cocción relativamente bajas con rápida formación de fase vítrea o fundido, con el aumento de temperatura y por lo tanto rangos de cocción pequeños. La illita en algunos casos inicia la fusión hacia 1050 °C. Reacciona con la sílice formando mullita.
	Montmorillonita	Dan lugar a mayores sustituciones que la illita por lo que son más fundentes.
Impurezas de las arcillas y/o materias primas no plásticas	Cuarzo	<ul style="list-style-type: none"> • Aumenta la refractariedad de la pasta. • Provoca una menor velocidad de formación de fase vítrea con menores pendientes “absorción de agua – temperatura” y “contracción lineal – temperatura” y por lo tanto aumenta la estabilidad dimensional. • Mejora la compacidad de la pasta y por lo tanto disminuye la absorción de agua y la contracción lineal a baja temperatura. • Presenta una variación dimensional a +/- 573°C por la transformación reversible α cuarzo \leftrightarrow β cuarzo
	Feldespatos	Propiedades fundentes: <ul style="list-style-type: none"> • Proporcionan la primera fase vítrea que aparece durante la cocción. • Disminuyen la temperatura de maduración y aumentan la velocidad de formación de

		<p>fase vítrea y por lo tanto las pendientes de las curvas “absorción de agua – temperatura” y “contracción lineal – temperatura”.</p> <ul style="list-style-type: none"> • La magnitud de estos efectos depende de su composición química. • Dependiendo de la granulometría, pueden mejorar la compacidad de la arcilla y por lo tanto disminuir la absorción de agua y la contracción lineal a baja temperatura.
	<p>Calcita</p>	<ul style="list-style-type: none"> • A bajas temperaturas actúa retrasando el proceso de vitrificación, aunque cuando este tiene lugar se forma fase vítrea de baja viscosidad a gran velocidad. • Actúa como formador de fases cristalinas (anortita, gelenita y pseudowollastonita), lo que provoca una elevada porosidad, bajas contracciones en cocción y una reducida expansión por humedad. • A temperaturas elevadas ($T > 1130\text{ }^{\circ}\text{C}$ aproximadamente) actúa como fundente disminuyendo sensiblemente la viscosidad de la masa vítrea, lo que provoca una elevada pendiente en las curvas “absorción de agua – temperatura” y “contracción lineal – temperatura”. • La fuerte contracción que sufren entre $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ las pastas con carbonatos pueden provocar problemas de falta de estabilidad dimensional.
	<p>Minerales de hierro</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Dan color pardo-rojizo a los soportes cocidos. • Actúan como fundentes.

	<ul style="list-style-type: none"> • La reducción de óxido de hierro (III) a óxido de hierro (II) a alta temperatura provoca un ennegrecimiento de la pieza un aumento de la porosidad cerrada.
Materia organica	La combustión de la materia orgánica contenida en las arcillas forma a partir de 550 – 600 °C un gas reductor compuesto por H ₂ y CO, así como por menores cantidades de CO ₂ que puede dar problemas de corazón negro.
Sulfatos	<ul style="list-style-type: none"> • Presentes en las arcillas en muy bajos contenidos. • Estables frente a ciclos de cocción a bajas temperaturas ya que descomponen a partir de los 1000 °C. • Producen eflorescencias.
Fluoruros	<ul style="list-style-type: none"> • Presentes en muy bajos contenidos. • Combinados con la sílice formando SiF₄, altamente reactivo.
Talco	<p>Se añade hasta un 8 – 10% como materia prima en composiciones de alta temperatura para mejorar su fundencia, ya que forma un eutéctico con feldespatos alcalinos.</p> <p>El magnesio tiene un comportamiento en cocción similar al calcio aunque da fase vítrea de mayor viscosidad.</p>
Chamota	Mejora la resistencia al choque térmico

Fuente: (Galindo, 2017)

1.2.4 Propiedades del material

Según (García, E. y Suárez, 2003), dentro del campo de los minerales arcillosos de uso industrial se deben tener en cuenta varios aspectos a la hora de trabajar con estos materiales, uno de estos aspectos es el estudio de las características y propiedades físicas y químicas que estos tipos de minerales tipo arcillosos puedan tener, ya que al desconocer estas propiedades y características de estos minerales, se pueden generar variaciones sustanciales dentro de los operativos aplicados a los procesos industriales en los que los materiales arcillosos sean utilizados.

Las importantes aplicaciones industriales de este grupo de minerales radican en sus propiedades fisicoquímicas (García, E. y Suárez, 2003), dichas propiedades derivan principalmente de:

- Su extremadamente pequeño tamaño de partícula (inferior a 2 mm)
- Su morfología laminar (filosilicatos)
- Las sustituciones isomórficas, que dan lugar a la aparición de carga en las láminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en el espacio interlaminar.

Como consecuencia de estos factores, presentan, por una parte, un valor elevado del área superficial y, a la vez, la presencia de una gran cantidad de superficie activa, con enlaces no saturados. Por ello pueden interaccionar con muy diversas sustancias, en especial compuestos polares, por lo que tienen comportamiento plástico en mezclas arcilla-agua con elevada proporción sólido/líquido y son capaces en algunos casos de hinchar, con el desarrollo de propiedades reológicas en suspensiones acuosas.

Por otra parte, la existencia de carga en las láminas se compensa, como ya se ha citado, con la entrada en el espacio interlaminar de cationes débilmente ligados y con estado variable de hidratación, que pueden ser intercambiados fácilmente mediante la puesta en contacto de la arcilla con una solución saturada en otros cationes, a esta propiedad se la conoce como capacidad de intercambio catiónico y es también la base de multitud de aplicaciones industriales (García, E. y Suárez, 2003).

▪ **Superficie específica**

La superficie específica o área superficial de una arcilla se define como el área de la superficie externa más el área de la superficie interna (en el caso de que esta exista) de las partículas constituyentes, por unidad de masa, expresada en m^2/g .

Las arcillas poseen una elevada superficie específica, muy importante para ciertos usos industriales en los que la interacción sólido-fluido depende directamente de esta propiedad (García, E. y Suárez, 2003).

▪ **Capacidad de Intercambio catiónico**

Es una propiedad fundamental de las esmectitas. Son capaces de cambiar, fácilmente, los iones fijados en la superficie exterior de sus cristales, en los espacios interlaminares, o en otros espacios interiores de las estructuras, por otros existentes en las soluciones acuosas envolventes. La capacidad de intercambio catiónico (CEC) se puede definir como la suma de todos los cationes de cambio que un mineral puede adsorber a un determinado pH. Es equivalente a la medida del total de cargas negativas del mineral. Estas cargas negativas pueden ser generadas de tres formas diferentes:

- Sustituciones isomórficas dentro de la estructura.
- Enlaces insaturados en los bordes y superficies externas.
- Disociación de los grupos hidroxilos accesibles.

El primer tipo es conocido como carga permanente y supone un 80 % de la carga neta de la partícula; además es independiente de las condiciones de pH y actividad iónica del medio. Los dos últimos tipos de origen varían en función del pH y de la actividad iónica. Corresponden a bordes cristalinos, químicamente activos y representan el 20 % de la carga total de la lámina (García, E. y Suárez, 2003).

▪ **Capacidad de absorción**

Algunas arcillas encuentran su principal campo de aplicación en el sector de los absorbentes ya que pueden absorber agua u otras moléculas en el espacio interlaminar (esmectitas) o en los canales estructurales (sepiolita y paligorskita).

La capacidad de absorción está directamente relacionada con las características texturales (superficie específica y porosidad) y se puede hablar de dos tipos de procesos que difícilmente se dan de forma aislada: absorción (cuando se trata fundamentalmente de procesos físicos como la retención por capilaridad) y adsorción (cuando existe una interacción de tipo químico entre el adsorbente, en este caso la arcilla, y el líquido o gas adsorbido, denominado adsorbato).

La capacidad de adsorción se expresa en porcentaje de adsorbato con respecto a la masa y depende, para una misma arcilla, de la sustancia de que se trate. La absorción de agua de arcillas absorbentes es mayor del 100% con respecto al peso (García, E. y Suárez, 2003).

▪ **Hidratación e hinchamiento**

La hidratación y deshidratación del espacio interlamilar son propiedades características de las esmectitas, y cuya importancia es crucial en los diferentes usos industriales. Aunque hidratación y deshidratación ocurren con independencia del tipo de catión de cambio presente, el grado de hidratación sí está ligado a la naturaleza del catión interlamilar y a la carga de la lámina.

La absorción de agua en el espacio interlamilar tiene como consecuencia la separación de las láminas dando lugar al hinchamiento. Este proceso depende del balance entre la atracción electrostática catión-lámina y la energía de hidratación del catión. A medida que se intercalan capas de agua y la separación entre las láminas aumenta, las fuerzas que predominan son de repulsión electrostática entre láminas, lo que contribuye a que el proceso de hinchamiento pueda llegar a disociar completamente unas láminas de otras. Cuando el catión interlamilar es el sodio, las esmectitas tienen una gran capacidad de hinchamiento, pudiendo llegar a producirse la completa disociación de cristales individuales de esmectita, teniendo como resultado un alto grado de dispersión y un máximo desarrollo de propiedades coloidales. Si, por el contrario, tienen Ca o Mg como cationes de cambio su capacidad de hinchamiento será mucho más reducida (García, E. y Suárez, 2003).

▪ **Plasticidad**

Las arcillas son eminentemente plásticas. Esta propiedad se debe a que el agua forma una envuelta sobre las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas.

Generalmente, esta plasticidad puede ser cuantificada mediante la determinación de los índices de Atterberg (Límite Líquido, Límite Plástico y Límite de Retracción). Estos límites marcan una separación arbitraria entre los cuatro estados o modos de comportamiento de un suelo sólido, semisólido, plástico y semilíquido o viscoso (JIMENEZ SALAS, J. A., DE JUSTO ALPAÑES, 1975).

La relación existente entre el límite líquido y el índice de plasticidad ofrece una gran información sobre la composición granulométrica, comportamiento, naturaleza y calidad de la arcilla. Existe una gran variación entre los límites de Atterberg de diferentes minerales de la arcilla, e incluso para un mismo mineral arcilloso, en función del catión de cambio. En gran parte, esta variación se debe a la diferencia en el tamaño de partícula y al grado de perfección del cristal. En general, cuanto más pequeñas son las partículas y más imperfecta su estructura, más plástico es el material (García, E. y Suárez, 2003).

▪ **Tixotropía**

La tixotropía se define como el fenómeno consistente en la pérdida de resistencia de un coloide, al amasarlo, y su posterior recuperación con el tiempo. Las arcillas tixotrópicas cuando son amasadas se convierten en un verdadero líquido. Si, a continuación, se las deja en reposo recuperan la cohesión, así como el comportamiento sólido. Para que una arcilla tixotrópica muestre este especial comportamiento deberá poseer un contenido en agua próximo a su límite líquido. Por el contrario, en torno a su límite plástico no existe posibilidad de comportamiento tixotrópico (García, E. y Suárez, 2003).

1.3 Análisis termodinámico, fisicoquímico y mecánico aplicado al material.

A continuación, se hace una descripción general de algunos de los métodos mas importantes para caracterizar e identificar algunas especies mineralógicas y elementos químicos presentes en los materiales arcillosos, además de analizar algunas características termodinámicas y termo mecánicas asociadas a los minerales arcillosos de uso industrial.

1.3.1 Análisis termodinámico

Para materiales cerámicos, los análisis térmicos pueden dividirse en dos grupos: los que miden cambios de peso debidos a perdida o ganancia de sustancias gaseosas y aquellos que miden cambios de energía en una fase solida. Dentro del primer grupo, se pueden mencionar el Análisis Termogravimétrico (TGA) o Análisis Termogravimétrico Diferencial (DTG), los cuales miden variaciones de peso provocadas por la perdida de agua en sus diferentes formas (Incluyendo OH-), anhídrido carbónico o por ganancia de oxígeno. En el segundo grupo se encuentra el Análisis Térmico Diferencial (DTA), el cual mide cambios de energía asociados a las reacciones térmicas que experimenta una sustancia durante el calentamiento (García, 1997).

▪ Análisis Termogravimétrico (ATG)

Este método consiste en estudiar las pérdidas de peso de una sustancia, a medida que se somete a un aumento de la temperatura. El equipo involucrado incluye un horno de calentamiento eléctrico, en el cual una muestra de arcilla o de cualquier otro material se calienta a una rata constante (normalmente 5°C por minuto) desde la temperatura ambiente hasta 1000°C o en condiciones extremas, hasta 1500°C.

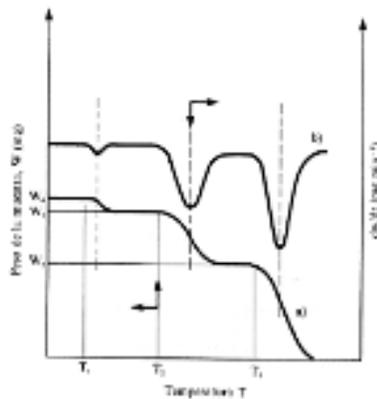
En ausencia de materia orgánica, sales volátiles, carbonatos, sulfuros y hierro ferroso, la perdida de peso total por calentamiento entre 110°C y 300°C se considera como agua adsorbida. La perdida de peso entre 300°C y 950°C se describe como agua hidroxílica. El agua que se pierde por debajo de los 110°C se considera como parcialmente adsorbida, agua libre o agua de entre capas y canales (García, 1997).

El ATG puede expresarse como se evidencia en la ((1-1)) el cual se efectúa en función de la temperatura y del peso de la muestra que se este analizando (**Figura 1-5**), y que dependiendo de la velocidad de aplicación de la temperatura puede catalogarse el ensayo como un sistema dinámico o estático.

$$\Delta w = f(T) \quad (1-1)$$

Donde: w : Peso de la muestra analizada
 T : Temperatura

Figura 1-5: Termogramas diferencial (b) y convencional (a)



Fuente:(Skoog et al., 2008)

▪ Análisis Termo diferencial (ATD - DSC)

La técnica consiste en calentar simultáneamente a una velocidad de calentamiento constante y lineal, dos muestras separadas; una desconocida y una de un material térmicamente inerte y registrar la absorción o el desprendimiento de calor por parte de la muestra desconocida en relación con la estándar. Usualmente se utiliza una termocupla para medir la diferencia en temperatura de las dos muestras. En la practica, el dispositivo consiste en un porta muestras fabricado de un material refractario dividido en dos compartimientos (García, 1997).

El DSC mide el flujo de calor en la muestra a estudiar y en un material inerte de referencia de forma independiente. En la (**Figura 1-6**) se muestra un esquema de un aparato de DSC. Ambas células que contienen la muestra y la referencia están equipadas con un sensor

para la medida de su temperatura, y una resistencia de calentamiento independiente para cada una de ellas. Estas resistencias mantienen ambas células a una temperatura programada T_p . Las temperaturas instantáneas de cada célula (T_m y T_R) (**Ec.(1-2)**) y (**Ec.(1-3)**) se miden y comparan continuamente con el valor programado T_p . El sistema trabaja de modo que la energía suministrada en cada momento por cada resistencia de calentamiento es función de la diferencia entre las temperaturas de cada célula y la temperatura programada, es decir:

$$E_m = W_m * (T_m - T_p) \quad (1-2)$$

$$E_r = W_R * (T_R - T_p) \quad (1-3)$$

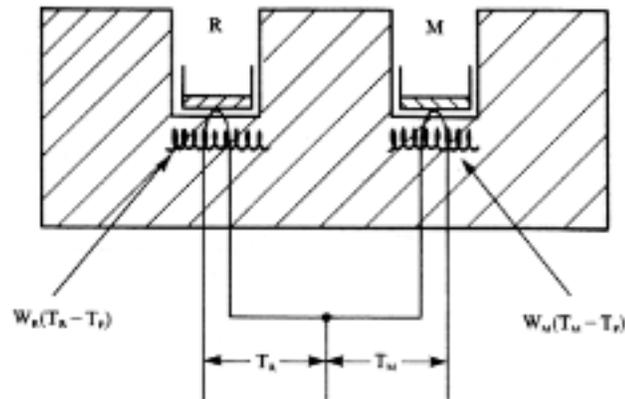
Donde: E_m y E_r : las energías eléctricas suministradas por las resistencias del equipo.

W_m y W_R : Constantes características de cada material.

T_p : Temperatura programa para el ensayo.

T_m y T_p : Temperatura instantánea de cada célula del equipo.

Figura 1-6: Esquema de un aparato de DSC



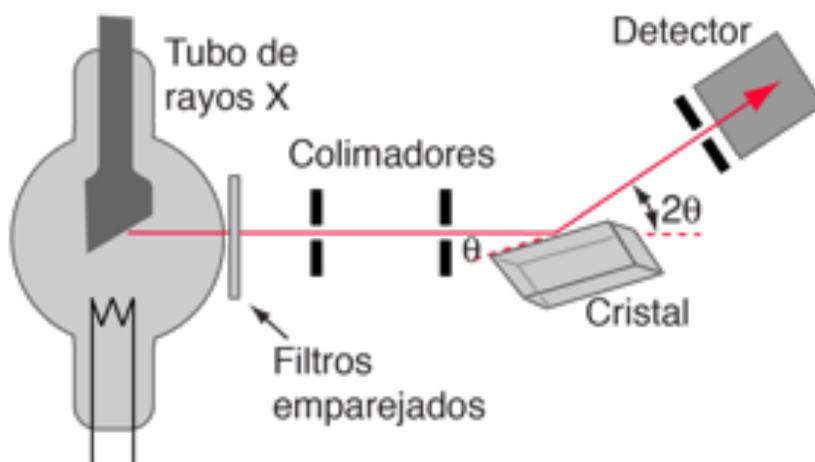
Fuente: (ALBELLA et al., 1993)

1.3.2 Análisis fisicoquímicos

▪ Difracción de rayos X (DRX)

En el análisis por difracción los rayos X son una forma de radiación electromagnética de longitud de onda variable entre 0.02 y 100 Å. que se producen cuando partículas cargadas de alta energía, como los electrones, aceleradas a 30.000 V, colisionan con la materia. La longitud de onda de los rayos X es, en general, mucho más pequeña que la de la luz visible y por ello tienen gran poder de penetración y son capaces de ionizar gases o ennegrecer una placa fotográfica (Cantor, 2020).

Figura 1-7: Esquema espectrómetro de Bragg



Fuente: (Cantor, 2020)

Así como la luz visible puede ser difractada por una serie de líneas en una placa de vidrio (una rejilla de difracción), siempre y cuando las distancias entre las líneas sean del mismo orden de la longitud de onda, los rayos X usados en investigaciones mineralógicas pueden ser difractados por los planos atómicos de un cristal (**Figura 1-7**). Esto sucede gracias a que un patrón de difracción ocurre cuando los rayos difractados se refuerzan uno a otro, o sea, cuando los espacios atómicos son del orden de un múltiplo exacto de la longitud de onda. La expresión anotada anteriormente se conoce como la Ley de Bragg (**Ec.(1-4)**) (García, 1997).

$$n * \lambda = 2d * \sin \theta \quad (1-4)$$

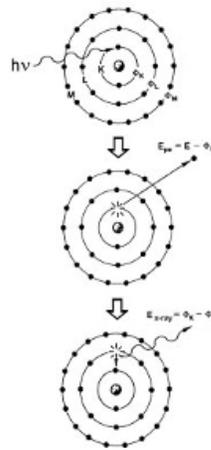
Donde:

- n: Numero entero
- λ : Longitud de onda de los rayos X
- d: Distancia entre planos
- θ : Angulo de difracción

El trabajo de difracción de rayos X con minerales del grupo de las arcillas, involucra un número de dificultades mayores que para otros grupos de minerales. los minerales del grupo de las arcillas normalmente son pobremente cristalizados y presentan tamaño de grano extremadamente pequeño: de ahí que las reflexiones sean más amplias, las intensidades mas bajas y que halla menos reflexiones medibles (se favorecen las de los planos basales, dada su estructura en hojas). La estructura de las arcillas, con 'frecuencia se encuentran "desordenadas", y es por ello por lo que los registros provenientes de la difracción de los rayos X son variables y algunos tan difusos que son difíciles de interpretar (García, 1997).

▪ **Fluorescencia de rayos X (FRX)**

En la fluorescencia de rayos X (XRF), un electrón puede ser expulsado de su orbital atómico por la absorción de una onda de luz (fotón) de suficiente energía. La energía del fotón ($h\nu$) debe ser mayor que la energía con la que el electrón está unido al núcleo del átomo. Cuando un electrón orbital interno es expulsado de un átomo (**Figura 1-8**), un electrón de un orbital de mayor nivel de energía será transferido al orbital de menor nivel de energía. Durante esta transición un fotón puede ser emitido por el átomo (**Figura 1-8**).

Figura 1-8: Esquema funcionamiento fluorescencia de rayos X

Fuente: (Rigaku Global, 2020)

Esta luz fluorescente se denomina la característica radiografía del elemento. La energía del fotón emitido será igual a la diferencia de energías entre los dos orbitales ocupados por el electrón que hace la transición. Debido a que la diferencia de energía entre dos orbitales específicos, en un elemento dado, es siempre la misma (es decir, característica de un elemento en particular), el fotón emitido cuando un electrón se mueve entre estos dos niveles siempre tendrá la misma energía. Por lo tanto, al determinar la energía (longitud de onda) de la luz de rayos X (fotón) emitida por un elemento en particular, es posible determinar la identidad de ese elemento (Rigaku Global, 2020).

1.3.3 Análisis mecánico

▪ Caracterización del tamaño de partículas por el método del tamizado.

El método mecánico para caracterización de tamaño de partículas comprende dos clases de ensayos: El de tamizado para las partículas grueso – granulares (gravas, arenas) como se observa en la (Figura 1-10), y el de sedimentación para la fracción fina del suelo (limos, arcillas), pues no son discriminables por tamizado (Duque et al., 2016).

Una vez se pasa el suelo por el horno de secado y se pulverice, se hace pasar por una serie organizada de tamices (Figura 1-9), de agujeros con tamaños decrecientes y conocidos, desde arriba hacia abajo. El primer tamiz, es el de mayor tamaño y es donde

inicia el tamizado. Se tapa con el fin de evitar pérdidas de finos; el último tamiz está abajo y descansa sobre un recipiente de forma igual a uno de los tamices, y recibe el material más fino no retenido por ningún tamiz.

Con sacudidas horizontales y golpes verticales, mecánicos o manuales, se hace pasar el suelo por la serie de tamices, de arriba abajo, para luego pesar por separado el suelo retenido en cada malla (Duque et al., 2016).

Figura 1-9: Tamaños de Tamices clasificados ASTM

Designación	φ abertura	Designación	φ abertura
3 pulgadas	75 mm	Nº 16	1180 μ
2 pulgadas	50 mm	Nº 20	850 μ
1 ½ pulgadas	37,5 mm	Nº 30	600 μ
1 pulgada	25 mm	Nº 40	425 μ
¾ pulgada	19 mm	Nº 50	300 μ
⅜ pulgada	9,5 mm	Nº 60	250 μ
Nº 4	4,75 mm	Nº 100	150 μ
Nº 8	2,36 mm	Nº 140	106 μ
Nº 10	2 mm	Nº 200	75 μ

Fuente: (Duque et al., 2016)

Los resultados de los ensayos de tamizado y sedimentación se llevan a un gráfico llamado curva granulométrica (**Figura 1-11**).

Figura 1-10: Gradación gruesa según sistemas de clasificación

La fracción gruesa tendrá denominaciones, según el sistema:

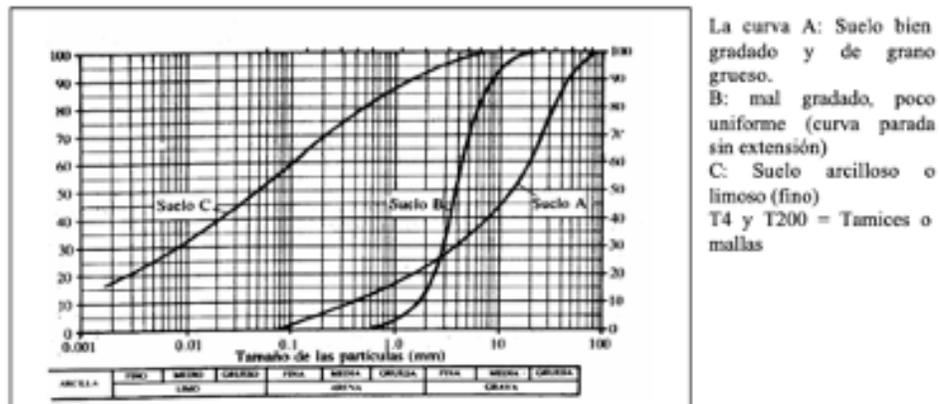
	BRITÁNICO ₁	AASHTO ₂	ASTM ₃	SUCS ₄
	φ (mm)	φ (mm)	φ (mm)	φ (mm)
Grava	60 – 2	75 – 2	> 2	75 – 4,75
Arena	2 – 0,06	2 – 0,05	2 – 0,075	4,75 – 0,075
Limo	0,06 – 0,002	0,05 – 0,002	0,075 – 0,005	< 0,075 FINOS
Arcilla	< 0,002	< 0,002	< 0,005	

4: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
 3: American Society for Testing and Materials
 2: American Association of State Highway and Transportatio Official
 1: B S – 5930: 1981

Fuente: (Duque et al., 2016)

Para los suelos grueso – granulares, el diámetro equivalente está referido al agujero cuadrado de la malla. Para los finos, al diámetro de una esfera.

La curva se dibuja en papel semilogarítmico. Con la escala aritmética (ordenadas) los porcentajes en peso de partículas con $\mu <$ que cada uno de los lados de las abscisas. En escala logarítmica (abscisas) los tamaños de los granos en milímetros. Esta escala, en razón de que los μ varían de cm a μm .

Figura 1-11: Clasificación de suelo mediante diagrama de curvas

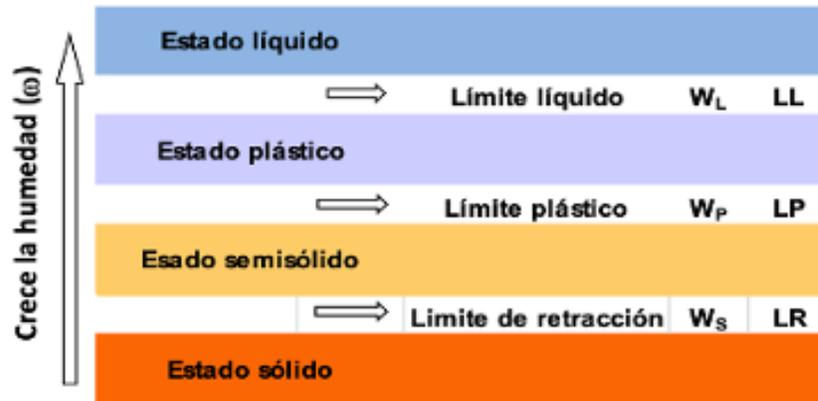
Fuente: (Duque et al., 2016)

Esta clasificación es necesaria en geotecnia y en mecánica de suelos aplicada a procesos minerales de diversos tipos entre los cuales se encuentran los arcillosos de uso industrial, pero no es suficiente. Se complementa siempre la granulometría con el ensayo de Límites de Atterberg, que caracterizan la plasticidad y consistencia de los finos en función del contenido de humedad (Duque et al., 2016).

▪ Límites de consistencia

Etimológicamente, consistencia equivale a capacidad de mantener las partes del conjunto integradas, es decir, estabilidad y coherencia. En mecánica de suelos solo se utiliza para los suelos finos que, dependiendo del contenido de agua y de su mineralogía, fluyen sin romperse. Un suelo está en estado líquido (arcilla o limo muy húmedos) cuando se comporta como un fluido viscoso, deformándose por su propio peso y con resistencia al corte casi nulo (Duque et al., 2016).

Al perder agua, ese suelo pierde su fluidez, pero continúa deformándose plásticamente; dado que pierde su forma, sin agrietarse. Si se continúa con el proceso de secado (de la arcilla o limo), el suelo alcanza el estado semisólido, si al intentar el moldearlo se desmorona. Si se seca aun más, hasta un punto en el cual su volumen ya no se reduce por la pérdida de agua y el color toma un tono más claro, el estado del suelo se define como sólido tal y como se evidencia en la (Figura 1-12) (Duque et al., 2016).

Figura 1-12: Límites de estado para suelos finos

Fuente: (Duque et al., 2016)

El estado plástico se presenta en un rango estrecho de humedades, comprendidas entre los límites líquido (LL) y plástico (LP). Este rango genera el Índice de Plasticidad "IP", definido así:

$$IP = W_L - W_P \quad (1-5)$$

Donde:

- IP : Índice de plasticidad
- W_L : Límite Líquido
- W_P : Límite Plástico

▪ Límites de Atterberg

Los límites de consistencia de Atterberg suministran los elementos para una rigurosa clasificación de las arcillas y para valorar muchas de sus propiedades. Pueden emplearse con utilidad para emprender un estudio riguroso, bien de los materiales destinados a la industria cerámica y de los ladrillos, o bien para proyectar las plantas de producción, integrando o sustituyendo algunos criterios todavía en uso (Sembenelli, 1966).

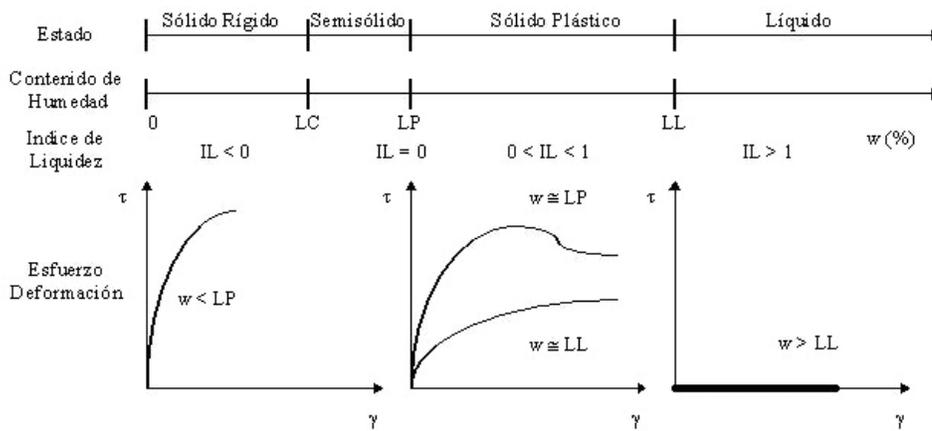
Los límites de Atterberg están directamente relacionados con la cantidad de agua que contiene un material y es capaz de absorber; en otras palabras, con el tanto por ciento de partículas con dimensiones coloidales presentes en el material y su tendencia a comportarse como verdadero coloide. Está claro que debe existir una relación estrecha

entre los límites y las características físicas y tecnológicas de un determinado material (Sembenelli, 1966).

Atterberg estudió la plasticidad del suelo a través del rango de humedad en el cual ésta se manifiesta, es decir, el rango de humedad que va desde que el suelo comienza a ponerse plástico hasta que se hace viscoso y propuso tres valores o Constantes de Atterberg (**Figura 1-13**):

- **Límite superior de plasticidad (límite líquido):** Contenido de humedad al cual el suelo fluirá muy poco al aplicarle una fuerza, o contenido de humedad en el que el suelo pasa de plástico a viscoso.
- **Límite inferior de plasticidad (límite plástico):** Contenido de humedad al cual el suelo puede ser escasamente arrollado en forma de fideo (aprox. >3 mm de espesor), o contenido de humedad en el que el suelo pasa de friable a plástico.
- **Número o índice de plasticidad:** Diferencia entre el límite superior y el límite inferior. El número de plasticidad se asemeja al índice de plasticidad.

Figura 1-13: Respuesta general de esfuerzo - deformación de material arcilloso frente al contenido de agua.



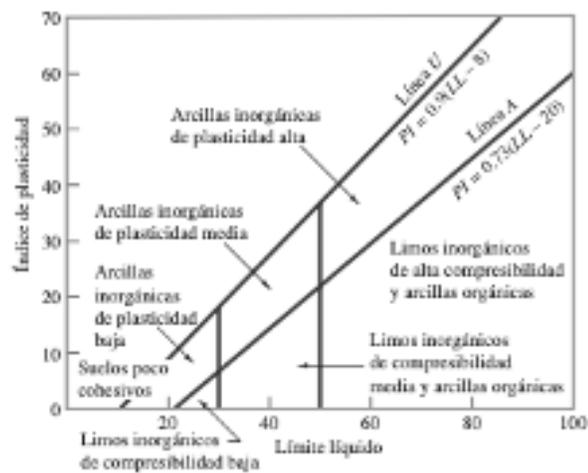
Sobre los resultados provenientes de los análisis realizados para determinar los límites de Atterberg, se propone por parte de (Casagrande, 1932) una carta de plasticidad como la que se muestra en la (**Figura 1-14**).

La característica importante de este cuadro es la línea A empírica que está dada por la (Ec.(1-6)). La línea A separa las arcillas inorgánicas de los limos inorgánicos. Las gráficas de los índices de plasticidad contra límites líquidos de arcillas inorgánicas se encuentran por encima de la línea A, y las de limos inorgánicos se encuentran por debajo de esta línea. Los limos orgánicos se grafican en la misma región (por debajo de la línea A y con LL que va de 30 a 50), como los limos inorgánicos de compresibilidad media.

$$PI = 0,73(LL - 20) \quad (1-6)$$

Donde: PI : Índice de plasticidad
 LL : Límite líquido

Figura 1-14: Carta de plasticidad



Fuente: (Braja M. Das, 2013)

Las arcillas orgánicas se grafican en la misma región que los limos inorgánicos de alta compresibilidad (por debajo de la línea A y LL mayor de 50). La información proporcionada en la carta de plasticidad es de gran valor y es la base para la clasificación de los suelos de grano fino en el Sistema de Clasificación Unificado de Suelos (Braja M. Das, 2013).

▪ Ensayo de compresión simple

En el ensayo de compresión simple se realiza con el fin de conocer la resistencia mecánica o la carga última de un material, la carga que aplica la máquina. Este método de ensayo es aplicable solo a materiales cohesivos que no expulsan agua durante la etapa de carga del ensayo y que mantienen su resistencia intrínseca después de remover las presiones de confinamiento, como las arcillas o los suelos cementados.

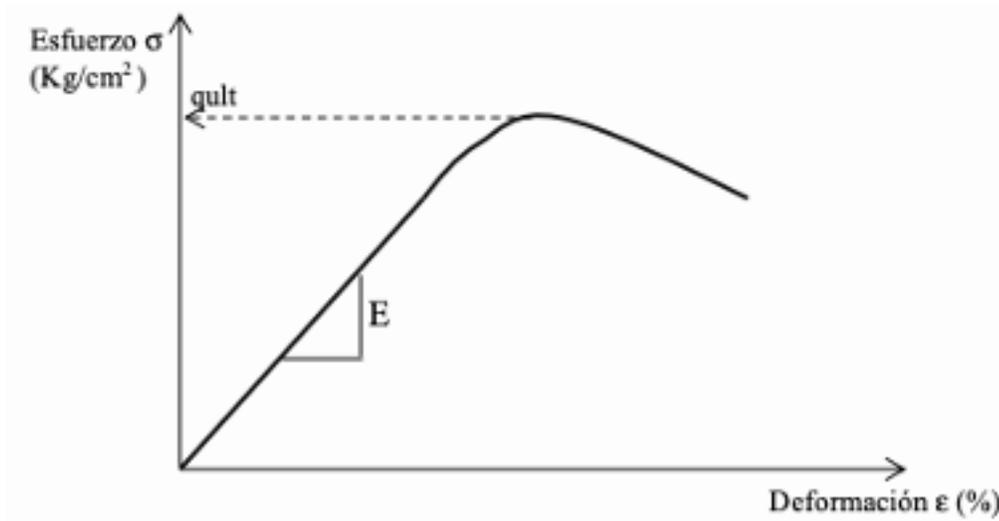
En general, los resultados de las pruebas dependen de las dimensiones del espécimen que se está probando. Se debe tener en cuenta que a pesar de ser poco probable que se diseñen estructuras que tengan sus partes con el mismo tamaño que especímenes de prueba, se deben expresar los resultados de las pruebas en una forma que se apliquen a miembros de cualquier tamaño. Por lo cual una de la forma más sencilla de lograr este objetivo es convertir los resultados en pruebas de esfuerzo y deformaciones unitarias (Braja M. Das, 2013).

El esfuerzo axial σ (**Figura 1-15**) en un espécimen de prueba se calcula dividiendo la carga axial P entre el área transversal A (**Ec.(1-7)**)

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1-7)$$

Donde: σ = *Esfuerzo axial*
 P = *Carga axial*
 A = *Área transversal*

Cuando en el cálculo se usa el área inicial del espécimen, al esfuerzo se le llama esfuerzo nominal (también llamado esfuerzo convencional, esfuerzo tecnológico o esfuerzo ingenieril). Un valor más exacto del esfuerzo axial se denomina (esfuerzo real o esfuerzo verdadero) y se calcula a partir del área real del elemento, teniendo en cuenta su sección transversal que es donde sucede la fractura.

Figura 1-15: Esquema de esfuerzo vs deformación

Fuente: (Autor, 2022)

La deformación unitaria axial promedio ε en el espécimen se determina dividiendo el alargamiento medido δ entre las marcas de calibración, entre la longitud calibrada H (**Ec. (1-8)**), por lo tanto, si en el análisis se usa la longitud calibrada inicial, se obtiene como resultado la deformación unitaria nominal.

$$\varepsilon = \frac{\delta}{H} \quad (1-8)$$

Donde:

- ε = Deformación Unitaria
- δ = Alargamiento medido del material
- H = Longitud calibrada del material

1.3.4 Procesos de sinterización

Uno de los procesos más importantes durante el procesamiento de los minerales arcillosos empleados como materiales de uso industrial a la hora de la elaboración de ladrillos, es el proceso de sinterización efectuado durante la etapa de cocción de dichos materiales. Es en este proceso donde las piezas elaboradas, se transforman en una pieza con la resistencia mecánica suficiente como para ser utilizada con fines industriales, dicho procedimiento se logra mediante la extensión y consolidación de las uniones cohesivas intersuperficiales del material, generadas a partir de estímulos producidos a partir de la aplicación de calor durante cierto tiempo determinado.

▪ **Efectos físicos del proceso**

En los procesos de sinterización de los materiales arcillosos con fines de uso industrial se generan varios fenómenos asociados a causas físicas como, por ejemplo: La disminución de la superficie total, contracciones de volumen y el aumento de la resistencia mecánica, los cuales son generados por la unión de los gránulos y de su crecimiento, ya que los átomos de las partículas menores se transfieren a las mayores, y los poros se rellenan de material sólido. Durante este proceso de transporte de masa, se generan los estímulos a la sollicitación de energía superficial, cabe especificar que durante este proceso pueden llevarse a cabo diversos mecanismos o solamente uno a la vez (Gippini, 1966).

Durante estos procesos de transporte de masa se pueden presentar los siguientes procesos físicos:

▪ **Sinterización por un flujo plástico o viscoso**

Durante los procesos de Sinterización el flujo plástico o viscoso se encuentra asociado a las partículas vítreas. Durante estos procesos de sinterización las únicas fuerzas que pueden explicar la transferencia de masa en este caso es la energía superficial, esto debido a que la gravedad a veces trabaja a favor y otras en contra.

En estos procesos las pequeñas partículas vítreas que conforman las muestras de material procesado se aglomeran en un producto no poroso por medio del flujo plástico. En estos casos la temperatura influye de manera directa sobre la velocidad del proceso de sinterización, debido a que la fluencia está inversamente relacionada con la viscosidad del material y esta a su vez, dependen logarítmicamente de la temperatura (Gippini, 1966).

▪ **Procesos de difusión de átomos o iones**

En los procesos de difusión presupone el movimiento en un sentido de los átomos o iones y el movimiento en sentido contrario de las “vacantes” de la red cristalina. En esta etapa se producen contracciones de volumen más acusadas que los demás procesos, ya que este proceso mantiene a los granos en contacto, haciendo disponerse a sus centros en una estructura más cerrada.

Estas contracciones (**Ec.(1-9)**) se pueden expresar en función del tiempo (**Ec.(1-10)**), y estas expresiones a su vez pueden agruparse mediante la aproximación derivada a partir de (**Ec.(1-11)**).

$$\frac{L}{L_0} \quad (1-9)$$

$$t = \frac{L}{L_0} = K t^n \quad (1-10)$$

$$\frac{K}{K_0} = e^{-Q/RT} \quad (1-11)$$

Donde:

- n : es una constante de valor muy aproximado a 0,4
- K : es una constante proporcional a la sensibilidad a la temperatura.
- Q : Es la energía de activación para la difusión.
- R : Es la constante de gases.
- T : Es la temperatura.
- K_0 : Una constante de proporcionalidad.
- L : Contracción final
- L_0 : Contracción inicial

Teniendo en cuenta el producto de estas ecuaciones mencionadas anteriormente, Burke ha obtenido una formula (**Ec.(1-11)**) para comparar los tiempos requeridos para obtener una contracción de cocción determinada a diferentes temperaturas.

$$\ln \frac{t_1}{t_2} = \frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (1-12)$$

Las ecuaciones anteriormente mencionadas, son el resultado de un modelo teórico y que se ha probado en múltiples ocasiones de manera experimental, por tal motivo su utilización tiene ciertas limitaciones y no se pueden extrapolar para todos los casos, especialmente en escenarios donde la porosidad real de los especímenes es relativamente baja, y se producen eliminaciones lentas de los poros internos del elemento. Pero estas ecuaciones

son muy útiles en los primeros escenarios de los procesos de sinterización, especialmente cuando la contracción inicial se está produciendo (Gippini, 1966).

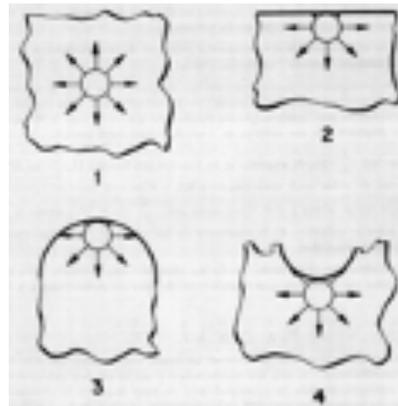
- **Etapas de evaporación de las materias relativamente volátiles de las superficies convexas y procesos de condensación en las cóncavas**

Durante esta etapa la sinterización de materiales cerámicos no se han estudiado con mucha profundidad, pero se conoce que existen un número limitado de reacciones durante estos procesos de sinterización en cerámicos que influyen de manera significativa en el proceso (Gippini, 1966), específicamente las de los óxidos de zinc y carburos de silicio, aspectos que le aportarían al material cierta capacidad de conductividad térmica elevada, mayor estabilidad en los procesos de sinterización de grados y alta resistencia al choque térmico (Ferrer, 1964).

- **Solución-precipitación, en presencia de fases líquidas y con diferencias de transferencia masas**

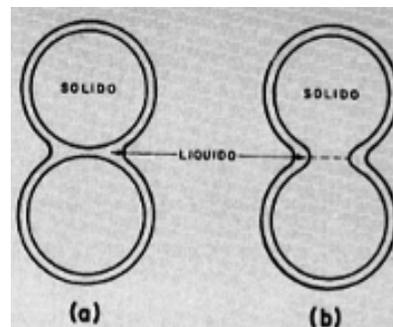
En el proceso de sinterización de materiales cerámicos asociados a arcillas industriales, las fases líquidas que se generan un desprendimiento de iones o átomos de las superficies de alta energía y por ende un depósito sobre las de baja energía.

En este caso las superficies de más alta energía son las convexas con pequeños radios de curvatura. Las de más baja energía son las de pequeños radios de curvatura. Mientras que las superficies planas o con grandes radios son estados energéticos intermedios. En la **(Figura 1-16)** se observan los diversos escenarios donde se consideran los estados de equilibrio de diversas partículas que se encuentran al interior del cuerpo cerámicos, y donde estos elementos pertenecen a las diversas sollicitaciones, las cuales son las masas en todas las direcciones.

Figura 1-16: Escenarios de superficie de las partículas y sus estados de equilibrio

Fuente: (Gippini, 1966)

Durante este proceso la unión de las partículas se origina gracias a la participación de la fase líquida, la cual puede producirse de cualquiera de las dos formas representadas en la (Figura 1-17). Este proceso surgiendo de una u otra forma, siempre y cuando se de el conjunto o configuración mas estable. En donde analizando el primer caso de la (Figura 1-17) los granos solidos están separados por una película continua de material liquido o fundido. Mientras que el otro caso se observan las interacciones formados por los enlaces sólido-sólido.

Figura 1-17: Interacción procesos de sinterización solido-liquido

Fuente: (Gippini, 1966)

Para el análisis de estos casos la resistencia mecánica a altas temperaturas en el caso (a) se ocasiona como consecuencia de las fuerzas capilares y de la viscosidad del liquido, mientras para el caso (b), la resistencia mecánica es proporcionada por los enlaces entre las partículas solidas aun cuando existe una base liquida presente. Y en ambos casos, a

temperaturas bajas, la solidificación o el incremento de la viscosidad del líquido contribuyen a aumentar la resistencia mecánica de los elementos cerámicos elaborados.

Para estos casos es de vital importancia resaltar que los procesos de sinterización acaban teóricamente cuando el cuerpo carece de porosidad en absoluto y tienen la mínima distancia entre la superficie de granos o partículas que conforman el medio, es decir, cuando se forman partículas esféricas macizas y homogéneas (Gippini, 1966).

2. Desarrollo experimental

2.1 Metodología de trabajo

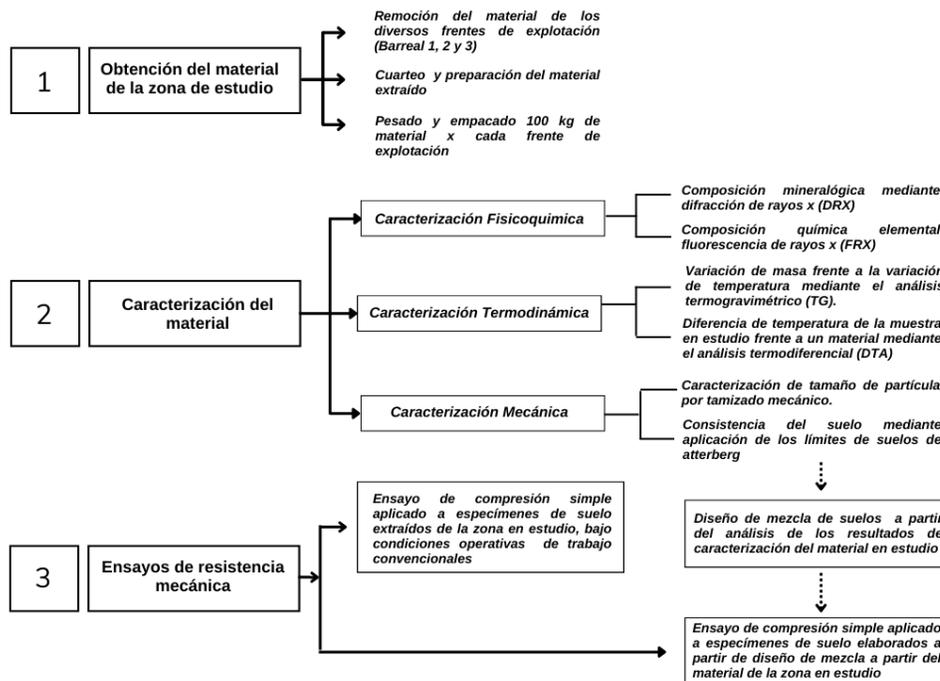
Con el fin de analizar el desempeño mecánico del mineral de uso industrial de la zona en estudio se requieren conocer las características termodinámicas, fisicoquímicas y mecánicas del material de trabajo. Para lograr los objetivos planteados se utilizó la siguiente metodología, el cual se puede observar con detalle en la (**Figura 2-1**).

- Obtención del material en la zona de estudio, esta recolección se realizó a través del procedimiento plasmado en la (**Figura 2-2**).
- Caracterización termodinámica, fisicoquímica y mecánica del material en estudio, para conocer su composición mineralógica, elementos químicos asociados, tamaño de partículas, pérdida de humedad, reacciones químicas del material teniendo en cuenta el calor aplicado y demás características particulares asociadas a cada tipo de suelo.
- Elaboración de especímenes de trabajo y diseño de mezcla a partir del material de la zona en estudio, para la realización de pruebas de laboratorio.
- Realización de ensayos mecánicos a las muestras de estudio elaboradas, para conocer la máxima resistencia a la compresión de los especímenes elaborados a partir del material de la zona en estudio, teniendo en cuenta la variación de temperatura como factor diferencial.

2.2 Obtención y preparación de muestras de campo

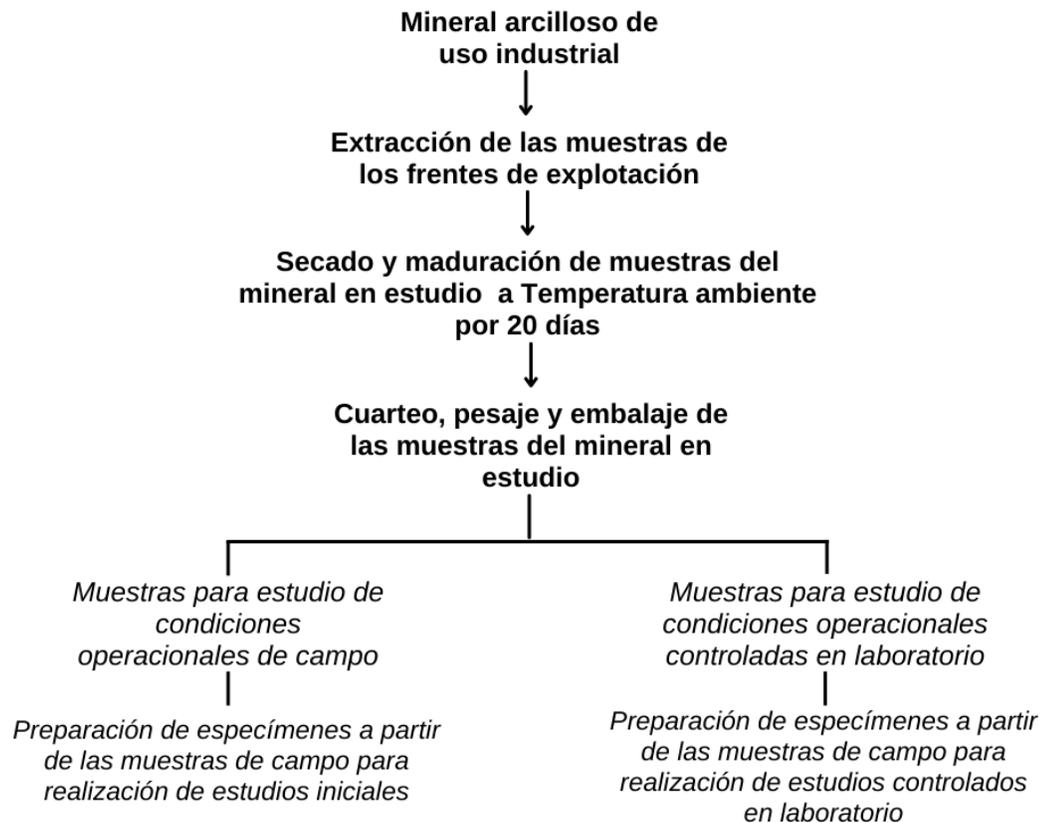
La muestras de mineral de uso industrial analizado en esta investigación, pertenecen a un yacimiento activo de mineral de tipo arcilla otorgado a la junta de acción comunal de las casitas mediante el contrato de concesión No. 0175-20 localizado en el corregimiento de las casitas jurisdicción del municipio de valledupar en el departamento del cesar (Colombia).

Figura 2-1: Diagrama metodologico de trabajo propuesto



Fuente: (Autor, 2022)

Se tomaron 100 Kg de muestras libres de aditivos químicos y sustancias que alteren su composición de cada uno de los tres frentes activos a la fecha dentro del área de conceción del titulo minero en la zona de estudio (Barreal 1, Barreal 2 y Barreal 3), con estas muestras recolectadas en el sitio de estudio se prepararon los especímenes para conocer las características primarias del mineral presente en la zona de estudio, tal como se evidencia en el siguiente protocolo (**Figura 2-2**) de trabajo de preparación de las muestras de campo.

Figura 2-2: Protocolo utilizado para la obtención de las muestras de estudio

Una vez se finalizó con el proceso de cuarteo, pesaje y embalaje de las muestras del mineral de estudio, se prepararon 100 Kg de muestra de cada uno de los frentes activos de explotación en estudio, para proceder a separar y preparar los especímenes de prueba a las cuales se les realizaron los correspondientes análisis de laboratorio para poder identificar sus características y particularidades asociadas al cumplimiento de los objetivos propuestos en la presente investigación, las cuales fueron rotuladas de la siguiente forma (**Tabla 2-1**) para tener una mayor trazabilidad de estas muestras durante los procesos y procedimientos efectuados :

Tabla 2-1: Nomenclatura utilizada para marcación de especímenes de suelo en estudio

Nomenclatura utilizada para marcación de especímenes de suelo en estudio		
Nombre específico del espécimen de estudio	Nomenclatura	Condición de trabajo y control operativo
Muestra barreal 1 - mezcla 100% - in situ	A-1, A-2, A-3, A-4, A-5	Condiciones operativas de campo como marco de referencia inicial
Muestra barreal 2 - mezcla 100% - in situ	A-6, A-7, A-8, A-9, A-10	
Muestra barreal 3 - mezcla 100% - in situ	A-11, A-12, A-13, A-14, A-15	
Muestra mezcla barreal 1 (70%) - barreal 3 (30%) - in situ	F-1, F-2, F-3, F-4, F-5	
Muestra mezcla barreal 1 (50%) - barreal 3 (50%) - in situ	G-1, G-2, G-3, G-4, G-5	
Muestra mezcla barreal 1 (30%) - barreal 3 (70%) - in situ	H-1, H-2, H-3, H-4, H-5	
Muestra barreal 1 - mezcla 100% - Laboratorio	Y-1, Y-2, Y-3, Y-4, Y-5	Condiciones de temperatura controladas en laboratorio 600°C
Muestra barreal 2 - mezcla 100% - Laboratorio	W-1, W-2, W-3, W-4, W-5	
Muestra barreal 3 - mezcla 100% - Laboratorio	T-1, T-2, T-3, T-4, T-5	
Muestra barreal 1 - mezcla 100% - Laboratorio	Y-6, Y-7, Y-8, Y-9, Y-10	Condiciones de temperatura controladas en laboratorio 800°C
Muestra barreal 2 - mezcla 100% - Laboratorio	W-6, W-7, W-8, W-9, W-10	
Muestra barreal 3 - mezcla 100% - Laboratorio	T-6, T-7, T-8, T-9, T-10	
Muestra barreal 1 - mezcla 100% - Laboratorio	Y-11, Y-12, Y-13, Y-14, Y-15	Condiciones de temperatura controladas en laboratorio 1000°C
Muestra barreal 2 - mezcla 100% - Laboratorio	W-11, W-12, W-13, W-14, W-15	
Muestra barreal 3 - mezcla 100% - Laboratorio	T-11, T-12, T-13, T-14, T-15	
Muestra mezcla barreal 1 (70%) - barreal 3 (30%) - Laboratorio	K-1, K-2, K-3, K-4, K-5	Condiciones de temperatura controladas en laboratorio 600°C
Muestra mezcla barreal 1 (50%) - barreal 3 (50%) - Laboratorio	S-1, S-2, S-3, S-4, S-5	
Muestra mezcla barreal 1 (30%) - barreal 3 (70%) - Laboratorio	R-1, R-2, R-3, R-4, R-5	
Muestra mezcla barreal 1 (70%) - barreal 3 (30%) - Laboratorio	K-6, K-7, K-8, K-9, K-10	Condiciones de temperatura controladas en laboratorio 800°C
Muestra mezcla barreal 1 (50%) - barreal 3 (50%) - Laboratorio	S-6, S-7, S-8, S-9, S-10	
Muestra mezcla barreal 1 (30%) - barreal 3 (70%) - Laboratorio	R-6, R-7, R-8, R-9, R-10	
Muestra mezcla barreal 1 (70%) - barreal 3 (30%) - Laboratorio	K-11, K-12, K-13, K-14, K-15	Condiciones de temperatura controladas en laboratorio 1000°C
Muestra mezcla barreal 1 (50%) - barreal 3 (50%) - Laboratorio	S-11, S-12, S-13, S-14, S-15	
Muestra mezcla barreal 1 (30%) - barreal 3 (70%) - Laboratorio	R-11, R-12, R-13, R-14, R-15	

Fuente: (Autor, 2022)

2.3 Condiciones de operación

Las condiciones operacionales se evidencian en el siguiente capítulo, esto debido al detalle y diversidad de cada una de las pruebas realizadas al material de la zona de estudio, para lograr los objetivos planteados en la presente investigación.

2.4 Equipos utilizados

A continuación, se presentan los equipos utilizados para los diversos estudios realizados durante este trabajo de investigación.

- **Pesaje de las muestras:** Este proceso se realizó mediante el uso de una balanza portátil modelo R31P30 de la marca *OHAUS CORPORATION* con las siguientes características operativas, I) Capacidad máxima de 30.000 gr y mínima de 50g y error calibrado de +/- 1 gr.
- **Caracterización granulométrica del material:** mediante el uso de tamices serie ASTM de acero inoxidable de la marca *ENDECOTTS* utilizados para la clasificación de tamaño de partículas presentes en las muestras de estudio con las siguientes características operativas, I) utilización de tamices desde el tamaño de 2" hasta el #4 para determinar agregados gruesos, II) utilización de tamices desde el tamaño #10 hasta el #200 para determinar agregados finos.
- **Caracterización de condiciones de consistencia y límites de plasticidad del material:** mediante el uso de cazuela manual de Casagrande de referencia PS 11 de la marca *PINZUAR* con las siguientes características operativas, I) Copa fabricada en bronce de 185 g a 215 g, II) mecanismo de ajuste de altura de la copa de 10 mm, III) utilización de ranurador metálico tipo media luna.
- **Caracterización química del material:** Este proceso se realizó mediante el uso del equipo espectrómetro de fluorescencia de rayos x (FRX) Epsilon 1 de la marca *Malvern Panalytical* con las siguientes características operativas, I) Un tubo de rayos x, voltaje máximo de 50kV, con un ánodo de plata; II) detector de estado sólido construido con un cuerpo de silicio (145 eV), y utilizando tiempos de procesamiento para cada una de las muestras de 30 minutos.
- **Caracterización mineralógica del material:** Este proceso se realizó mediante el uso del equipo de difracción de rayos x (DRX) de la marca *Malvern Panalytical* con las siguientes características operativas, I) ánodo de Cu y radiación $K_{\alpha 1}$ a 40 Kv y 30 mA, II) longitud de onda 1,54060Å, III) con 2θ variando desde 5.0116 hasta

69.9856, la identificación de los picos se llevo a cabo empleando los difractogramas presentes en la base de datos de COD 2014.

- **Caracterización termodinámica del material:** Este proceso se realizo mediante el uso del equipo Termogravímetro SDT Q600 de la marca *TA Instruments* en el cual se pueden realizar los ensayos TGA/DSC de manera simultanea con las siguientes características operativas, I) atmosfera de nitrógeno fluyendo a 40mL/min, con rampa de 10°C/min desde temperatura ambiental hasta 1000°C.
- **Secado y sinterización de probetas de prueba:** El proceso de secado de las probetas de los especímenes de prueba se realizo mediante el uso una mufla eléctrica modelo D8 serie 380 de la marca *Terrígeno* con las siguientes características operativas, I) Control de temperatura máxima de operación de 1200°C y temperatura mínima de 25°C controlada a través de sensor eléctrico calibrado con un error de +/- 1°C.
- **Pruebas de resistencia mecánica del material de estudio:** El proceso de pruebas de resistencia mecánica del material en estudio se realizo a través de una maquina automática para ensayos de compresión de la marca *Control* de referencia DPX utilizando las siguientes características operativas, I) Capacidad de carga ejercida de 1 500/150 kN, II) uso de bomba hidráulica de dos etapas con presión máxima de trabajo de 650 Bar, III) implementación de consola Automax Smart Line para garantizar la uniformidad de la velocidad durante el ciclo de carga desde el inicio de la rampa.

Todos los ensayos realizados se realizaron en cumplimiento de las respectivas normas técnicas colombianas NTC y normas internacionales INCONTEC y/o ASTM, teniendo en cuenta el tipo de ensayo realizado, su lugar de ejecución y su normativa asociada.

3. Análisis de resultados

En el presente capítulo se evidencian los resultados de las diversas pruebas realizadas a las muestras de la zona de estudio, los cuales se dividen en tres grupos:

- Caracterización fisicoquímica, termodinámica y mecánica inicial del material en estudio.
- Estudio del diseño de mezcla propuesto para mejorar las características del material en estudio alternando variables de procesos.
- Caracterización de los productos elaborados a partir del diseño de mezcla final obtenido a partir del material en estudio.

3.1 Caracterización fisicoquímica, termodinámica y mecánica inicial del material en estudio.

Con el fin de conocer las características del material en estudio y establecer una ruta de referencia experimental que pueda ser escalable y replicable dentro de los procesos industriales efectuados en los procesos del beneficio del mineral en la zona, se optó por realizar en primera instancia una caracterización fisicoquímica, termodinámica y mecánica del material de uso industrial de tipo arcilloso, presente en los depositivos del yacimiento de este mineral en el corregimiento de las casitas jurisdicción del municipio de valledupar en el departamento del cesar (Colombia).

Esto debido a que a la fecha no se contaba con información de base relacionada con las especies minerales presentes en la zona de estudio, sus componentes químicos elementales, propiedades térmicas, comportamiento asociado a la consistencia del material y su distribución de tamaño de partículas, los cuales son los principales aspectos para entender las características del material en estudio y por ende su posterior comportamiento mecánico.

Por lo tanto la caracterización fisicoquímica, termodinámica y mecánica, esta compuesta de la siguiente forma:

- Caracterización fisicoquímica, mediante la aplicación de las técnicas de difracción de rayos X y fluorescencia de rayos, para determinar las especies minerales presentes en las muestras seleccionadas de los diversos frentes activos de la zona en estudio y sus componentes químicos elementales.
- Caracterización termodinámica, mediante la aplicación de las técnicas de los ensayos termogravimétricos (TG) y termodiferencial (DSC), para determinar la variación de la masa con respecto a los cambios de temperatura y las reacciones del material en estudio frente a la variación de la temperatura.
- Caracterización mecánica aplicada, a partir del análisis de la distribución de tamaño de partículas del material en estudio, propiedades asociadas a su consistencia límites de plasticidad y humedad del material.

3.1.1 Caracterización fisicoquímica

En esta caracterización se procedió a estudiar las siguientes características del material en estudio: Composición química elemental mediante la implementación de la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX) y el análisis de las especies minerales presentes en la muestra en estudio mediante la técnica de difracción de rayos X (DRX).

▪ **Análisis químico de las muestras en estudio a través de la técnica FRX**

El análisis químico realizado a las muestras de mineral arcilloso de uso industrial presentes en los yacimientos activos en la zona de estudio, se efectuaron mediante la aplicación de la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX).

Este estudio se realizó para conocer las composiciones químicas elementales mediante la técnica FRX se realizó de manera inicial a las muestras de campo de los frentes activos Barreal 1, Barreal 2 y Barreal 3, esto con el fin de conocer los porcentajes de los elementos químicos en sus formas elementales y de óxidos.

Los resultados obtenidos en el primer ensayo de fluorescencia de rayos X aplicado a las muestras iniciales de los tres frentes activos presentes en la zona, se presentan en las siguientes tablas (**Tabla 3-1** y **Tabla 3-2**).

Tabla 3-1: Análisis químico elemental a través de la técnica fluorescencia de rayos X (FRX)

COMPOSICIÓN QUÍMICA ELEMENTAL			
MUESTRAS	BARREAL 1	BARREAL 2	BARREAL 3
COMPUESTOS	CONCENTRACIÓN (%)	CONCENTRACIÓN (%)	CONCENTRACIÓN (%)
<i>Mg</i>	8,169	5,68	4,916
<i>Al</i>	18,107	17,436	18,739
<i>Si</i>	47,809	48,404	49,974
<i>P</i>	1,262	1,327	1,298
<i>Cl</i>	0,682	0,945	0,753
<i>K</i>	6,593	6,463	6,752
<i>Ca</i>	2,895	3,69	3,23
<i>Mn</i>	*	1,237	1,245
<i>Ti</i>	1,312	0,251	0,232
<i>Fe</i>	13,169	14,163	12,653
<i>Cu</i>	*	0,19	*
<i>Ba</i>	*	0,214	0,208
Σ	100	100	100

Fuente: (Autor, 2022)

En el análisis realizado a través de la técnica de fluorescencia de rayos X, se evidencian los elementos químicos presentes en las muestras de mineral arcilloso de uso industrial en estudio. A partir de los resultados presentes en la (Tabla 3-1), se observaron que las muestras muestras Barreal 1, Barreal 2 y Barreal 3 poseen los principales elementos químicos asociados: Silice (*Si*), Aluminio (*Al*), Hierro (*Fe*), Magnesio (*Mg*), potasio (*K*), Titanio (*Ti*), entre otros, los cuales representan más del 90% de la composición de cada una de las muestras en estudio mientras que el 10% restante corresponde a impurezas y fases mineralógicas particulares presentes las muestra en estudio.

Tabla 3-2: Análisis químico elemental en forma de óxidos a través de la técnica fluorescencia de rayos X (FRX)

COMPOSICIÓN QUÍMICA EN FORMA DE ÓXIDOS			
MUESTRAS	BARREAL 1	BARREAL 2	BARREAL 3
COMPUESTOS EN FORMA DE ÓXIDO	CONCENTRACIÓN (%)	CONCENTRACIÓN (%)	CONCENTRACIÓN (%)
<i>MgO</i>	9,25	6,41	5,55
<i>Al₂O₃</i>	20,98	20,49	21,97
<i>SiO₂</i>	54,94	56,62	57,51
<i>P₂O₅</i>	1,33	1,43	1,36
<i>Cl</i>	0,31	0,44	0,34
<i>K₂O</i>	3,51	3,51	3,57
<i>CaO</i>	1,71	2,22	1,89
<i>TiO₂</i>	0,89	0,86	0,84
<i>MnO</i>	*	0,13	0,12
<i>Fe₂O₃</i>	7,09	7,73	6,76
<i>CuO</i>	*	0,08	*
<i>BaO</i>	*	0,09	0,09
Σ	100	100	100

Adicional a la tabla anteriormente mencionada (Tabla 3-1), se evidencian los resultados de los componentes químicos elementales de las muestras seleccionadas del sitio en estudio, con el fin de conocer su composición química elemental, pero en forma de óxidos (Tabla 3-2), los cuales se evidencian de la siguiente forma: Dióxido de silicio (*SiO₂*), Óxido

de aluminio (Al_2O_3), Oxido de magnesio (MgO) y oxido de hierro (III) (Fe_2O_3), los cuales como en el caso anterior representan mas del 90% de la composición de cada una de las muestras en estudio mientras que el 10% restante corresponde a impurezas presentes en el agua estructural que componen las arcillas, elementos particulares presentes en los demas minerales que conforman las muestra en estudio.

Por medio de la aplicación de la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX), se lograron identificar los componentes quimicos elementales presentes en las muestras del mineral arcilloso de uso industrial presente en la zona de estudio, datos que son de vital importancia para conocer sus principales constituyentes quimicos mayoritarios (*Si, Al, Fe, Mg y K*) y sus principales elementos en forma de oxido (Al_2O_3 y SiO_2), mediante los cuales podemos inferir que se trata de un material de composición arcillosa, y que con la ayuda de estos análisis podemos seguir conociendo otras características de vital importancia asociadas a este mineral y sus potenciales aplicaciones.

▪ **Análisis mineralogico de las muestras en estudio a través de la técnica DRX**

Una vez realizado el estudio de caracterización química elemental de las muestras de los frentes en explotación en estudio (Barreal 1, Barreal 2 y Barreal 3), se procedio a realizar la respectiva caracterización mineralogica, con el fin de conocer las especies minerales que conforman las muestras en estudio y tener mayor claridad e información acerca de lo minerales presentes en esta zona.

Los difractogramas se muestran en las figuras (**Figura 3-1, Figura 3-2 y Figura 3-3**), mientras que la composición promedio de los minerales que conforman las muestras en estudio se evidencian en la tabla (**Tabla 3-3**).

Figura 3-1: Difractograma muestra Barreal 1

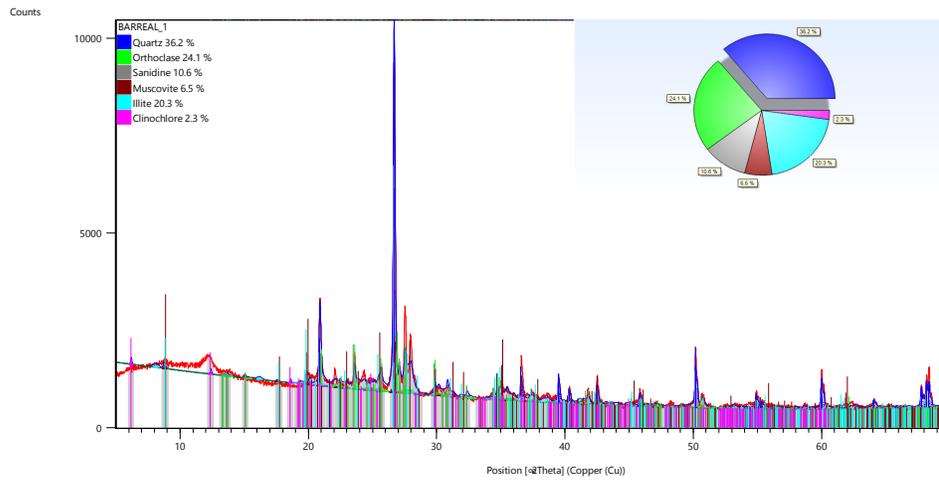


Figura 3-2: Difractograma muestra Barreal 2

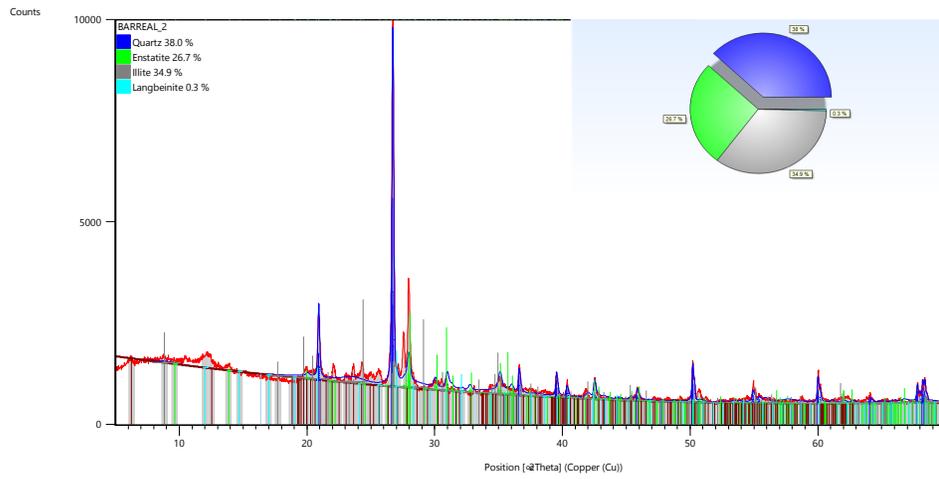


Figura 3-3: Difractograma muestra Barreal 3

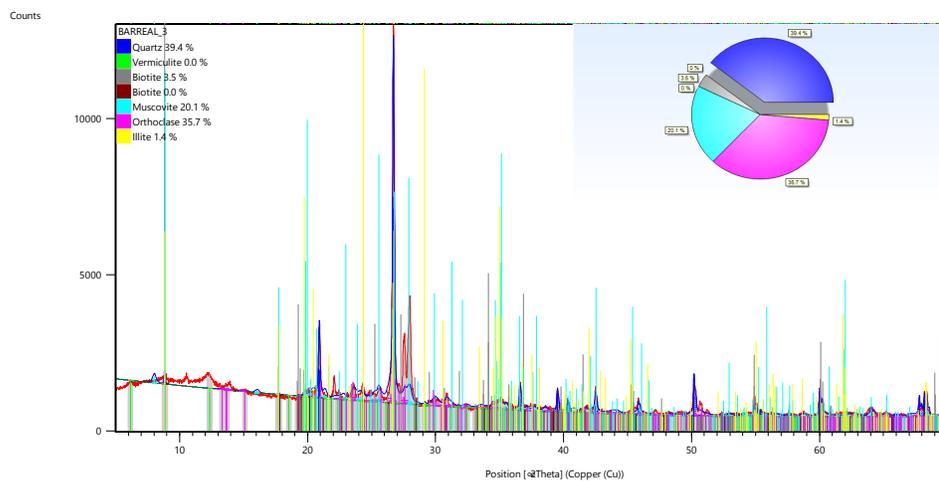


Tabla 3-3: Minerales reportados por medio de técnica de difracción de rayos X

Muestra	Especie Mineral	Formula quimica	Porcentaje de composición (%)
Barreal 1	Quarzo	SiO_2	36,2
	Ortoclasa	$K(AlSi_3O_8)$	24,1
	Illita	$K_{0,65}Al_2(Al_{0,65}Si_{3,35}O_{10})(OH)_2$	20,3
	Sanidina	$K(AlSi_3O_8)$	10,6
	Moscovita	$KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$	6,5
	Clinocloro	$Mg_5Al(AlSi_3O_{10})(OH)_8$	2,3
Barreal 2	Quarzo	SiO_2	38
	Illita	$K_{0,65}Al_2(Al_{0,65}Si_{3,35}O_{10})(OH)_2$	34,9
	Enstatita	$Mg_2Si_2O_6$	26,7
	Langbeinita	$K_2Mg_2(SO_4)_3$	0,3
Barreal 3	Quarzo	SiO_2	39
	Ortoclasa	$K(AlSi_3O_8)$	35,7
	Moscovita	$KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$	20,1
	Biotita	$K(Mg,Fe)_3(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$	3,5
	Illita	$K_{0,65}Al_2(Al_{0,65}Si_{3,35}O_{10})(OH)_2$	1,4

En el análisis de difracción de rayos X (DRX) realizado a las muestras de los diversos frentes de explotación activos dentro de los yacimientos de arcilla de uso industrial en la zona de estudio, se evidenciaron diversos tipos de minerales en su mayoría algunos (Aluminosilicatos hidratados), entre los cuales se encuentran: Illita, moscovita y la biotita perteneciente al grupo de las (micas), los cuales conformarían la mayor parte de la fracción fina, la cual por sus características le proporcionarían un comportamiento plástico a las muestras, y por el otro lado se encuentran otras especies minerales como lo son: El cuarzo, ortoclara, sanidina, clinocloro, enstatita y la langbeinita, los cuales son minerales que representan la mayor parte de la fracción gruesa de las muestras, y que le proporcionarían una característica desgrasante al material.

3.1.2 Caracterización térmica

Mediante la implementación de las pruebas de caracterización térmica, es posible analizar el cambio que sufre las muestras analizadas con respecto a la variación de su masa (TGA), y adicional a esto observar el comportamiento de la cinética y la energía de transformación (DSC) de las muestras de mineral arcilloso de uso industrial en estudio, esto teniendo en cuenta los cambios de temperatura bajo ciertas condiciones establecidas en laboratorio.

■ **Análisis térmico gravimétrico y termodiferencial**

Mediante las figuras (Figura 3-4, Figura 3-5 y Figura 3-6) se evidencian diversos momentos de los cambios de masa de las muestras de estudio el comportamiento cinético (TGA= Línea verde de las figuras) y de energía de transformación (DSC= Línea azul de las figuras) de las muestras en estudio, y en la tabla (Tabla 3-4) el respectivo análisis de cada uno de los ensayos realizados.

Figura 3-4: Análisis termogravimetrico y termodiferencial de la muestra Barreal 1

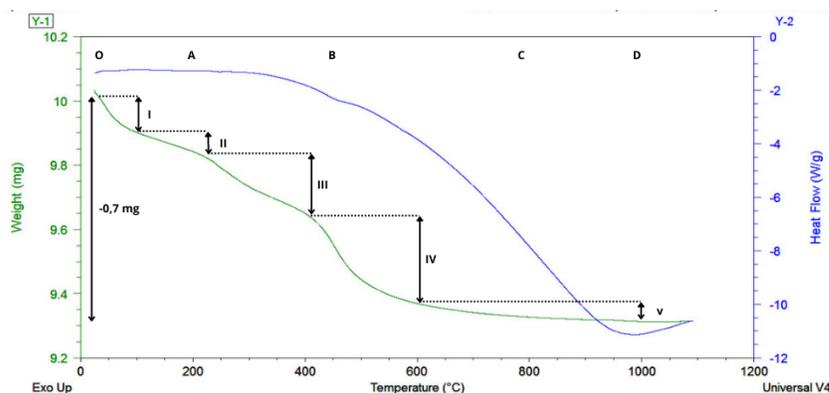


Figura 3-5: Análisis termogravimetrico y termodiferencial de la muestra Barreal 2

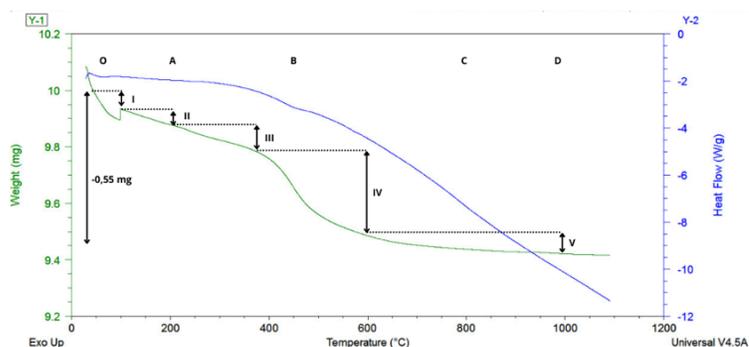


Figura 3-6: Análisis termogravimetrico y termodiferencial de la muestra Barreal 3

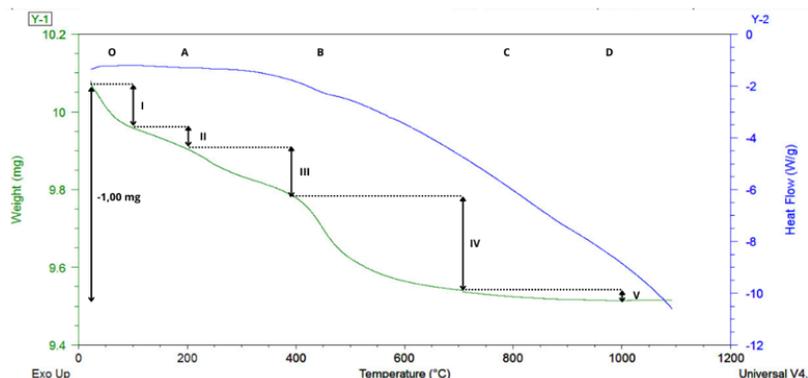


Tabla 3-4: Análisis de resultados estudios TGA y DSC en muestras bajo condiciones operativas de campo

T °C	Curva de análisis					
	TGA (Línea verde)			DSC (Línea azul)		
	Barreal 1	Barreal 2	Barreal 3	Barreal 1	Barreal 2	Barreal 3
0-100°	Se aprecian una pérdida en peso de 0,05 mg relacionada con el proceso de pérdida de agua higroscópica o superficial presente en las muestras.	Se aprecian una pérdida en peso de 0,1 mg relacionada con el proceso de pérdida de agua higroscópica o superficial presente en las muestras.	Se aprecian una pérdida en peso de 0,55 mg relacionada con el proceso de pérdida de agua higroscópica o superficial presente en las muestras.	Se producen cambios endotérmicos, producto de los procesos de desorción o secado superficial de las muestras, este proceso se percibe entre los puntos O y A.		
100-200°	Entre los puntos I y II se aprecia una pérdida de masa en la muestra de 0,05 mg, debido a la evaporación del agua ligada de manera superficial de la muestra.	Entre los puntos I y II se aprecia una pérdida de masa en la muestra de 0,03 mg, debido a la evaporación del agua ligada de manera superficial de la muestra.	Entre los puntos I y II se aprecia una pérdida de masa en la muestra de 0,05 mg, debido a la evaporación del agua ligada de manera superficial de la muestra.	En el punto A, se aprecia el comienzo de una ligera estabilización en la reacción y una tensión de vapor baja, debido a que no se han generado reacciones químicas relevantes dentro de los componentes de las muestras.	En el punto A, se aprecia el comienzo de una ligera estabilización en la reacción y una tensión de vapor baja, debido a que no se han generado reacciones químicas relevantes dentro de los componentes de las muestras.	En el punto A, se aprecia el comienzo de una ligera estabilización en la reacción y una tensión de vapor baja, debido a que no se han generado reacciones químicas relevantes dentro de los componentes de las muestras.
200-400°	Entre los puntos II y III se aprecia el inicio de la desorción del agua cristalizada en la muestra de estudio, con una pérdida en peso de 0,20 mg	Entre los puntos II y III se aprecia el inicio de la desorción del agua cristalizada en la muestra de estudio, con una pérdida en peso de 0,07 mg	Entre los puntos II y III se aprecia el inicio de la desorción del agua cristalizada en la muestra de estudio, con una pérdida en peso de 0,10 mg	Entre los puntos A y B, se aprecia un leve descenso en la curva, producto de las reacciones ocasionadas por la disociación de los oxidantes de los hidroxidos de hierro (Fe ₂ O ₃)	Entre los puntos A y B, se aprecia un leve descenso en la curva, producto de las reacciones ocasionadas por la disociación de los oxidantes de los hidroxidos de hierro (Fe ₂ O ₃)	Entre los puntos A y B, se aprecia un leve descenso en la curva, producto de las reacciones ocasionadas por la disociación de los oxidantes de los hidroxidos de hierro (Fe ₂ O ₃)
400-600°	Entre los puntos III y IV, se aprecia el proceso de la pérdida de agua estructural de las muestras del mineral arcilloso en estudio, esto correspondiente al proceso de deshidrolización en el cual se genera una pérdida en peso de 0,25 mg.	Entre los puntos III y IV, se aprecia el proceso de la pérdida de agua estructural de las muestras del mineral arcilloso en estudio, esto correspondiente al proceso de deshidrolización en el cual se genera una pérdida en peso de 0,35 mg.	Entre los puntos III y IV, se aprecia el proceso de la pérdida de agua estructural de las muestras del mineral arcilloso en estudio, esto correspondiente al proceso de deshidrolización en el cual se genera una pérdida en peso de 0,15 mg.	En el punto B, se aprecia entre los 450° a 500° una reacción exotérmica producto del comienzo de la transformación alotrópica del curazo α a β durante la etapa de calentamiento, presente en las muestras de estudio.	En el punto B, se aprecia entre los 450° a 500° una reacción exotérmica producto del comienzo de la transformación alotrópica del curazo α a β durante la etapa de calentamiento, presente en las muestras de estudio.	En el punto B, se aprecia entre los 450° a 500° una reacción exotérmica producto del comienzo de la transformación alotrópica del curazo α a β durante la etapa de calentamiento, presente en las muestras de estudio.
600-1000°	Entre los puntos IV y V, se aprecia una disminución notable del proceso de pérdida de agua por deshidrolización, en el cual se genera una pérdida en peso de 0,05 mg	Entre los puntos IV y V, se aprecia una disminución notable del proceso de pérdida de agua por deshidrolización, en el cual se genera una pérdida en peso de 0,05 mg	Entre los puntos IV y V, se aprecia una disminución notable del proceso de pérdida de agua por deshidrolización, en el cual se genera una pérdida en peso de 0,04 mg	Entre los puntos B,C y D, se aprecia un descenso gradual progresivo y constante de la curva, provocado el comienzo de los procesos de fusión debido a los procesos de recristalización o transformación de fases (Posible formación de mullita), producto de las partículas del material de tipo arcillo presentes en la muestra de estudio.	Entre los puntos B,C y D, se aprecia un descenso gradual progresivo y constante de la curva, provocado el comienzo de los procesos de fusión debido a los procesos de recristalización o transformación de fases (Posible formación de mullita), producto de las partículas del material de tipo arcillo presentes en la muestra de estudio.	Entre los puntos B,C y D, se aprecia un descenso gradual progresivo y constante de la curva, provocado el comienzo de los procesos de fusión debido a los procesos de recristalización o transformación de fases (Posible formación de mullita), producto de las partículas del material de tipo arcillo presentes en la muestra de estudio.

En la tabla (**Tabla 3-4:** Análisis de resultados estudios TGA y DSC en muestras bajo condiciones operativas de campo) se presenta el análisis de los DSC resultados de cada uno de los procesos termodinámicos realizados a las muestras de la zona en estudio teniendo en cuenta algunos antecedentes investigativos relacionados con arcillas de uso industrial

(Ricardo et al., 2018), y su relación con ciertas particularidades asociadas a los minerales presentes en cada una de estas muestras, las cuales aportaran información asociada a las temperaturas optimas de cocción, para obtener productos finales con una mayor resistencia mecánica.

3.1.3 Caracterización mecánica

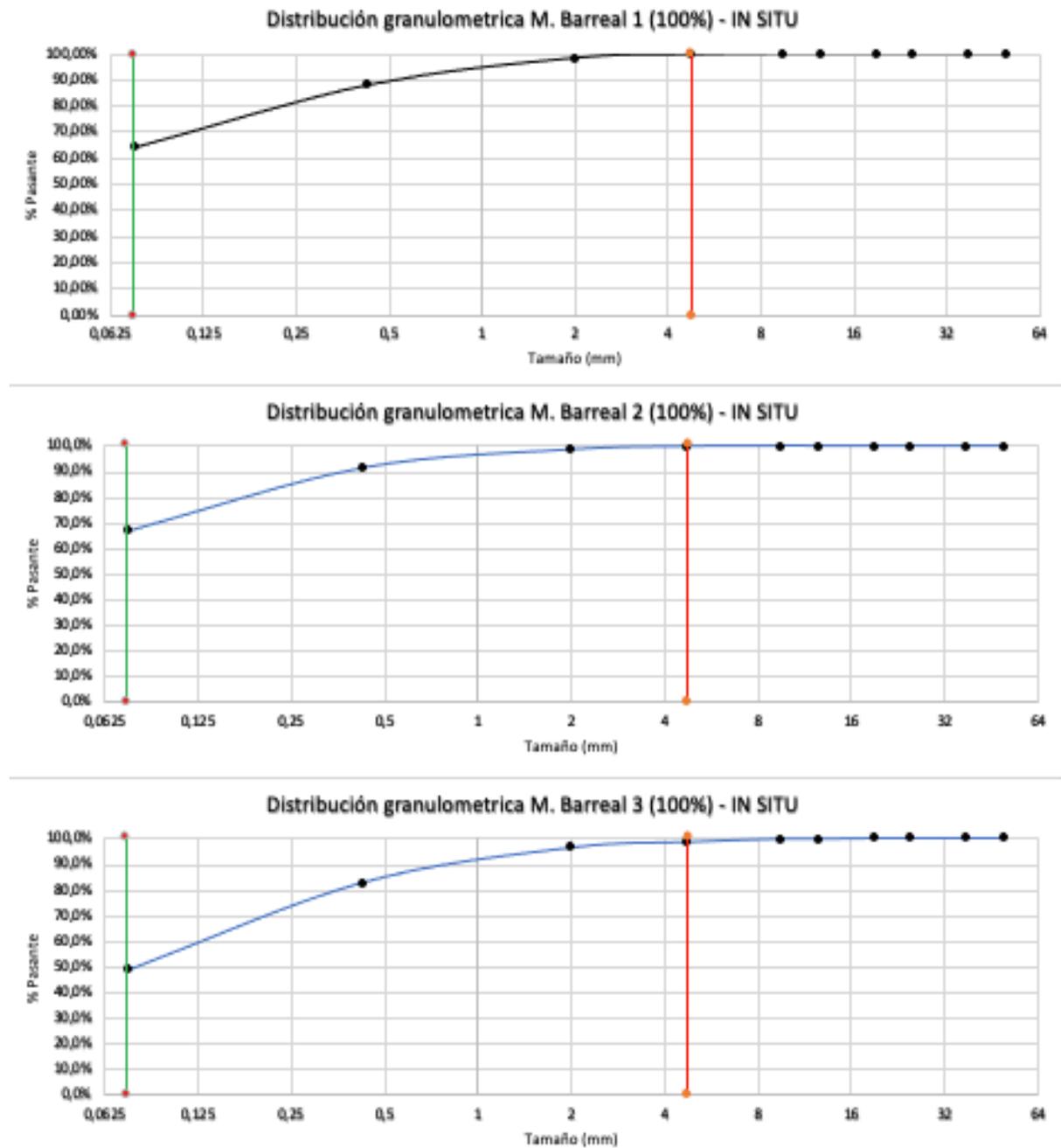
Mediante la caracterización mecánica inicial del material se estudiaron las siguientes características: Consistencia de las muestras de mineral arcilloso de uso industrial, mediante la aplicación de los limites de atterberg, su distribución de tamaño de partículas y características de clasificación de acuerdo con su composición, los cuales se evidencian en la (**Tabla 3-5**) y la (**Figura 3-7**).

▪ Distribución granulométrica y características asociadas a la consistencia y plasticidad del material

Tabla 3-5: Distribución de tamaño de partículas y características de consistencia de los materiales en estudio

Distribución granulométrica serie ASTM - M. Barreal 1 (100%)						
Abertura mm	# Tamiz	P. Retenido	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasante	
50	2"	0	0,00%	0,00%	100,00%	
37,5	1 1/2"	0	0,00%	0,00%	100,00%	
25,00	1"	0	0,00%	0,00%	100,00%	
19,00	3/4"	0	0,00%	0,00%	100,00%	
12,50	1/2"	0	0,00%	0,00%	100,00%	
9,50	3/8"	0	0,00%	0,00%	100,00%	
4,75	# 4	7,6	0,33%	0,33%	99,67%	
2	# 10	32,6	1,40%	1,73%	98,27%	
0,425	# 40	243,2	10,44%	12,17%	87,83%	
0,075	# 200	559,7	24,03%	36,20%	63,80%	
	Fondo	1485,9	63,80%	100,00%		
	P.Muestra (gr)	2329	Peso muestra humeda (gr)	2329		
Características de la consistencia y clasificación del material en estudio						
(%) Grava	(%) Arenas	(%) Finos	Limite liquido (L.L)	Limite plastico (L.P)	Indice de plasticidad (I.D)	
0,33%	35,87%	63,80%	25,40	19,10	6,3	
Clasificación A.A.S.H.T.O		A-4	Clasificación U.S.C		CL-ML	
Distribución granulométrica serie ASTM - M. Barreal 2 (100%)						
Abertura mm	# Tamiz	P. Retenido	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasante	
50	2"	0	0,0%	0,0%	100,0%	
37,5	1 1/2"	0	0,0%	0,0%	100,0%	
25,00	1"	0	0,0%	0,0%	100,0%	
19,00	3/4"	0	0,0%	0,0%	100,0%	
12,50	1/2"	0	0,0%	0,0%	100,0%	
9,50	3/8"	0	0,0%	0,0%	100,0%	
4,75	# 4	3,9	0,2%	0,2%	99,8%	
2	# 10	27,3	1,3%	1,5%	98,5%	
0,425	# 40	150,5	7,0%	8,5%	91,5%	
0,075	# 200	516,4	24,1%	32,6%	67,3%	
	Fondo	1440	67,3%	100,0%		
	P.Muestra (gr)	2138,1	Peso muestra humeda (gr)	2139		
Características de la consistencia y clasificación del material en estudio						
(%) Grava	(%) Arenas	(%) Finos	Limite liquido (L.L)	Limite plastico (L.P)	Indice de plasticidad (I.D)	
0,2%	32,5%	67,3	26,80	20,40	6,4	
Clasificación A.A.S.H.T.O		A-4	Clasificación U.S.C		CL-ML	
Distribución granulométrica serie ASTM - M. Barreal 3 (100%)						
Abertura mm	# Tamiz	P. Retenido	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasante	
50	2"	0	0,0%	0,0%	100,0%	
37,5	1 1/2"	0	0,0%	0,0%	100,0%	
25,00	1"	0	0,0%	0,0%	100,0%	
19,00	3/4"	0	0,0%	0,0%	100,0%	
12,50	1/2"	2,2	0,2%	0,2%	99,8%	
9,50	3/8"	0	0,0%	0,2%	99,8%	
4,75	# 4	13,1	1,3%	1,5%	98,5%	
2	# 10	22,8	2,2%	3,7%	96,3%	
0,425	# 40	141,5	13,6%	17,3%	82,7%	
0,075	# 200	353,6	34,0%	51,3%	48,7%	
	Fondo	506,8	48,7%	100,0%		
	P.Muestra (gr)	1040	Peso muestra humeda (gr)	1040		
Características de la consistencia y clasificación del material en estudio						
(%) Grava	(%) Arenas	(%) Finos	Limite liquido (L.L)	Limite plastico (L.P)	Indice de plasticidad (I.D)	
1,5%	49,8%	48,7%	23,00	17,90	5,1	
Clasificación A.A.S.H.T.O		A-4	Clasificación U.S.C		SM-SC	

Figura 3-7: Distribución grafica promedio de particulas presentes en la muestra en estudio



En las siguientes graficas se logro apreciar la distribución granulométrica y la particularidad de tamaños de cada una de las muestras en estudio, entre las cuales se destacan los valores de los pasantes malla #200 correspondientes a (63,80%, 67,30% y 48,70%), valores de vital importancia para determinar la cantidad de arcilla y sus particularidades en cada una de las muestras en estudio.

3.2 Estudio del diseño de mezcla propuesto

Una vez realizado los estudios de caracterización fisicoquímicos, termodinámicos y mecánicos primarios al mineral arcilloso de tipo industrial presente en los frentes de explotación activos en la zona de estudio, se continuo con la realización de un diseño de mezcla a partir del análisis de los componentes químicos, mineralógicos, termodinámicos, granulométricos y de sus límites de consistencia y plasticidad, con el fin de lograr una mezcla optima que permita mejorar sus características químicas, termodinámicas, granulométricas, consistencia y de plasticidad, con el fin de obtener un producto con mejores características en cuanto a sus propiedades mecánicas y de dureza.

3.2.1 Estudio de variables de procesos para la selección del diseño de mezclas

Una vez analizados los resultados obtenidos a partir de los ensayos iniciales de caracterización mencionados anteriormente, se decide realizar un diseño de mezcla entre las muestras Barreal 1 y Barreal 3, debido a que estas muestras presentaron las siguientes condiciones:

- Mejores condiciones granulométricas asociadas al porcentaje total de material fino y arenoso en su composición.
- Mejores límites líquidos y plásticos, factores que favorecen la trabajabilidad de las muestras.
- Mayores porcentajes de elementos químicos de interés en forma de óxido como la alúmina (Al_2O_3), magnesita (MgO), sílice (SiO_2) y óxido de hierro (Fe_2O_3).
- Presencia de minerales asociados a los feldespatos, los cuales favorecen a disminuir los puntos de fusión de estos materiales y lograr altas resistencias mecánicas a menores temperaturas.
- Mejores resistencias a la compresión y características de humedad obtenidas a partir de los especímenes de pruebas elaboradas con el material de estos dos yacimientos dentro de la zona de estudio.

Posterior a la caracterización inicial para conocer la distribución de tamaño de partículas, componentes químicos elementales y los límites de consistencia y plasticidad presentes en los materiales arcillosos presentes en la zona en estudio, se procedió a realizar un diseño de mezclas experimental a partir de la revisión de antecedentes de trabajos realizados a nivel regional, nacional e internacional referenciados en la literatura científica con respecto al estudio y caracterización de minerales arcillosos de tipo industrial y el mejoramiento de las características de estos materiales mediante la implementación de diseños de mezcla.

A partir del análisis de la información anteriormente mencionada, se buscó validar las siguientes proporciones en peso (70%-30%, 50%-50% y 30%-70%) de los materiales provenientes de los dos frentes de explotación activos en la zona de estudio, con el fin de observar los cambios de algunas características específicas de los materiales mezclados tales como: su distribución granulométrica, límites de consistencia y plasticidad, composición química elemental y sus características termodinámicas, obtenidas a partir de las mezclas de material de los dos frentes de explotación activos seleccionados.

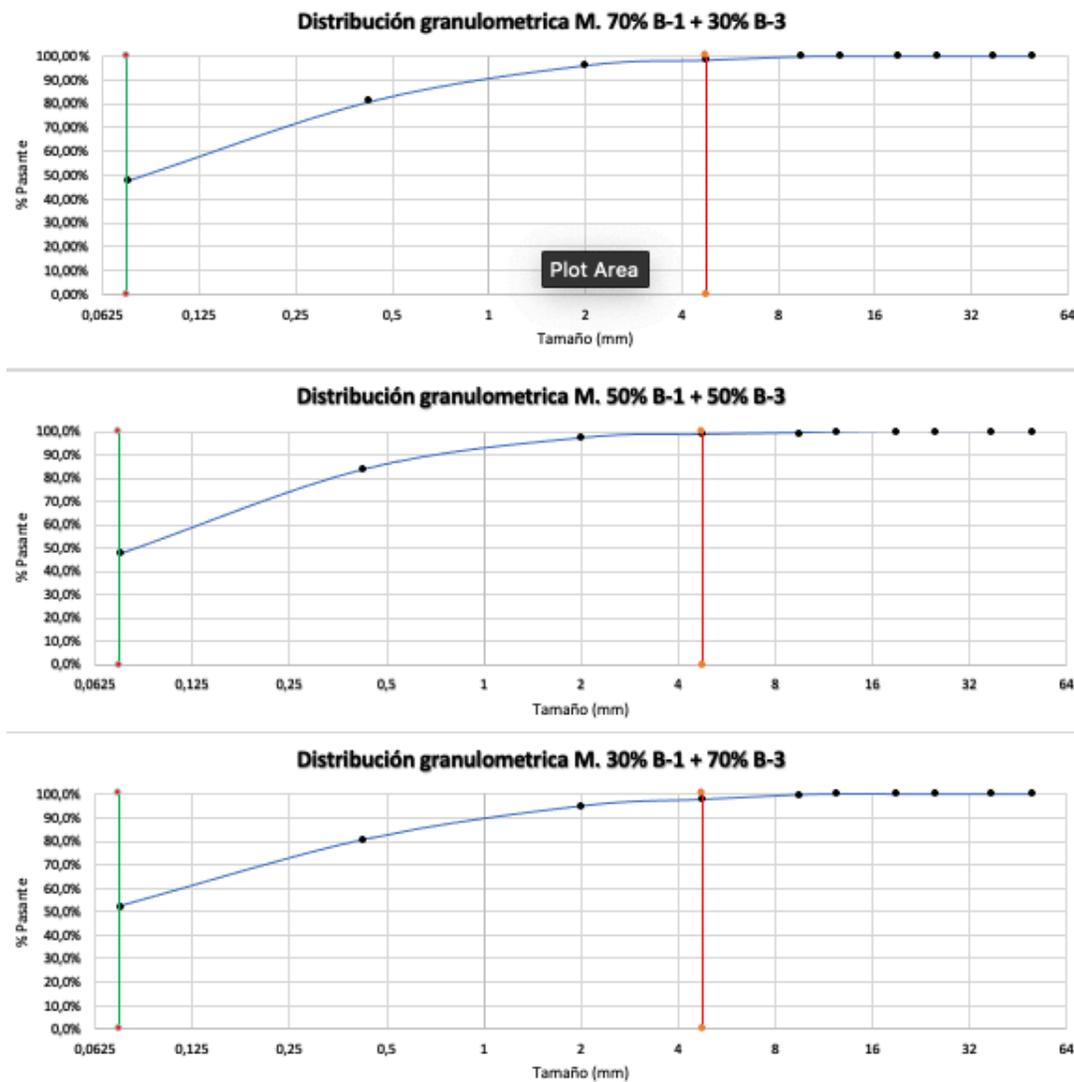
3.2.2 Ajuste de la distribución granulométrica y límites de consistencia del material a partir del diseño de mezcla.

Tabla 3-6: Distribución de tamaño de partículas y características de consistencia de los diseños de mezcla elaborados a partir de los materiales en estudio

Distribución granulométrica serie ASTM - M. 70% B-1 + 30% B-3						
Abertura mm	# Tamiz	P. Retenido	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasante	
50	2"	0	0,00%	0,00%	100,00%	
37,5	1 1/2"	0	0,00%	0,00%	100,00%	
25,00	1"	0	0,00%	0,00%	100,00%	
19,00	3/4"	0	0,00%	0,00%	100,00%	
12,50	1/2"	0	0,00%	0,00%	100,00%	
9,50	3/8"	1,8	0,16%	0,16%	99,84%	
4,75	# 4	17,6	1,55%	1,71%	98,29%	
2	# 10	25,2	2,22%	3,93%	96,07%	
0,425	# 40	171,5	15,11%	19,04%	80,96%	
0,075	# 200	374,4	32,99%	52,03%	47,97%	
Fondo		544,5	47,97%	100,00%		
P.Muestra (gr)		1135	Peso muestra húmeda (gr)	1135		
Características de la consistencia y clasificación del material en estudio						
(%) Grava	(%) Arenas	(%) Finos	Limite líquido (L.L)	Limite plástico (L.P)	Indice de plasticidad (I.D)	
1,71%	50,32%	47,97%	22,30	18,80	3,5	
Clasificación A.A.S.H.T.O		A-4	Clasificación U.S.C		SM	
Distribución granulométrica serie ASTM - M. 50% B-1 + 50% B-3						
Abertura mm	# Tamiz	P. Retenido	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasante	
50	2"	0	0,0%	0,0%	100,0%	
37,5	1 1/2"	0	0,0%	0,0%	100,0%	
25,00	1"	0	0,0%	0,0%	100,0%	
19,00	3/4"	0	0,0%	0,0%	100,0%	
12,50	1/2"	4,5	0,3%	0,3%	99,6%	
9,50	3/8"	6,8	0,5%	0,8%	99,1%	
4,75	# 4	9,6	0,7%	1,5%	98,4%	
2	# 10	20,3	1,5%	3,0%	96,9%	
0,425	# 40	181,9	13,4%	16,5%	83,5%	
0,075	# 200	490,2	36,2%	52,6%	47,3%	
Fondo		642	47,4%	100,0%		
P.Muestra (gr)		1355,3	Peso muestra húmeda (gr)	1355		
Características de la consistencia y clasificación del material en estudio						
(%) Grava	(%) Arenas	(%) Finos	Limite líquido (L.L)	Limite plástico (L.P)	Indice de plasticidad (I.D)	
1,5%	51,1%	47,4%	22,30	19,50	2,8	
Clasificación A.A.S.H.T.O		A-4	Clasificación U.S.C		SM	
Distribución granulométrica serie ASTM - M. 30% B-1 + 70% B-3						
Abertura mm	# Tamiz	P. Retenido	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasante	
50	2"	0	0,0%	0,0%	100,0%	
37,5	1 1/2"	0	0,0%	0,0%	100,0%	
25,00	1"	0	0,0%	0,0%	100,0%	
19,00	3/4"	0	0,0%	0,0%	100,0%	
12,50	1/2"	0	0,0%	0,0%	100,0%	
9,50	3/8"	4,3	0,3%	0,3%	99,7%	
4,75	# 4	26,5	2,0%	2,3%	97,7%	
2	# 10	36,6	2,8%	5,1%	94,9%	
0,425	# 40	187,7	14,1%	19,2%	80,8%	
0,075	# 200	372,4	28,0%	47,2%	52,8%	
Fondo		702	52,8%	100,0%		
P.Muestra (gr)		1329,5	Peso muestra húmeda (gr)	1330		
Características de la consistencia y clasificación del material en estudio						
(%) Grava	(%) Arenas	(%) Finos	Limite líquido (L.L)	Limite plástico (L.P)	Indice de plasticidad (I.D)	
2,3%	44,9%	52,8%	22,30	19,70	2,6	
Clasificación A.A.S.H.T.O		A-4	Clasificación U.S.C		SM-SC	

En la (Tabla 3-6) se evidencian los resultados de la distribución de tamaño de partícula en las proporciones seleccionadas a partir del diseño de mezcla de las muestras seleccionadas de los dos yacimientos activos dentro de la zona en estudio, en donde se observarán variaciones significativa en los porcentajes de arenas y finos, que a su vez modifican las características de consistencia y plasticidad de estos materiales, en comparación de las condiciones iniciales del material de la zona en estudio.

Figura 3-8: Distribución grafica promedio de particulas presentes en los diseños de mezcla propuestos a partir de la muestra en estudio seleccionadas



Cabe resaltar que estas nuevas distribuciones granulometricas presentes en las muestras de estudio seleccionadas (**70% B1 + 30% B3 - 50% B1 + 50% B3 - 30% B1 + 70% B3**), son de vital importancia para conocer las proporciones de arenas (<50%) como material desgrasante en la mezcla (**Figura 3-8**), el cual es un material beneficioso para la conformación y secado de las muestras en estudio, teniendo en cuenta la disminución de los limites de plasticidad de estas muestras, mientras que el material fino en mayor proporción (>50%), tiene la finalidad de ofrecerle a las nuevas mezclas una mayor plasticidad y reactividad en los procesos termicos proporcionadas por su gran desarrollo superficial en las mezclas de estudio.

3.2.3 Análisis químico de las muestras obtenidas a partir del diseño de mezcla mediante la técnica FRX

Los resultados obtenidos a partir de los ensayo de fluorescencia de rayos X a las muestras seleccionadas para la evaluación de los diseños de mezcla de los dos frentes activos de la zona, se presentan en las siguientes tablas (**Tabla 3-7** y **Tabla 3-8**).

Tabla 3-7: Análisis químico elemental aplicado al diseño de mezcla de las muestras seleccionadas a través de la técnica fluorescencia de rayos X (FRX)

COMPOSICIÓN QUÍMICA ELEMENTAL			
MUESTRAS	70% B1 + 30% B3	50% B1 + 50% B3	30% B1 + 70% B3
COMPUESTOS	CONCENTRACIÓN (%)	CONCENTRACIÓN (%)	CONCENTRACIÓN (%)
Mg	15,1	14,79	5,78
Al	17,9	17,96	18,39
Si	45,37	45,44	49,88
P	1,01	1	1,19
Cl	0,79	0,82	0,66
K	5,55	5,47	6,33
Ca	2,5	2,57	3,17
Ti	0,98	1,04	1,17
Mn	0,2	0,18	0,24
Fe	10,31	10,61	12,99
Ba	0,29	0,12	0,2
Σ	100	100	100

En el análisis realizado a través de la técnica de fluorescencia de rayos X, se evidencian los elementos químicos presentes en las muestras obtenidas a partir del diseño de mezcla planteado de las muestras mineral arcilloso de uso industrial en estudio. A partir de los resultados presentes en la (**Tabla 3-7**), se observaron variaciones significativas de los principales elementos químicos asociados: Silice (Si), Aluminio (Al), Hierro (Fe), Magnesio (Mg) y potasio (K), y sus componentes en forma de óxidos (**Tabla 3-8**).

Tabla 3-8: Análisis químico elemental en forma de óxidos aplicado al diseño de mezcla de las muestras seleccionadas a través de la técnica fluorescencia de rayos X (FRX)

COMPOSICIÓN QUÍMICA EN FORMA DE ÓXIDOS			
MUESTRAS	70% B1 + 30% B3	50% B1 + 50% B3	30% B1 + 70% B3
COMPUESTOS EN FORMA DE ÓXIDO	CONCENTRACIÓN (%)	CONCENTRACIÓN (%)	CONCENTRACIÓN (%)
MgO	17,19	16,82	6,52
Al ₂ O ₃	20,05	20,11	21,46
SiO ₂	50,69	50,83	57,32
P ₂ O ₅	1,04	1,03	1,25
Cl	0,35	0,36	0,3
K ₂ O	2,89	2,85	3,36
CaO	1,44	1,49	1,86
TiO ₂	0,66	0,70	0,79
MnO	0,10	0,09	0,12
Fe ₂ O ₃	5,49	5,66	6,95
BaO	0,10	0,06	0,07
Σ	100	100	100

3.2.4 Caracterización térmica de las muestras obtenidas a partir del diseño de mezcla

Mediante las figuras (Figura 3-9, Figura 3-10 y Figura 3-11) se evidencian diversos momentos de los cambios de masa de las muestras de estudio el comportamiento cinético (TGA= Línea verde de las figuras) y de energía de transformación (DSC= Línea purpura de las figuras) de las muestras en estudio, y en la tabla (Tabla 3-9) el respectivo análisis de cada uno de los ensayos realizados.

Figura 3-9: Análisis termogravimétrico y termodiferencial de la muestra 70% B1 + 30% B3

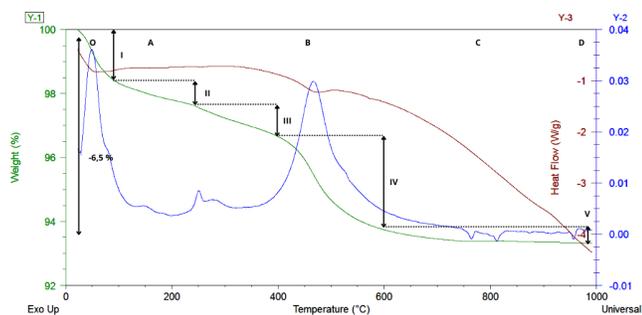


Figura 3-10: Análisis termogravimétrico y termodiferencial de la muestra 50% B1 + 50% B3

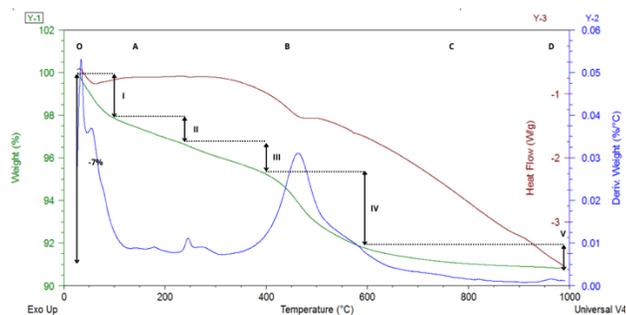


Figura 3-11: Análisis termogravimétrico y termodiferencial de la muestra 30% B1 + 70% B3

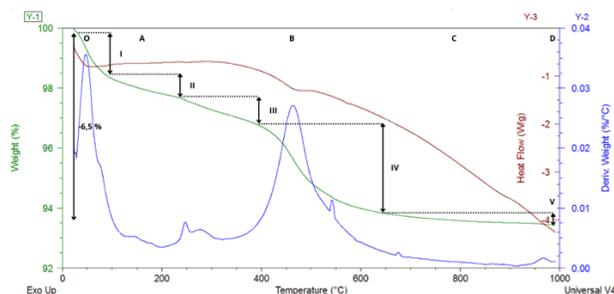


Tabla 3-9: Análisis de resultados de los estudios TGA y DSC aplicados al diseño de mezclas planteado

T °C	Curva de análisis					
	TGA (Linea verde)			DSC (Linea purpura)		
	70% B1 + 30% B3	50% B1 + 50% B3	30% B1 + 70% B3	70% B1 + 30% B3	50% B1 + 50% B3	30% B1 + 70% B3
0-100°	Se aprecian una pérdida en peso de 0,05 mg relacionada con el proceso de pérdida de agua higroscópica o superficial presente en las muestras.	Se aprecian una pérdida en peso de 0,1 mg relacionada con el proceso de pérdida de agua higroscópica o superficial presente en las muestras.	Se aprecian una pérdida en peso de 0,55 mg relacionada con el proceso de pérdida de agua higroscópica o superficial presente en las muestras.	Se producen cambios endotérmicos, producto de los procesos de desorción o secado superficial de las muestras, este proceso se percibe entre los puntos O y A.		
100-200°	Entre los puntos I y II se aprecia una pérdida de masa en la muestra de 0,05 mg, debido a la evaporación del agua ligada de manera superficial de la muestra.	Entre los puntos I y II se aprecia una pérdida de masa en la muestra de 0,03 mg, debido a la evaporación del agua ligada de manera superficial de la muestra.	Entre los puntos I y II se aprecia una pérdida de masa en la muestra de 0,05 mg, debido a la evaporación del agua ligada de manera superficial de la muestra.	En el punto A, se aprecia el comienzo de una ligera estabilización en la reacción y una tensión de vapor baja, debido a que no se han generado reacciones químicas relevantes dentro de los componentes de las muestras.	En el punto A, se aprecia el comienzo de una ligera estabilización en la reacción y una tensión de vapor baja, debido a que no se han generado reacciones químicas relevantes dentro de los componentes de las muestras.	En el punto A, se aprecia el comienzo de una ligera estabilización en la reacción y una tensión de vapor baja, debido a que no se han generado reacciones químicas relevantes dentro de los componentes de las muestras.
200-400°	Entre los puntos II y III se aprecia el inicio de la desorción del agua cristalizada en la muestra de estudio, con una pérdida en peso de 0,20 mg	Entre los puntos II y III se aprecia el inicio de la desorción del agua cristalizada en la muestra de estudio, con una pérdida en peso de 0,07 mg	Entre los puntos II y III se aprecia el inicio de la desorción del agua cristalizada en la muestra de estudio, con una pérdida en peso de 0,10 mg	Entre los puntos A y B, se aprecia un leve descenso en la curva, producto de las reacciones ocasionadas por la disociación de los oxidantes de los hidroxidos de hierro (Fe ₂ O ₃)	Entre los puntos A y B, se aprecia un leve descenso en la curva, producto de las reacciones ocasionadas por la disociación de los oxidantes de los hidroxidos de hierro (Fe ₂ O ₃)	Entre los puntos A y B, se aprecia un leve descenso en la curva, producto de las reacciones ocasionadas por la disociación de los oxidantes de los hidroxidos de hierro (Fe ₂ O ₃)
400-600°	Entre los puntos III y IV, se aprecia el proceso de la pérdida de agua estructural de las muestras del mineral arcilloso en estudio, esto correspondiente al proceso de deshidrolización en el cual se genera una pérdida en peso de 0,25 mg.	Entre los puntos III y IV, se aprecia el proceso de la pérdida de agua estructural de las muestras del mineral arcilloso en estudio, esto correspondiente al proceso de deshidrolización en el cual se genera una pérdida en peso de 0,35 mg.	Entre los puntos III y IV, se aprecia el proceso de la pérdida de agua estructural de las muestras del mineral arcilloso en estudio, esto correspondiente al proceso de deshidrolización en el cual se genera una pérdida en peso de 0,15 mg.	En el punto B, se aprecia entre los 450° a 500° una reacción exotérmica producto del comienzo de la transformación alotrópica del curazo α a β durante la etapa de calentamiento, presente en las muestras de estudio.	En el punto B, se aprecia entre los 450° a 500° una reacción exotérmica producto del comienzo de la transformación alotrópica del curazo α a β durante la etapa de calentamiento, presente en las muestras de estudio.	En el punto B, se aprecia entre los 450° a 500° una reacción exotérmica producto del comienzo de la transformación alotrópica del curazo α a β durante la etapa de calentamiento, presente en las muestras de estudio.
600-1000°	Entre los puntos IV y V, se aprecia una disminución notable del proceso de pérdida de agua por deshidrolización, en el cual se genera una pérdida en peso de 0,05 mg	Entre los puntos IV y V, se aprecia una disminución notable del proceso de pérdida de agua por deshidrolización, en el cual se genera una pérdida en peso de 0,05 mg	Entre los puntos IV y V, se aprecia una disminución notable del proceso de pérdida de agua por deshidrolización, en el cual se genera una pérdida en peso de 0,04 mg	1) Entre los puntos B, C y D, se aprecia un descenso gradual progresivo y constante de la curva, provocado el comienzo de los procesos de fusión debido a los procesos de recristalización o transformación de fases (Posible formación de mullita), producto de las partículas del material de tipo arcillo presentes en la muestra de estudio. 2) Entre los 925° a 950° se produce un pico exotérmico donde se pudo haber presentado una liberación de Co ₂ , provocados probablemente por la descomposición de trazas de carbonatos de calcio presentes en la muestra.	1) Entre los puntos B, C y D, se aprecia un descenso gradual progresivo y constante de la curva, provocado el comienzo de los procesos de fusión debido a los procesos de recristalización o transformación de fases (Posible formación de mullita), producto de las partículas del material de tipo arcillo presentes en la muestra de estudio. 2) Entre los 900° a 950° se produce un pico exotérmico donde se pudo haber presentado una liberación de Co ₂ , provocados probablemente por la descomposición de trazas de carbonatos de calcio presentes en la muestra.	1) Entre los puntos B, C y D, se aprecia un descenso gradual progresivo y constante de la curva, provocado el comienzo de los procesos de fusión debido a los procesos de recristalización o transformación de fases (Posible formación de mullita), producto de las partículas del material de tipo arcillo presentes en la muestra de estudio. 2) Entre los 900° a 950° se produce un pico exotérmico donde se pudo haber presentado una liberación de Co ₂ , provocados probablemente por la descomposición de trazas de carbonatos de calcio presentes en la muestra.

Se observaron en las graficas (**Figura 3-9, Figura 3-10 y Figura 3-11**), pérdidas en peso de las muestras del diseño de mezclas planteado en la presente investigación, las cuales

están asociadas a los ajustes de las cantidades de finos y arena de cada uno de los especímenes a los cuales se les realizaron las pruebas térmicas.

3.3 Caracterización de los productos elaborados a partir del diseño de mezcla final

A continuación, se presentan los resultados de la caracterización mecánica de los productos elaborados a partir del análisis inicial de las condiciones del material elaborado en la zona de estudio, frente a las condiciones de trabajo del mismo material bajo situaciones controladas en laboratorio.

3.3.1 Pruebas mecánicas iniciales aplicadas a las muestras del material de la zona en estudio sin modificar bajo condiciones operativas de campo.

Uno de los objetivos principales de la presente investigación es conocer las propiedades asociadas a la resistencia mecánica del material arcilloso de uso industrial presente en la zona en estudio, esto como marco de referencia inicial, con el fin de conocer las condiciones con las cuales las comunidades alfareras del corregimiento de las casitas jurisdicción del municipio de valledupar en el departamento del cesar, ofrecen sus productos derivados de estos materiales explotados en la zona de estudio.

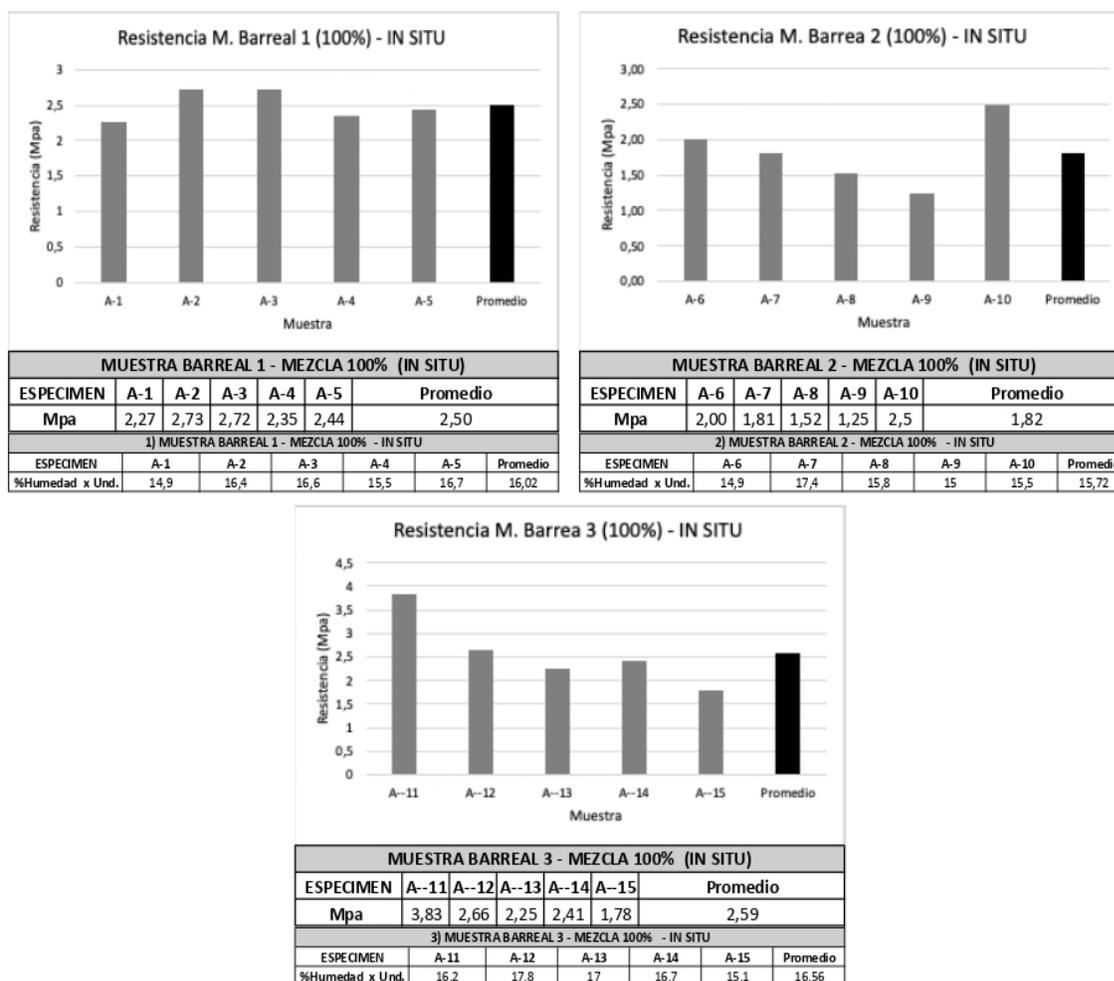
Figura 3-12: (Fecha de color rojo) – Señalización de elementos de prueba elaborados a partir del material de la zona de estudio



Por lo cual se realizarán 5 especímenes muestras (**Tabla 2-1**), por cada frente activo (**Figura 3-12**) dentro del área de estudio de acuerdo a la norma técnica colombiana 4205 (ICONTEC, 2018), para posteriormente realizar los respectivos estudios de resistencia mecánica aplicando ensayos de resistencia uniaxiales o de compresión simple en laboratorio y humedad de los productos finales.

A continuación, se presentan los resultados (**Figura 3-13**) de los ensayos de resistencia mecánica aplicado a los especímenes elaborados a partir de las técnicas tradicionales de los alfareros de la región y los materiales presentes en los diversos frentes activos de la zona en estudio.

Figura 3-13: Resistencias mecánicas iniciales de las muestras de la zona en estudio sin modificar

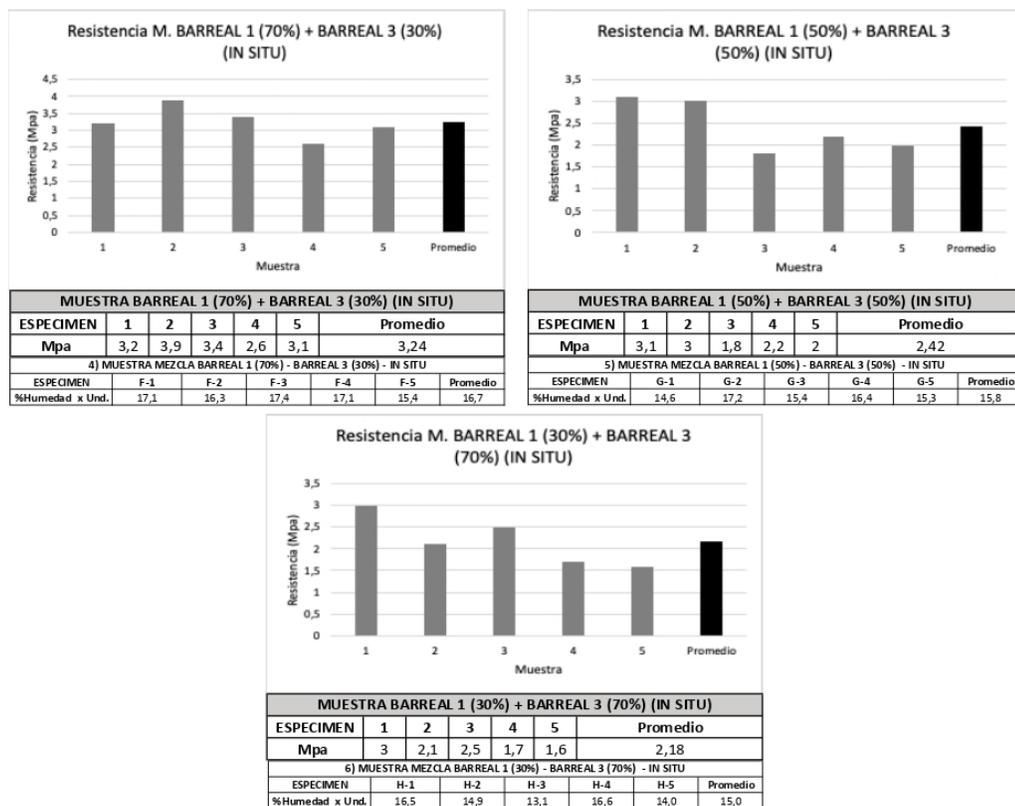


Se observo en los resultados (**Figura 3-13**) de los ensayos de resistencia a la compresión de las muestras de los diversos frentes de explotación activos en la zona de estudio, que los productos elaborados a partir de estos materiales poseen una baja resistencia mecánica en promedio, pero al mismo tiempo los especímenes elaborados poseen ciertas condiciones de absorción y humedad dentro de los valores los minimos requerimientos exigidos por las normas técnicas vigentes en el país.

3.3.2 Pruebas mecánicas elaboradas a partir del diseño de mezcla bajo condiciones operativas de campo

En esta etapa se observaron los resultados de las pruebas de resistencia mecánica de los especímenes elaborados a partir del material seleccionado de la zona estudio (**Figura 3-14**), esto con el fin de llevar una trazabilidad de los resultados de resistencias mecánica obtenidos bajo las condiciones operativas en campo en comparación de las condiciones controladas en laboratorio.

Figura 3-14: Resistencias mecánicas de las muestras elaboradas a partir de los diseños de mezcla bajo condiciones operativas de campo



En las pruebas de resistencia mecánicas de los especímenes elaborados a partir del material seleccionado para la evaluación del diseño de mezcla propuesto bajo condiciones operativas de campo, se observó un aumento en las propiedades de dureza de los elementos de prueba, en comparación con los especímenes elaborados a partir de las muestras sin alteraciones ni modificaciones de los tres frentes de explotación activados presentes en la zona de estudio, además de mostrar una disminución en los porcentajes de humedad y absorción, posiblemente producidos por el ajuste en los porcentajes de arena y de material fino presentes en la nueva composición de los especímenes elaborados a partir del diseño de mezclas planteado.

3.3.3 Pruebas mecánicas del material de la zona en estudio bajo condiciones controladas en laboratorio

Una vez se realizó la caracterización inicial para determinar la resistencia mecánica de las muestras modificadas mediante los diseños de mezcla planteados y sin modificar bajo las condiciones operativas de campo, se procedió a realizar el estudio de las resistencias mecánicas de los materiales utilizados en campo para la realización de ladrillos, bajo condiciones de control de temperatura en laboratorio, estas pruebas se desarrollaron en el laboratorio de pyrometalurgia del instituto de minerales CIMEX de la Universidad Nacional De Colombia – Sede Medellín.

■ Cronogramas y rampas de cocción de los especímenes en estudio bajo condiciones de control en laboratorio

A continuación, se presentan las (Figura 3-15, Figura 3-16 y Figura 3-17), asociadas a los cronogramas y rampas de cocción de los especímenes de estudio bajo condiciones de control de temperatura en laboratorio.

Figura 3-15: Cronograma y rampa de cocción de las muestras a 600°C

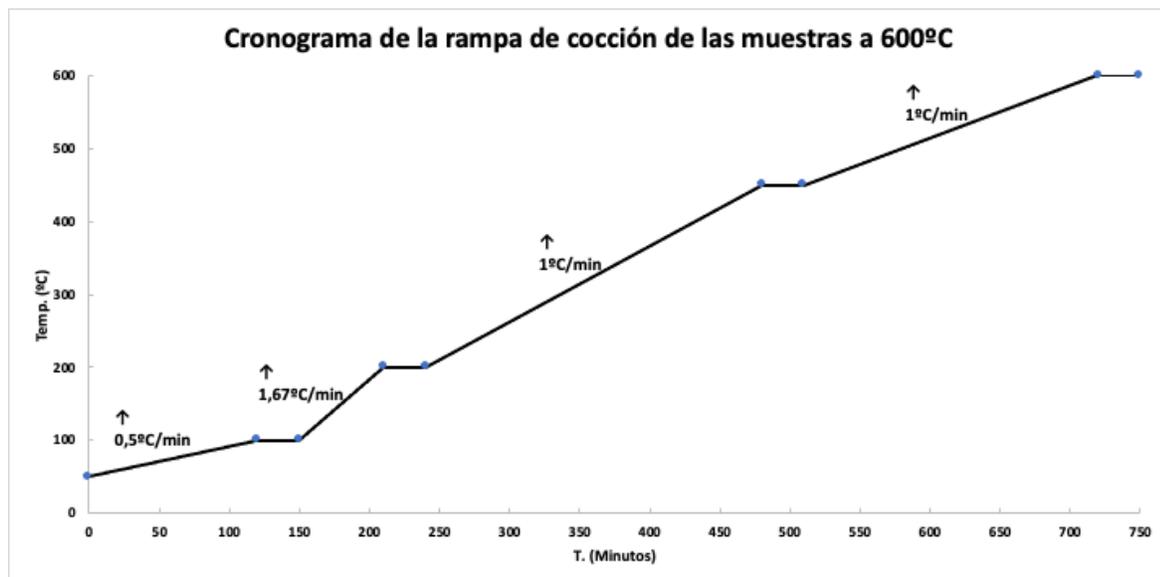


Figura 3-16: Cronograma y rampa de cocción de las muestras a 800°C

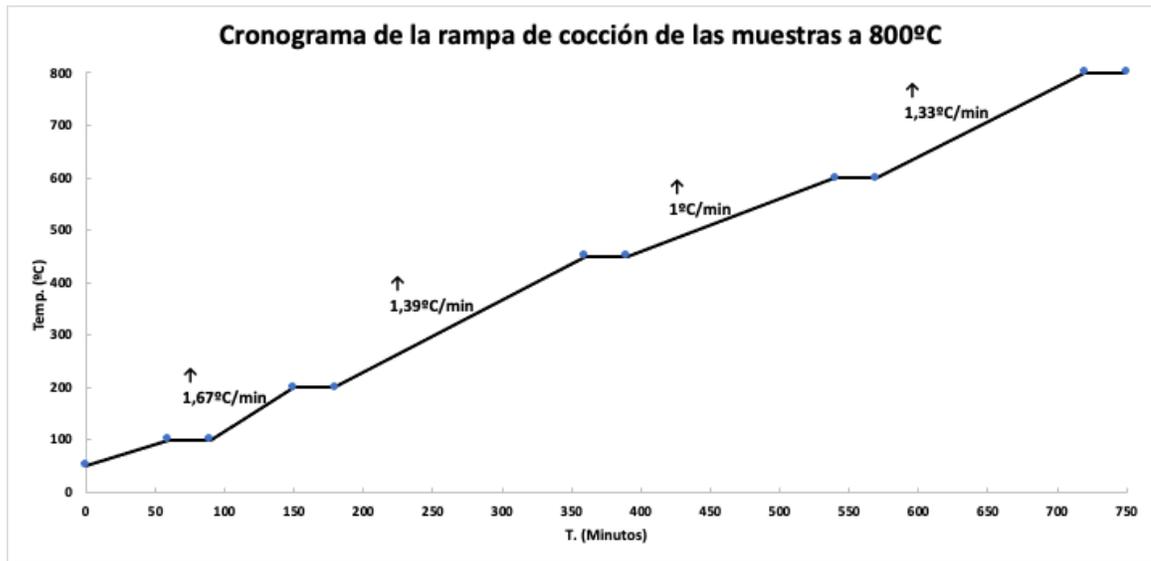
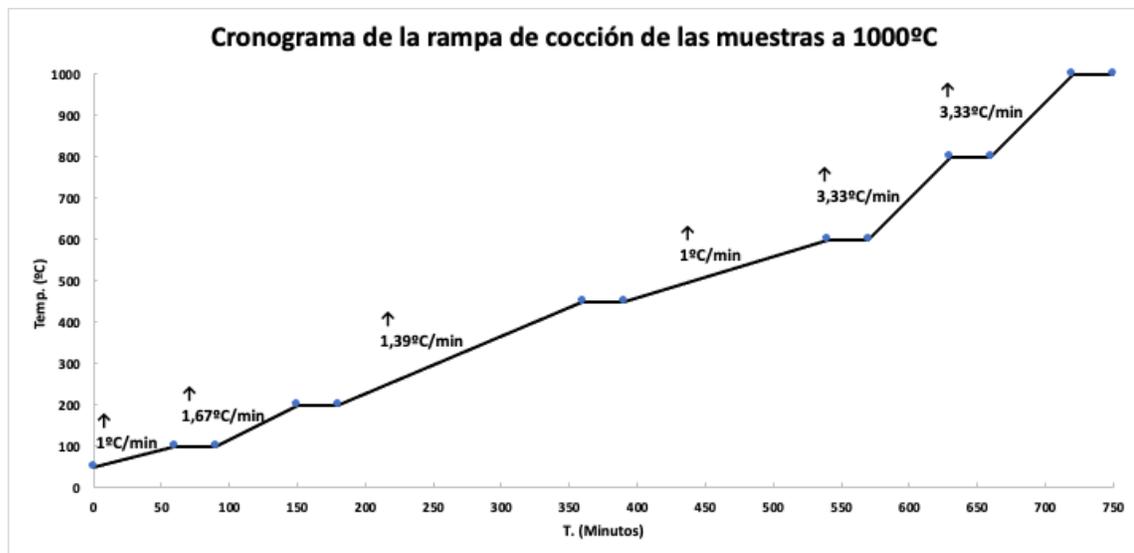


Figura 3-17: Cronograma y rampa de cocción de las muestras a 1000°C



El cronograma y las rampas de cocción se generó a partir del análisis térmico realizado mediante los ensayos termogravimétricos (TGA) y termodiferenciales (DSC), aplicado a todos los especímenes en estudio bajo condiciones controladas en laboratorio (**Tabla 2-1**), teniendo especial cuidado en los momentos donde se puedan presentar cambios termodinámicos significativos que pudiesen afectar las condiciones de las muestras en estudio, esto con el fin de garantizar procesos óptimos de sinterización, que posteriormente permitan observar el comportamiento mecánico de los especímenes en estudio con respecto a los cambios de temperatura aplicados durante las etapas de cocción.

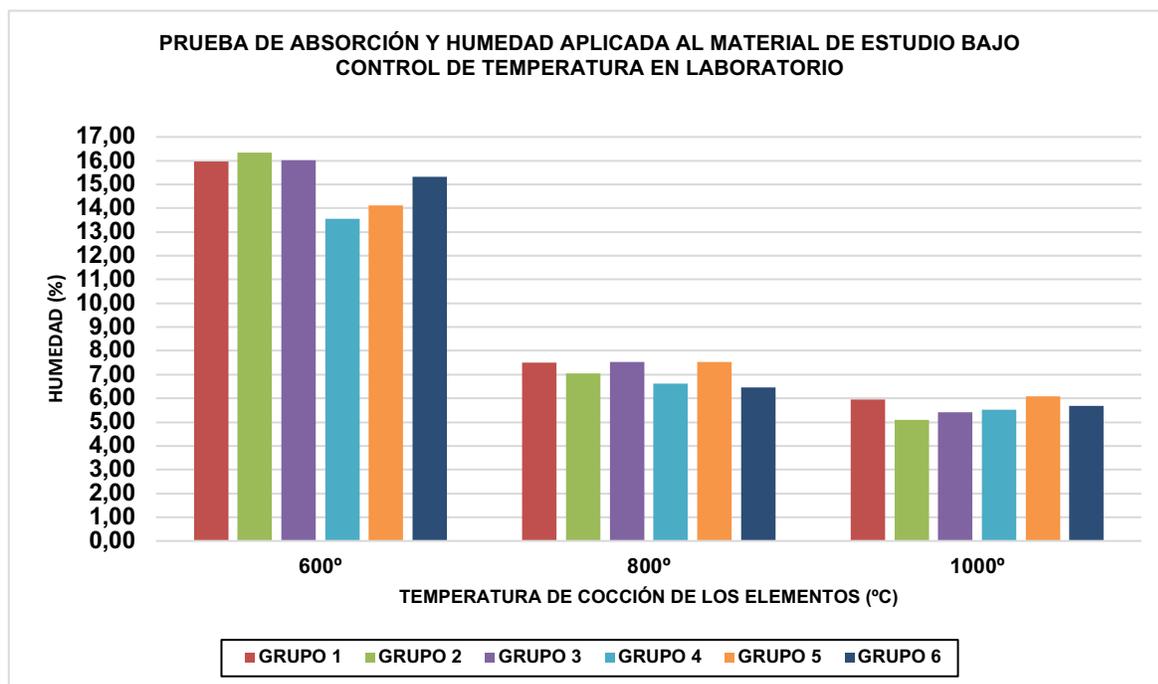
■ Pruebas de humedad y absorción del material de la zona en estudio bajo condiciones controladas en laboratorio

Mediante la (Tabla 3-10) se observa el la variación de la absorción y humedad de los especímenes de prueba elaborados a partir del material en estudio.

Tabla 3-10: Clasificación por grupos de las muestras procesadas para la determinación de condiciones de humedad y absorción de agua bajo condiciones de temperatura controladas en laboratorio

PROCESO APLICADO	GRUPO DE PROCESAMIENTO	MUESTRA	HUM. PROM (%)
PRUEBA DE ABSORCIÓN Y HUMEDAD APLICADA AL MATERIAL DE ESTUDIO BAJO CONTROL DE TEMPERATURA EN LABORATORIO	GRUPO 1	BARREAL 1 - MEZCLA 100% - 600° (LABORATORIO)	15,96
		BARREAL 1 - MEZCLA 100% - 800° (LABORATORIO)	7,52
		BARREAL 1 - MEZCLA 100% - 1000° (LABORATORIO)	5,95
	GRUPO 2	BARREAL 2 - MEZCLA 100% - 600° (LABORATORIO)	16,35
		BARREAL 2 - MEZCLA 100% - 800° (LABORATORIO)	7,05
		BARREAL 2 - MEZCLA 100% - 1000° (LABORATORIO)	5,08
	GRUPO 3	BARREAL 3 - MEZCLA 100% - 600° (LABORATORIO)	16,02
		BARREAL 2 - MEZCLA 100% - 800° (LABORATORIO)	7,54
		BARREAL 3 - MEZCLA 100% - 1000° (LABORATORIO)	5,42
	GRUPO 4	BARREAL 1 (70%) + BARREAL 3 (30%) - 600° (LABORATORIO)	13,56
		BARREAL 1 (70%) + BARREAL 3 (30%) - 800° (LABORATORIO)	6,62
		BARREAL 1 (70%) + BARREAL 3 (30%) - 1000° (LABORATORIO)	5,52
	GRUPO 5	BARREAL 1 (50%) + BARREAL 3 (50%) - 600° (LABORATORIO)	14,12
		BARREAL 1 (50%) + BARREAL 3 (50%) - 800° (LABORATORIO)	7,54
		BARREAL 1 (50%) + BARREAL 3 (50%) - 1000° (LABORATORIO)	6,09
	GRUPO 6	BARREAL 1 (30%) + BARREAL 3 (70%) - 600° (LABORATORIO)	15,32
		BARREAL 1 (30%) + BARREAL 3 (70%) - 800° (LABORATORIO)	6,47
		BARREAL 1 (30%) + BARREAL 3 (70%) - 1000° (LABORATORIO)	5,69

Figura 3-18: Porcentajes de humedad promedio de las muestras procesadas bajo condiciones de temperatura controladas en laboratorio



Se observó en la (Figura 3-18) la variación de los porcentajes de absorción y humedad promedio de los especímenes de estudio, con respecto a los cambios de temperaturas controlados en laboratorio. Estos cambios de absorción y humedad presentes en elementos en estudio muestran una diferencia considerable entre las temperaturas de 600° a 800°, ya que durante estos rangos de temperatura comienzan a apreciarse los procesos de contracción y sinterización más fuertes en todas las muestras en estudio, mientras que en el rango de 1000° se siguen presentando cambios pero en menor proporción que en los anteriores rangos de temperatura, validando los resultados (Tabla 3-4 y Tabla 3-9) de los análisis térmico efectuado a todos los grupos de las muestras en estudio.

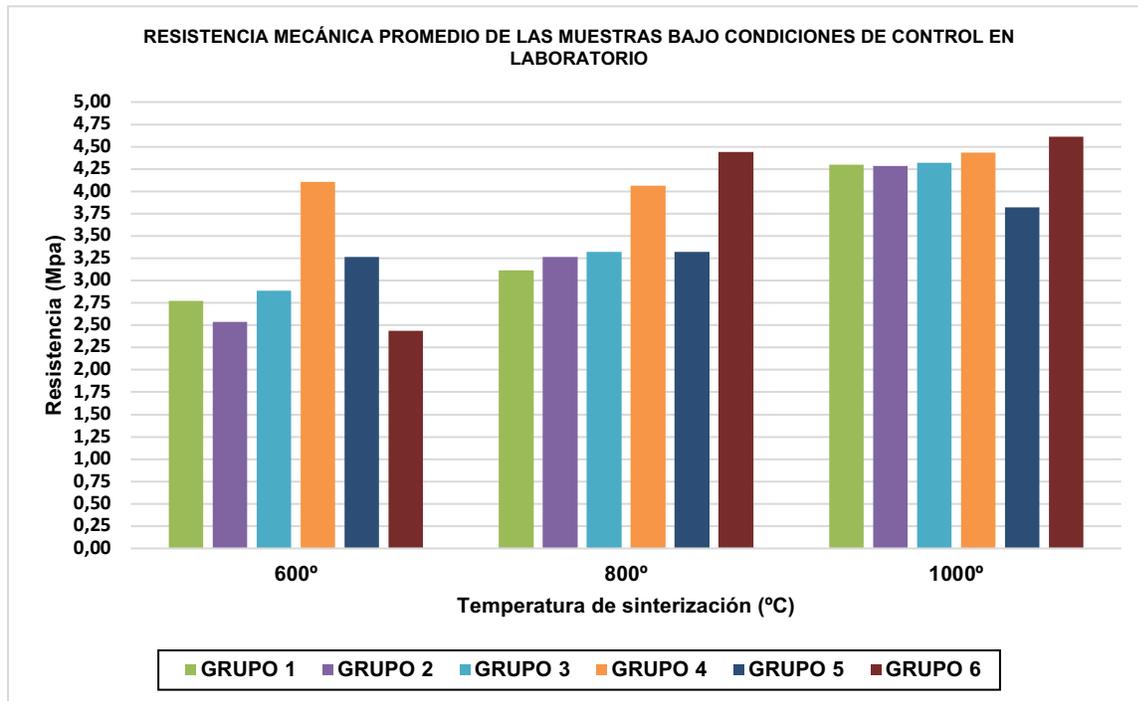
▪ **Pruebas mecánica aplicadas al material de la zona en estudio bajo condiciones controladas en laboratorio**

Para el análisis de las pruebas mecánicas aplicadas al material de la zona en estudio bajo condiciones de temperatura controladas en laboratorio, se implementó la siguiente tabla (Tabla 3-10) con el fin de clasificar por grupos a cada una de las muestras procesadas en laboratorio (Tabla 2-1), y de esta manera poder examinar la resistencia mecánica en promedio de cada uno de los grupos de muestras en estudio.

Tabla 3-11: Clasificación por grupos de las muestras procesadas bajo condiciones de temperatura controladas en laboratorio

PROCESO APLICADO	GRUPO DE PROCESAMIENTO	MUESTRA	F' C PROM
PRUEBA DE RESISTENCIA MECÁNICA APLICADAS AL MATERIAL DE ESTUDIO BAJO CONTROL DE TEMPERATURA EN LABORATORIO	GRUPO 1	BARREAL 1 - MEZCLA 100% - 600° (LABORATORIO)	2,77
		BARREAL 1 - MEZCLA 100% - 800° (LABORATORIO)	3,11
		BARREAL 1 - MEZCLA 100% - 1000° (LABORATORIO)	4,30
	GRUPO 2	BARREAL 2 - MEZCLA 100% - 600° (LABORATORIO)	2,54
		BARREAL 2 - MEZCLA 100% - 800° (LABORATORIO)	3,26
		BARREAL 2 - MEZCLA 100% - 1000° (LABORATORIO)	4,29
	GRUPO 3	BARREAL 3 - MEZCLA 100% - 600° (LABORATORIO)	2,89
		BARREAL 2 - MEZCLA 100% - 800° (LABORATORIO)	3,26
		BARREAL 3 - MEZCLA 100% - 1000° (LABORATORIO)	4,32
	GRUPO 4	BARREAL 1 (70%) + BARREAL 3 (30%) - 600° (LABORATORIO)	4,11
		BARREAL 1 (70%) + BARREAL 3 (30%) - 800° (LABORATORIO)	4,06
		BARREAL 1 (70%) + BARREAL 3 (30%) - 1000° (LABORATORIO)	4,43
	GRUPO 5	BARREAL 1 (50%) + BARREAL 3 (50%) - 600° (LABORATORIO)	3,26
		BARREAL 1 (50%) + BARREAL 3 (50%) - 800° (LABORATORIO)	3,32
		BARREAL 1 (30%) + BARREAL 3 (70%) - 800° (LABORATORIO)	4,44
	GRUPO 6	BARREAL 1 (30%) + BARREAL 3 (70%) - 600° (LABORATORIO)	2,44
		BARREAL 1 (30%) + BARREAL 3 (70%) - 800° (LABORATORIO)	4,44
		BARREAL 1 (30%) + BARREAL 3 (70%) - 1000° (LABORATORIO)	4,61

Figura 3-19: Resistencia a la compresión promedio de las muestras procesadas bajo condiciones de temperatura controladas en laboratorio



Mediante el análisis de la (**Figura 3-19**), se observó una variación significativa de las resistencias mecánicas de los especímenes de prueba elaborados a partir de las muestras seleccionadas de la zona en estudio, este aumento en la resistencia mecánica se encuentra asociado a los posibles cambios cristalográficos generados en la estructura interna de estos materiales durante los procesos de sinterización controlados en laboratorio, en donde todos los grupos de estudio obtuvieron sus máximos valores de resistencia mecánica a temperaturas de cocción de 1000°C, siendo este último el rango de temperatura el óptimo para lograr el aumento de las resistencias mecánicas de todos los grupos estudiados.

4. Discusión general

El análisis del desempeño mecánico de mineral de uso industrial en zonas comunitarias mineras del municipio de Valledupar, se realizó a partir de las caracterizaciones fisicoquímicas, térmicas y mecánicas de los materiales presentes en la zona de estudio, los cuales son aspectos de vital importancia dentro de los procesos efectuados en la industria cerámica coincidiendo con los aportes científicos realizados por parte de (Duque et al., 2016; Galindo, 2017; García, E. y Suárez, 2003; García, 1997; Prieto R. et al., 2019).

Durante la caracterización inicial de los materiales en estudio, se observó (**Tabla 3-5** y **Tabla 3-6**) una notable variación en la distribución de los tamaños de partículas presentes en las muestras obtenidas de los diversos frentes de explotación activos en la zona de estudio, marcando una relación entre la variación de los tamaños de las partículas presentes en las muestras estudiadas y algunas propiedades del material como los porcentajes de humedad, límites de consistencia y plasticidad, posiblemente generados por la presencia en diversas proporciones de minerales primarios como el cuarzo y los feldespatos dentro de la composición de estas muestras (**Tabla 3-3**), y que de acuerdo con (Espitia et al., 2003; Galindo, 2017; García, E. y Suárez, 2003; García Verduch, 1985a), la presencia de estos minerales en diversas proporciones dentro de los materiales arcillosos hacen que varíen algunas propiedades de los materiales asociados con la absorción del agua, plasticidad y de contracciones lineales a bajas temperaturas.

Dentro del análisis de las propiedades y características de los materiales arcillosos en estudio, se observó la influencia que tiene la composición química (**Tabla 3-1**) y mineralógica (**Tabla 3-3**) de estas muestras sobre algunas propiedades y características asociadas a su estabilidad y comportamiento térmico, en donde se identificaron minerales como el cuarzo, ortoclasas, moscovitas y illitas, que a su vez se encuentran compuestos por los elementos químicos tales como hierro, magnesio, potasio, aluminio y sílice, los

cuales favorecieron a la estabilidad, compacidad, velocidad en la formación de las fases vítreas importantes en las arcillas como la mullita y en la disminución de las temperaturas de fusión durante los procesos de cocción efectuados durante esta investigación (**Tabla 3-4** y **Tabla 3-9**), resultados acordes con las investigaciones en minerales de tipo arcilloso realizadas por (Espitia et al., 2003; Galindo, 2017; Garcia Verduch, 1985b).

Una vez realizados los estudios primarios de caracterización fisicoquímicos, térmicos y mecánicos para determinar las propiedades de los materiales estudiados como marco de referencia inicial, se realizó la evaluación de un diseño de mezclas entre las muestras (*Barreal 1* y *Barreal 3*), las cuales presentaron en promedio mejores características en su distribución granulométrica, límites de consistencia, plasticidad, estabilidad térmica, composición química elemental y mineralógica, con el fin de mejorar las características asociadas a la resistencia mecánica de las muestras, en donde se observó (**Tabla 3-11**) un aumento significativo de las resistencias mecánicas promedio de las muestras elaboradas a partir de la implementación de estos diseños de mezcla en laboratorio con relación a los especímenes elaborados (**Figura 3-13**) a partir del material de la zona en estudio sin ninguna modificación, en concordancia con las investigaciones realizadas en minerales de composición arcillosa y sus variaciones por (Galindo, 2017).

Además de comparar los resultados de la resistencia mecánica iniciales entre las muestras de la zona de estudio sin ninguna modificación frente a las elaboradas a partir del diseño de mezcla propuesto, se analizó el comportamiento mecánico de las muestras (**Tabla 3-11**) bajo condiciones de temperatura controladas en laboratorio, con el fin de observar la variación de la resistencia mecánica frente a los cambios de temperatura a los cuales pueden ser sometidos estos materiales en procesos escalados a nivel industrial, obteniendo como resultados una mejora significativa en la resistencia mecánica y una disminución de la absorción de humedad de los materiales elaborados a medida que se aumentaba la temperatura de cocción, posiblemente generados durante las distintas etapas de sinterización, dando como resultados cambios de la superficie total, contracciones de volumen y por consiguiente un aumento de la resistencia mecánica, validando los resultados obtenidos con las investigaciones realizadas por (Gippini, 1966).

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

Durante la ejecución del análisis del desempeño mecánico de mineral de uso industrial en zonas comunitarias mineras del municipio de Valledupar, se implementaron diferentes técnicas de caracterización fisicoquímicas, térmicas y mecánicas, mediante las cuales se obtuvieron algunos datos de tipo cuantitativo y cualitativo, que permitieron entender algunos fenómenos generados durante los procesos efectuados a las muestras de estudio, logrando obtener las siguientes conclusiones:

- Mediante los análisis de distribución de tamaño de partículas efectuado en las muestras en estudio (**Tabla 3-5** y **Tabla 3-6**), se logró comprobar el efecto desgrasante que tienen los minerales primarios como el cuarzo y los feldespatos en proporciones de más del 35% dentro de la composición del material en forma de arenas y de 1,5% en forma de gravas, y su impacto en las propiedades asociadas a la plasticidad de estos materiales.
- El análisis químico realizado a través de la técnica de fluorescencia de rayos X (*FRX*), muestra en mayor porcentaje (>65%) la presencia de los elementos (*Al*) aluminio, (*Si*) silicio, que en forma de óxido forman (*Al₂O₃*) alúmina y (*SiO₂*) sílice, mientras que el (35%) restante corresponde a los elementos químicos (*Fe, Ti, Mn, Ca, K, Cl, P* y *Mg*).
- La presencia de los elementos químicos (*Fe, Mg, K*) en las muestras de estudio (**Tabla 3-1** y **Tabla 3-7**), favorecen en la aceleración de las velocidades de formación de las fases vítreas de interés en los materiales de composición arcillosa, el cual ayuda a reducir el consumo energético durante los procesos de cocción y sinterización, mientras que los elementos químicos como el (*Si*) silicio ayudan a mejorar la compactación de las pastas, disminuir la absorción de agua y las contracciones de los materiales crudos elaborados a partir de las muestras de la zona en estudio.

- En la caracterización mineralógica realizada a través de la técnica de difracción de rayos X (*DRX*), se evidenció la presencia de varios tipos de especies minerales de interés (**Tabla 3-3**), destacando a las illitas, moscovitas y ortoclasas, las cuales se caracterizan por presentar rápidas formaciones vítreas, producidas por sus bajas temperaturas de fusión y que generan productos finales con buenas resistencias mecánicas en comparación con otros productos de composición arcillosa.
- Los análisis térmicos realizados mediante los ensayos termogravimétricos y termodiferenciales aplicados a las muestras en estudio (**Tabla 3-4** y **Tabla 3-9**), permitieron observar los cambios que sufren los materiales frente a los diversos cambios de temperatura empleados, donde se apreciaron las pérdidas de agua superficial entre los 50° y 250° C y los procesos de pérdida de agua por deshidroxilación entre los 450° y 650°, además de apreciar los procesos en cuanto a la pérdida de masa de estos materiales (7% máximo), posiblemente provocados por las pérdidas de agua de composición, procesos de calcinación y descomposición de materia orgánica presentes en las muestras.
- La evaluación de los diseños de mezcla elaborados a partir de las muestras (*Barreal 1* y *Barreal 3*), las cuales permitieron establecer dosificaciones en peso óptimas a partir de las proporciones (70%-30%, 50%-50% y 30%-70%), con el fin de ajustar y mejorar las características del material asociadas a sus distribuciones de tamaños de partículas, propiedades de consistencia, plasticidad, composiciones químicas elementales y sus características térmicas en comparación con las muestras sin alteraciones ni modificaciones de la zona de estudio.
- A través de los ensayos de resistencia mecánica aplicados a los especímenes de prueba en estudio (**Tabla 3-11**), se logró observar la incidencia del aumento de la temperatura de cocción sobre la resistencia mecánica de los especímenes en estudio, siendo la temperatura una variable fundamental dentro de los procesos morfológicos debido a la formación de piezas más densas a partir de estos materiales arcillosos, y que se comprueban además mediante la disminución de los porcentajes de absorción de los especímenes a medida que se aumenta la temperatura de sinterización.
- Mediante la implementación de un diseño de mezcla, se pudieron mejorar algunas características del material asociadas a la granulometría y plasticidad del material, que permitirían mejorar la composición y conformación de los productos elaborados

por los alfareros en la zona de estudio, y de esta manera aumentar la resistencia mecánica de estos productos, con el fin de garantizar ladrillos de mejor calidad en comparación con los productos actualmente elaborados en los frentes de explotación activos.

5.2 Recomendaciones

Para futuros trabajos asociados a la temática de estudio de la presente investigación se recomienda:

- Estudiar los procesos de conformación, extrusión, secado y maduración de las muestras en la zona en estudio.
- Estudiar la implementación de procesos mineralógicos aplicados al beneficio de los minerales arcillosos de uso industrial presentes en la zona en estudio.
- Analizar el comportamiento mecánico de los materiales elaborados, en función de la disminución de los tamaños de las partículas que componen las muestras presentes en los yacimientos activos de la zona en estudio.
- Implementar estudios acerca del comportamiento reológico de las mezclas, con el fin de comprender el fenómeno asociados a la tixotropía de las pastas elaboradas a partir de los materiales en estudio, en función de su composición y las temperaturas de cocción aplicadas.

Bibliografía

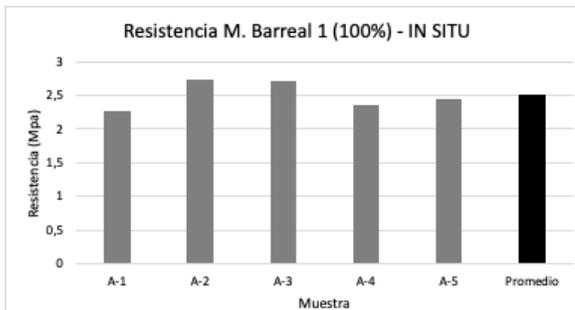
- ALBELLA, J. M., CINTAS, A. M., MIRANDA, T., & SERRATOSA, J. M. (1993).
INTRODUCCION A LA CIENCIA DE LA ENERGIA. In C.S.I.C. C.S.I.C.
- Bernal, I., Cabezas, H., Espitia, C., Mojica, J., & Quintero, J. (2003). Análisis próximo de arcillas para cerámica. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 27(105), 569–578.
- Besoain, E. (1985). *Mineralogía de arcillas del suelo* (60th ed.). Centro Iberoamericano de documentación e información agrícola.
- Braja M. Das. (2013). *Fundamentals of Geotechnical Engineering* (4th ed.). Cengage Learning. <http://latinoamerica.cengage.com>
- Cantor, B. (2020). Bragg's Law. In *The Equations of Materials* (pp. 24–44).
<https://doi.org/10.1093/oso/9780198851875.003.0002>
- Casagrande, A. (1932). Research on the Atterberg Limits of Soils. *Public Roads*, 13(8), 121–136.
- Duque, E., Potes, G., & Escobar Enrique, C. (2016). Geomecánica. In U. N. De Colombia (Ed.), *Geomecánica - Capítulo 4*. Universidad Nacional De Colombia.
<http://bdigital.unal.edu.co/1864/>
- Espitia, C., Quintero, J., Rodríguez, A. Bernal, Romero, F., & F. Mojica, J. (2003).
CATÁLOGO DE PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y MINERALÓGICAS DE LAS ARCILLAS PARA CERÁMICA ROJA EN LOS CENTROS URBANOS DE MEDELLÍN, IBAGUÉ Y SABANA DE BOGOTÁ.
<https://recordcenter.sgc.gov.co/B3/12009000002741/Documento/Pdf/0101027411101000.PDF>
- Ferrer, L. (1964). Resistencia de los materiales cerámicos a los cambios bruscos de temperatura. *Boletín de La Sociedad Espanola de Ceramica y Vidrio*, 3(6), 6.
<http://boletines.secv.es/upload/196403603.pdf>
- Galindo, R. (2017). *Influencia de la composición mineralógica en el comportamiento en la cocción*. Influencia de La Composición Mineralógica En El Comportamiento En La

- Cocción. http://rafagalindoceramica.com/wp-content/uploads/2020/04/Influencia_composici3n_mineralogica.pdf
- García, E. y Suárez, M. (2003). *Las arcillas, propiedades y usos*. Universidad Complutense.
- García, C. P. G. (1997). *ALGUNOS ANÁLISIS FÍSICO - QUÍMICOS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LOS MINERALES COMPONENTES DE UNA ARCILLA* (p. 33). Universidad Nacional De Colombia.
- García Verduch, A. (1985a). Origen y composición de las arcillas cerámicas. *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*.
- García Verduch, A. (1985b). Origen y composición de las arcillas cerámicas. *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr.*, 24(6), 395–404. <http://boletines.secv.es/upload/198524395.pdf>
- Gippini, E. (1966). Transformaciones en la cocción. *Materiales de Construcción*, 16(124), 17–30. <https://doi.org/10.3989/mc.1966.v16.i124.1696>
- ICONTEC. (2018). NTC 4205. Ingeniería civil y arquitectura. Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos. *Norma Técnica Colombiana*, 14.
- JIMENEZ SALAS, J. A., DE JUSTO ALPAÑES, J. L. (1975). “*Geotécnica y Cimientos*”. Vol. I. “*Propiedades de los Suelos y de las Rocas*.” (Rueda (ed.); 2nd ed.).
- Madrid, U. P. (2012). *Filosilicatos*. En *Manual de mineralogía y petrología. Guía interactiva de minerales y rocas*. UNIDAD DOCENTE DE EDAFOLOGÍA Y ECOLOGÍA. <http://www2.montes.upm.es/dptos/dsrn/edafologia/aplicaciones/gimr/Manual/1ndiceFrame.html>
- Melendez, B., & Fuster, J. M. (2003). *Geología* (PARANINFO (ed.); 3rd ed.).
- Meunier, A. (2005). Clays. *Clays*, 1–472. <https://doi.org/10.1007/B138672>
- Núñez, A. (1987). *Recursos minerales de Colombia*. Servicio Geológico Colombiano.
- Prieto R., G., Guatame, C. L., & Cárdenas, S. C. (comps). (2019). Recursos minerales de Colombia Vol 1. In *Servicio Geológico Colombiano*. <https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/NoSeriadadas/Documents/recursos-minerales-de-colombia-vol-1.pdf>
- Ricardo, M., García-León, A., Flórez Solano, E., Carlos, P., & Peñaloza, A. (2018). CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE MEZCLAS DE ARCILLAS UTILIZADAS EN LA FABRICACIÓN DE PRODUCTOS DE MAMPOSTERÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN. *REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGIAS DE AVANZADA*

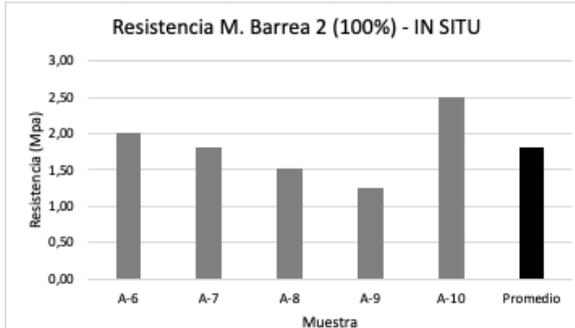
-
- (*RCTA*), 1(31), 22–30. <https://doi.org/10.24054/16927257.V31.N31.2018.2760>
- Rigaku Global. (2020). *Teoría de la fluorescencia de rayos X (XRF)*.
<https://www.rigaku.com/es/techniques/x-ray-fluorescence-xrf>
- Sembenelli, P. (1966). Los límites de Atterberg y su significado en la industria cerámica y ladrillera. *Materiales de Construcción*, 16(124), 5–14.
<https://doi.org/10.3989/mc.1966.v16.i124.1695>
- Skoog, D., Crouch, S. R., Holler, F. J., & Anzures, M. B. (2008). *Principios de Análisis Instrumental - 5 Edición (Spanish Edition)*. 1080. citeulike-article-id:5663771%5Cn<http://www.amazon.ca/exec/obidos/redirect?tag=citeulike09-20&path=ASIN/8448127757>
- Thorez, J. (2005). *Practical XRD analysis of clay minerals*. Universite de Liege.

Anexos

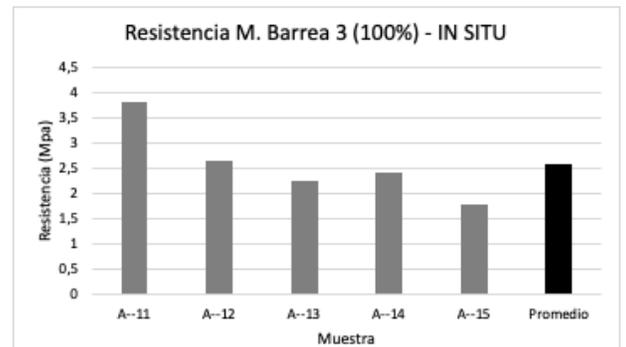
A. Tablas de resistencias mecánicas de los elementos de prueba



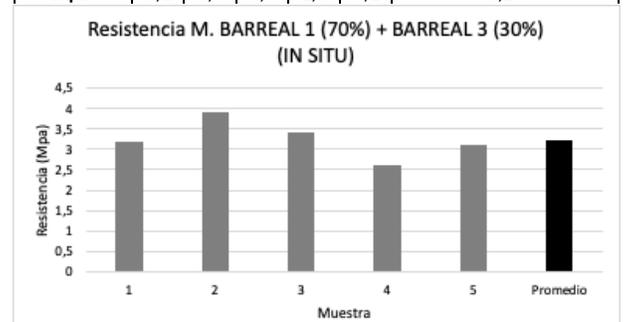
MUESTRA BARREAL 1 - MEZCLA 100% (IN SITU)						
ESPECIMEN	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	Promedio
Mpa	2,27	2,73	2,72	2,35	2,44	2,50



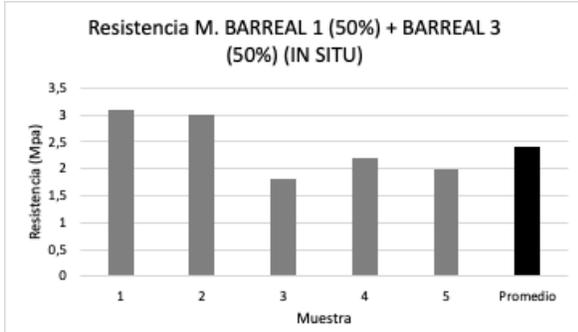
MUESTRA BARREAL 2 - MEZCLA 100% (IN SITU)						
ESPECIMEN	A-6	A-7	A-8	A-9	A-10	Promedio
Mpa	2,00	1,81	1,52	1,25	2,5	1,82



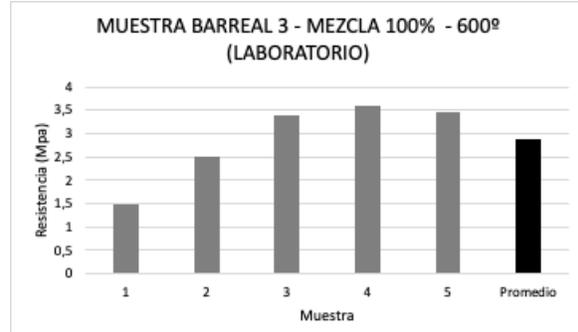
MUESTRA BARREAL 1 (70%) + BARREAL 3 (30%) (IN SITU)						
ESPECIMEN	1	2	3	4	5	Promedio
Mpa	3,2	3,9	3,4	2,6	3,1	3,24



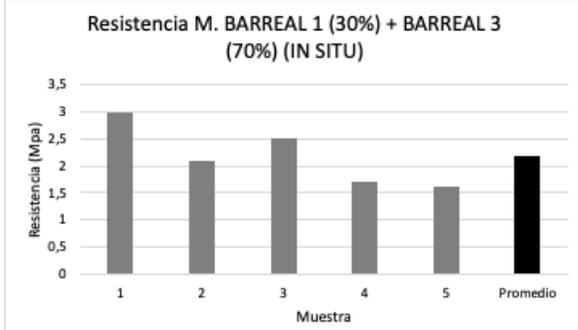
MUESTRA BARREAL 1 (70%) + BARREAL 3 (30%) (IN SITU)						
ESPECIMEN	1	2	3	4	5	Promedio
Mpa	3,2	3,9	3,4	2,6	3,1	3,24



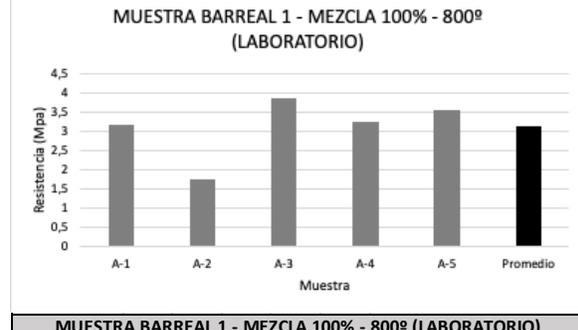
MUESTRA BARREAL 1 (50%) + BARREAL 3 (50%) (IN SITU)						
ESPECIMEN	1	2	3	4	5	Promedio
Mpa	3,1	3	1,8	2,2	2	2,42



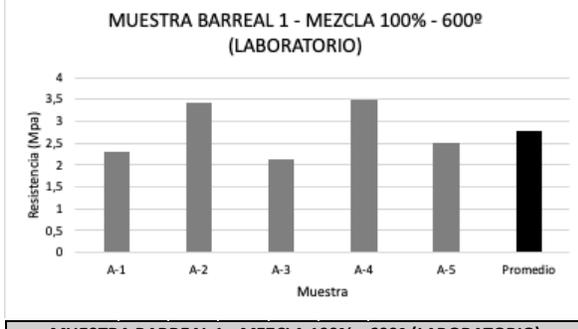
MUESTRA BARREAL 3 - MEZCLA 100% - 600º (LABORATORIO)						
ESPECIMEN	1	2	3	4	5	Promedio
Mpa	1,5	2,5	3,4	3,6	3,45	2,89



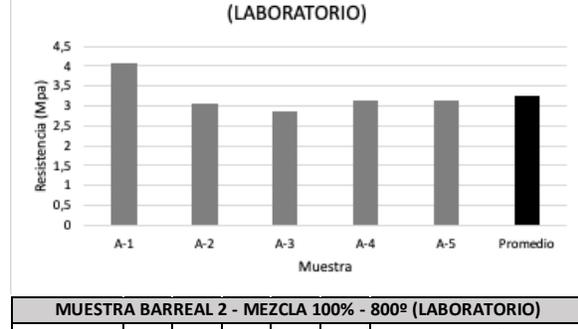
MUESTRA BARREAL 1 (30%) + BARREAL 3 (70%) (IN SITU)						
ESPECIMEN	1	2	3	4	5	Promedio
Mpa	3	2,1	2,5	1,7	1,6	2,18



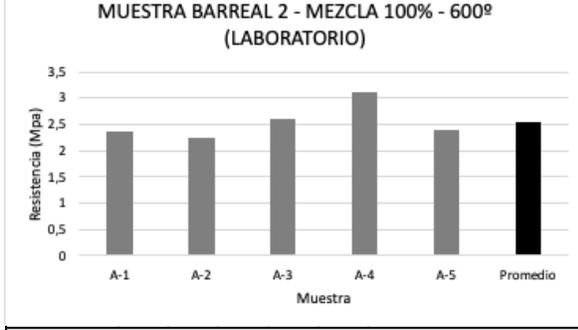
MUESTRA BARREAL 1 - MEZCLA 100% - 800º (LABORATORIO)						
ESPECIMEN	1	2	3	4	5	Promedio
Mpa	3,17	1,74	3,84	3,25	3,56	3,11



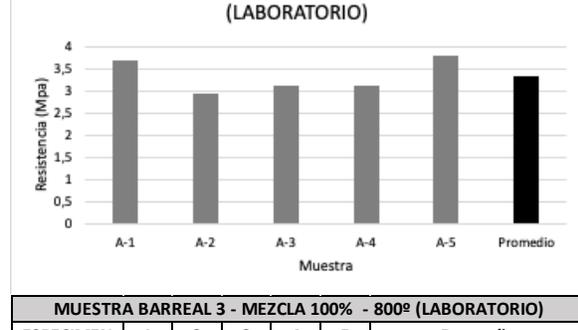
MUESTRA BARREAL 1 - MEZCLA 100% - 600º (LABORATORIO)						
ESPECIMEN	1	2	3	4	5	Promedio
Mpa	2,3	3,42	2,13	3,5	2,5	2,77



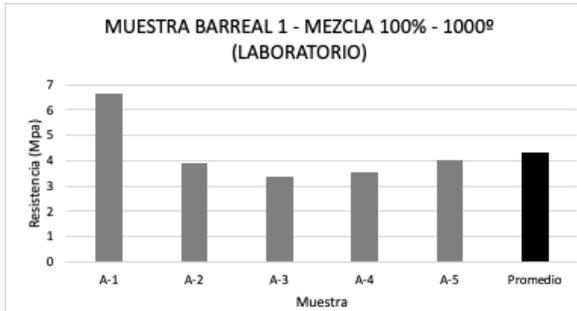
MUESTRA BARREAL 2 - MEZCLA 100% - 800º (LABORATORIO)						
ESPECIMEN	1	2	3	4	5	Promedio
Mpa	4,09	3,07	2,88	3,15	3,12	3,26



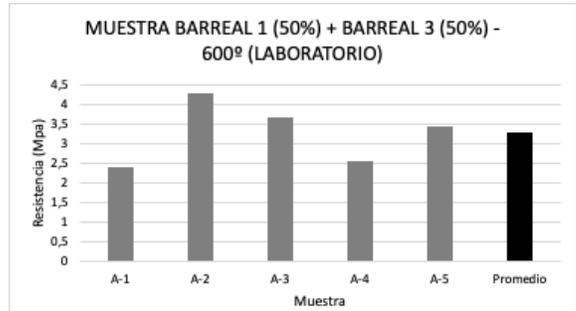
MUESTRA BARREAL 2 - MEZCLA 100% - 600º (LABORATORIO)						
ESPECIMEN	1	2	3	4	5	Promedio
Mpa	2,35	2,23	2,6	3,12	2,4	2,54



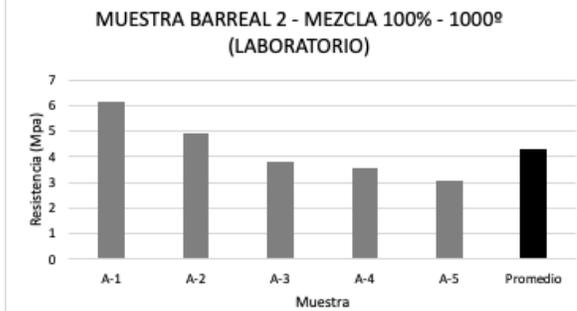
MUESTRA BARREAL 3 - MEZCLA 100% - 800º (LABORATORIO)						
ESPECIMEN	1	2	3	4	5	Promedio
Mpa	3,67	2,93	3,12	3,1	3,78	3,32



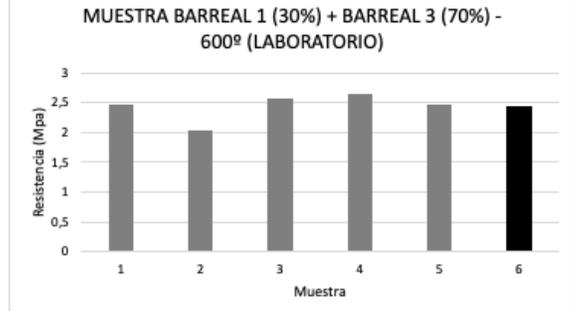
MUESTRA BARREAL 1 - MEZCLA 100% - 1000º (LABORATORIO)						
ESPECIMEN	1	2	3	4	5	Promedio
Mpa	6,63	3,88	3,37	3,56	4,05	4,30



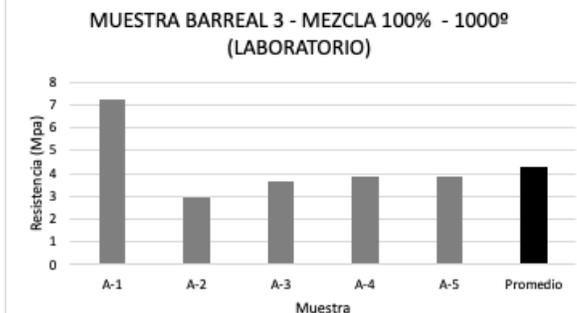
MUESTRA BARREAL 1 (50%) + BARREAL 3 (50%) - 600º (LABORATORIO)						
ESPECIMEN	1	2	3	4	5	Promedio
Mpa	2,4	4,27	3,65	2,56	3,43	3,26



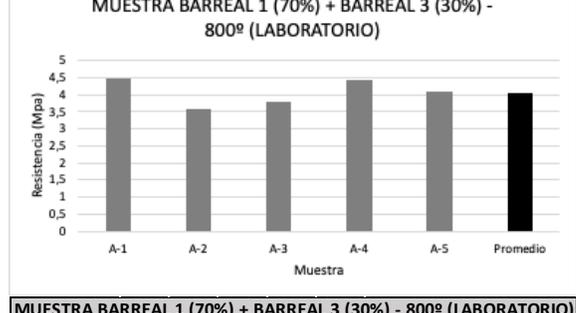
MUESTRA BARREAL 2 - MEZCLA 100% - 1000º (LABORATORIO)						
ESPECIMEN	1	2	3	4	5	Promedio
Mpa	6,13	4,93	3,78	3,54	3,05	4,29



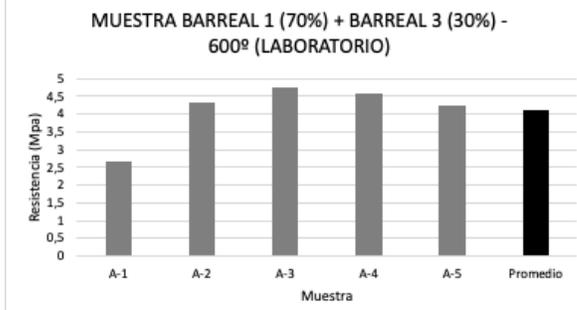
MUESTRA BARREAL 1 (30%) + BARREAL 3 (70%) - 600º (LABORATORIO)						
ESPECIMEN	1	2	3	4	5	Promedio
Mpa	2,46	2,03	2,56	2,65	2,48	2,44



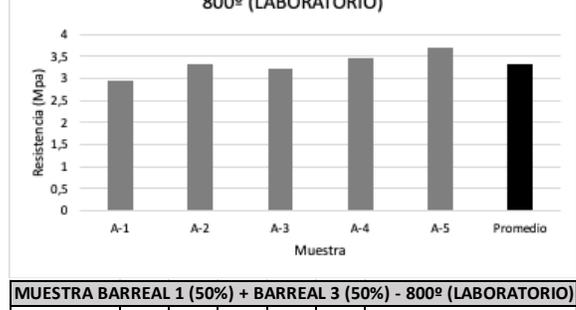
MUESTRA BARREAL 3 - MEZCLA 100% - 1000º (LABORATORIO)						
ESPECIMEN	1	2	3	4	5	Promedio
Mpa	7,23	2,93	3,67	3,89	3,87	4,32



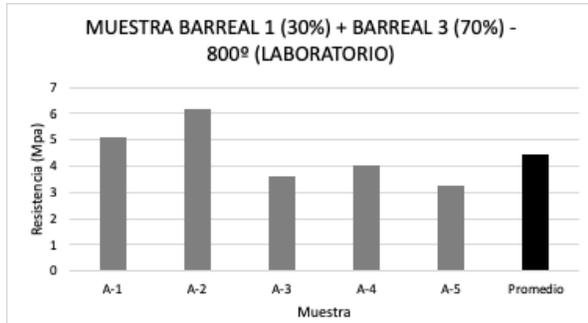
MUESTRA BARREAL 1 (70%) + BARREAL 3 (30%) - 800º (LABORATORIO)						
ESPECIMEN	1	2	3	4	5	Promedio
Mpa	4,46	3,59	3,77	4,42	4,08	4,06



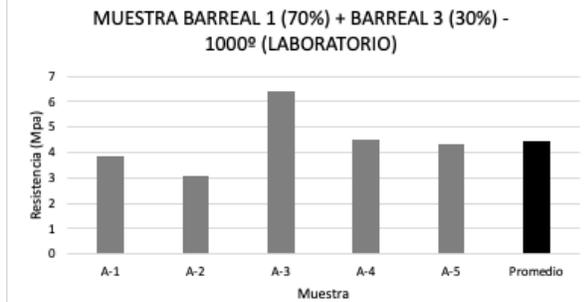
MUESTRA BARREAL 1 (70%) + BARREAL 3 (30%) - 600º (LABORATORIO)						
ESPECIMEN	1	2	3	4	5	Promedio
Mpa	2,65	4,33	4,75	4,56	4,25	4,11



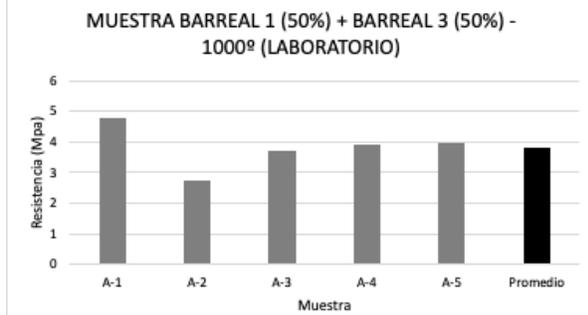
MUESTRA BARREAL 1 (50%) + BARREAL 3 (50%) - 800º (LABORATORIO)						
ESPECIMEN	1	2	3	4	5	Promedio
Mpa	2,94	3,32	3,21	3,45	3,69	3,32



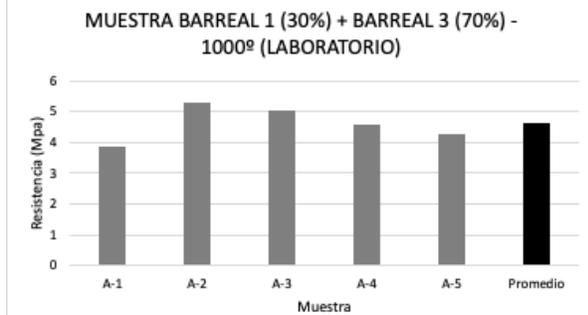
MUESTRA BARREAL 1 (30%) + BARREAL 3 (70%) - 800^o (LABORATORIO)						
ESPECIMEN	1	2	3	4	5	Promedio
Mpa	5,1	6,17	3,64	4,05	3,23	4,44



MUESTRA BARREAL 1 (70%) + BARREAL 3 (30%) - 1000^o (LABORATORIO)						
ESPECIMEN	1	2	3	4	5	Promedio
Mpa	3,87	3,06	6,43	4,5	4,3	4,43

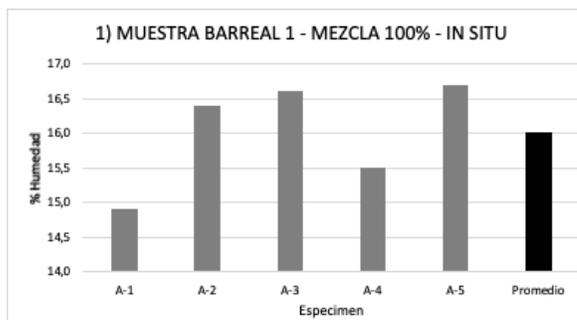


MUESTRA BARREAL 1 (50%) + BARREAL 3 (50%) - 1000^o (LABORATORIO)						
ESPECIMEN	1	2	3	4	5	Promedio
Mpa	4,8	2,76	3,7	3,89	3,97	3,82

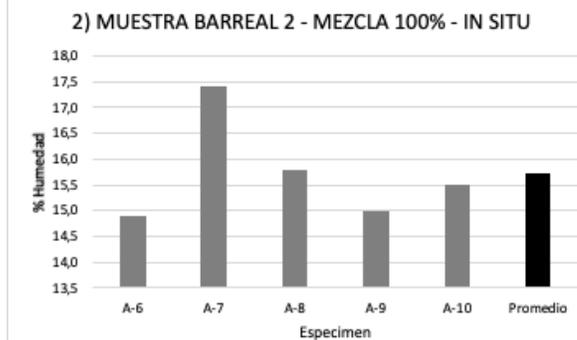


MUESTRA BARREAL 1 (30%) + BARREAL 3 (70%) - 1000^o (LABORATORIO)						
ESPECIMEN	1	2	3	4	5	Promedio
Mpa	3,86	5,3	5,05	4,58	4,28	4,61

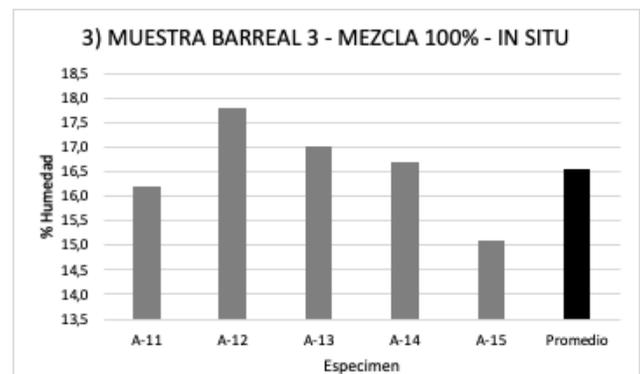
B. Tablas de porcentajes de absorción de humedad de los elementos de prueba



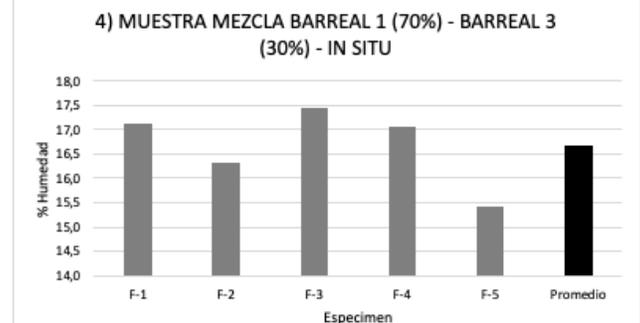
1) MUESTRA BARREAL 1 - MEZCLA 100% - IN SITU						
ESPECIMEN	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	Promedio
%Humedad x Und.	14,9	16,4	16,6	15,5	16,7	16,0
Ws (gr)	5345	4965	4895	5150	5010	5073
Wsss (gr)	6140	5780	5710	5950	5845	5885



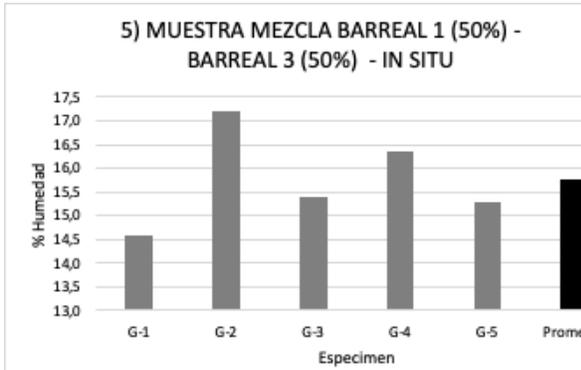
2) MUESTRA BARREAL 2 - MEZCLA 100% - IN SITU						
ESPECIMEN	A-6	A-7	A-8	A-9	A-10	Promedio
%Humedad x Und.	14,9	17,4	15,8	15,0	15,5	15,7
Ws (gr)	5105	4705	4810	5020	5040	4936
Wsss (gr)	5865	5525	5570	5575	5820	5671



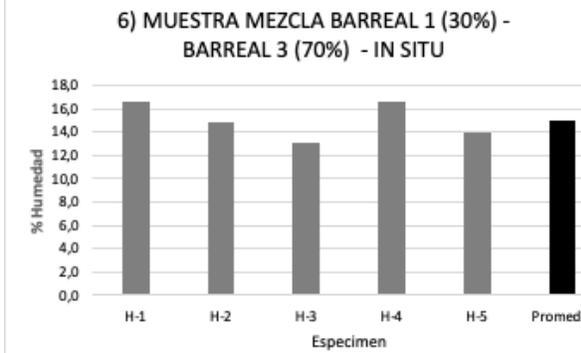
3) MUESTRA BARREAL 3 - MEZCLA 100% - IN SITU						
ESPECIMEN	A-11	A-12	A-13	A-14	A-15	Promedio
%Humedad x Und.	16,2	17,8	17,0	16,7	15,1	16,6
Ws (gr)	4980	4865	4990	5000	4850	4937
Wsss (gr)	5785	5730	5840	5835	5580	5754



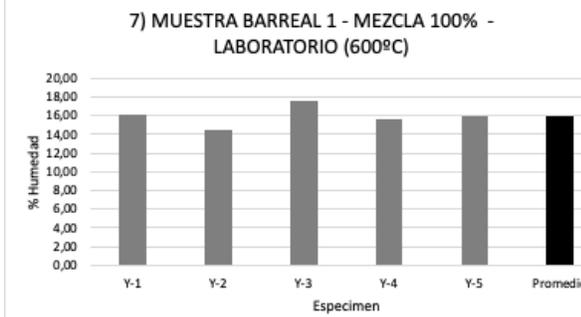
4) MUESTRA MEZCLA BARREAL 1 (70%) - BARREAL 3 (30%) - IN SITU						
ESPECIMEN	F-1	F-2	F-3	F-4	F-5	Promedio
%Humedad x Und.	17,1	16,3	17,4	17,1	15,4	16,7
Ws (gr)	2264	2121	2282	2262	2258	2237,4
Wsss (gr)	2652	2467	2680	2648	2606	2610,6



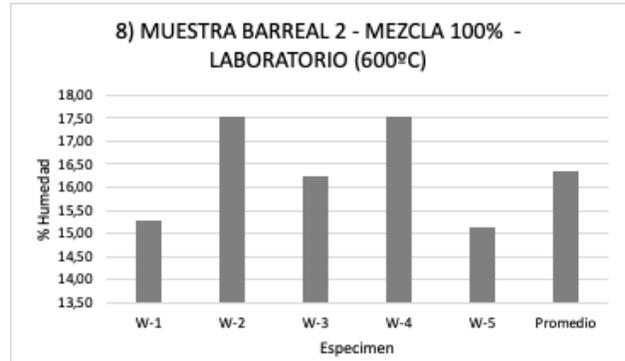
5) MUESTRA MEZCLA BARREAL 1 (50%) - BARREAL 3 (50%) - IN SITU						
ESPECIMEN	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	Promedio
%Humedad x Und.	14,6	17,2	15,4	16,4	15,3	15,3
Ws (gr)	2408	2149	2321	2444	2288	2267
Wsss (gr)	2759	2519	2678	2844	2638	2677



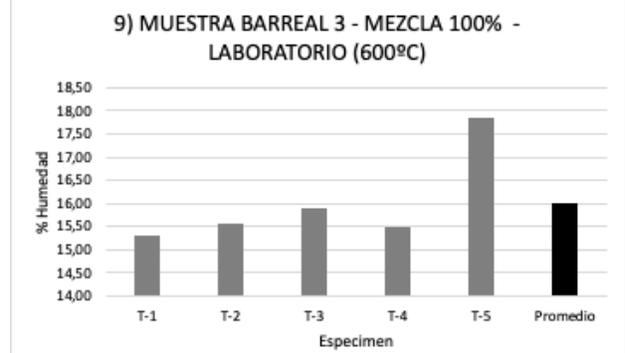
6) MUESTRA MEZCLA BARREAL 1 (30%) - BARREAL 3 (70%) - IN SITU						
ESPECIMEN	H-1	H-2	H-3	H-4	H-5	Promedio
%Humedad x Und.	16,5	14,9	13,1	16,6	14,0	15,3
Ws (gr)	2274	2289	2369	2405	2305	2321
Wsss (gr)	2650	2630	2679	2804	2627	2677



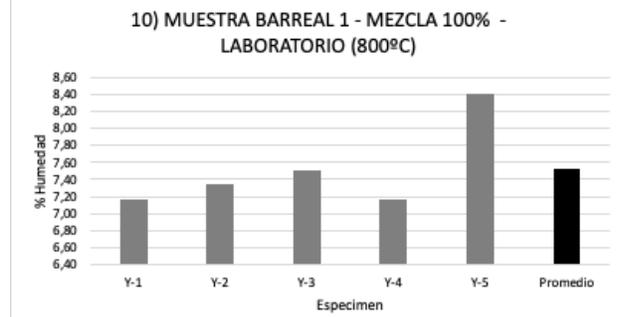
7) MUESTRA BARREAL 1 - MEZCLA 100% - LABORATORIO (600°C)						
ESPECIMEN	Y-1	Y-2	Y-3	Y-4	Y-5	Promedio
%Humedad x Und.	16,10	14,50	17,61	15,59	15,99	15,30
Ws (gr)	1615	1828	1450	1679	1629	1645
Wsss (gr)	1925	2138	1760	1989	1939	1955



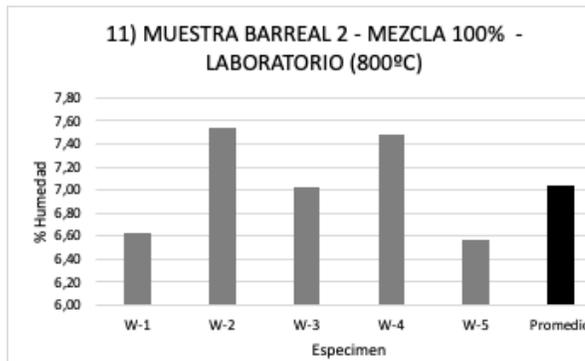
8) MUESTRA BARREAL 2 - MEZCLA 100% - LABORATORIO (600°C)						
ESPECIMEN	W-1	W-2	W-3	W-4	W-5	Promedio
%Humedad x Und.	15,29	17,54	16,26	17,53	15,13	16,35
Ws (gr)	1939	1646	1803	1647	1963	1799,6
Wsss (gr)	2289	1996	2153	1997	2313	2149,6



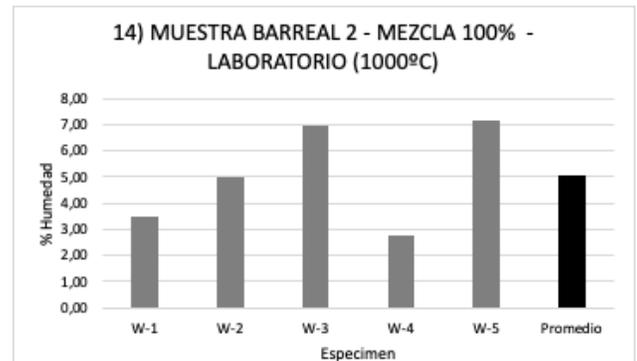
9) MUESTRA BARREAL 3 - MEZCLA 100% - LABORATORIO (600°C)						
ESPECIMEN	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	Promedio
%Humedad x Und.	15,30	15,58	15,89	15,49	17,85	16,02
Ws (gr)	1772	1734	1694	1746	1473	1683,8
Wsss (gr)	2092	2054	2014	2066	1793	2003,8



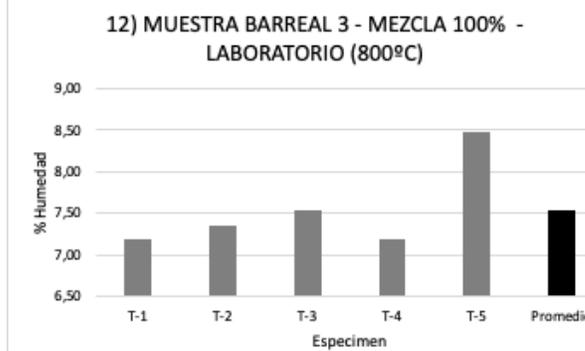
10) MUESTRA BARREAL 1 - MEZCLA 100% - LABORATORIO (800°C)						
ESPECIMEN	Y-1	Y-2	Y-3	Y-4	Y-5	Promedio
%Humedad x Und.	7,16	7,34	7,51	7,17	8,40	7,52
Ws (gr)	1945	1894	1847	1942	1635	1852,6
Wsss (gr)	2095	2044	1997	2092	1785	2002,6



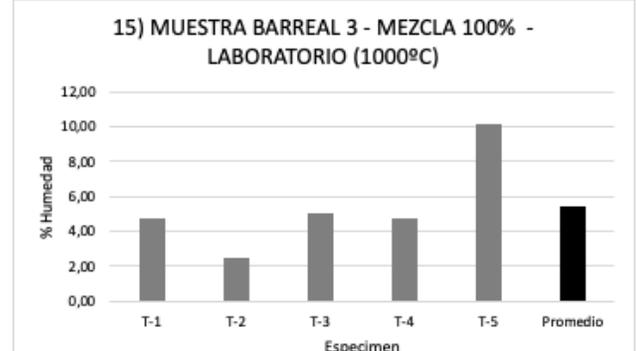
11) MUESTRA BARREAL 2 - MEZCLA 100% - LABORATORIO (800°C)						
ESPECIMEN	W-1	W-2	W-3	W-4	W-5	Promedio
%Humedad x Und.	6,62	7,54	7,02	7,49	6,56	7,0
Ws (gr)	2115	1840	1987	1853	2136	1981
Wsss (gr)	2265	1990	2137	2003	2286	2134



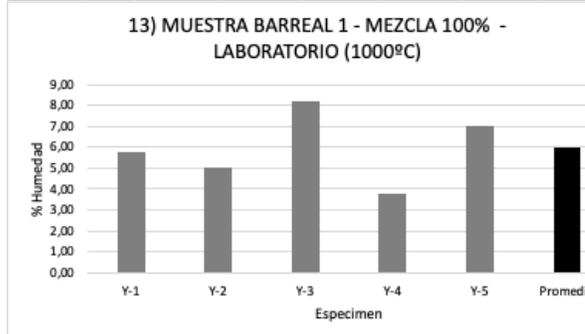
14) MUESTRA BARREAL 2 - MEZCLA 100% - LABORATORIO (1000°C)						
ESPECIMEN	W-1	W-2	W-3	W-4	W-5	Promedio
%Humedad x Und.	3,51	5,00	6,98	2,75	7,17	5,08
Ws (gr)	2200	1900	2000	1945	2135	2036,0
Wsss (gr)	2280	2000	2150	2000	2300	2146,0



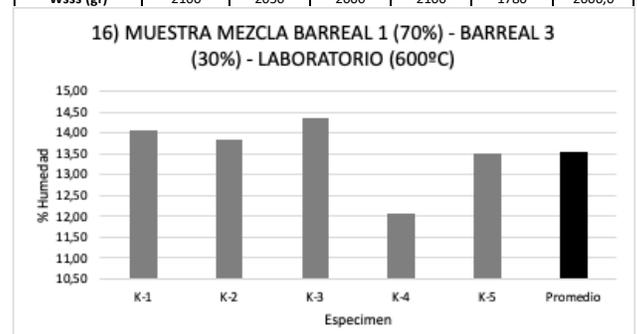
12) MUESTRA BARREAL 3 - MEZCLA 100% - LABORATORIO (800°C)						
ESPECIMEN	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	Promedio
%Humedad x Und.	7,18	7,35	7,54	7,18	8,47	7,5
Ws (gr)	1940	1890	1840	1940	1620	1841
Wsss (gr)	2090	2040	1990	2090	1770	1991



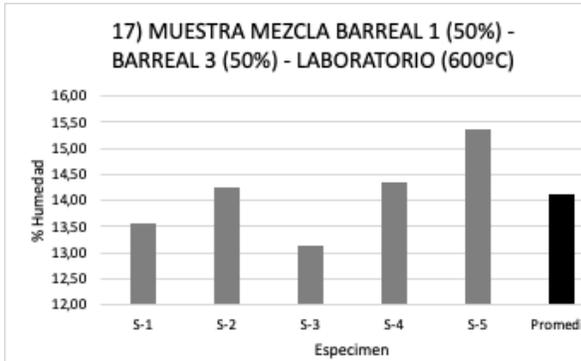
15) MUESTRA BARREAL 3 - MEZCLA 100% - LABORATORIO (1000°C)						
ESPECIMEN	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	Promedio
%Humedad x Und.	4,76	2,44	5,00	4,76	10,11	5,42
Ws (gr)	2000	2000	1900	2000	1600	1900,0
Wsss (gr)	2100	2050	2000	2100	1780	2006,0



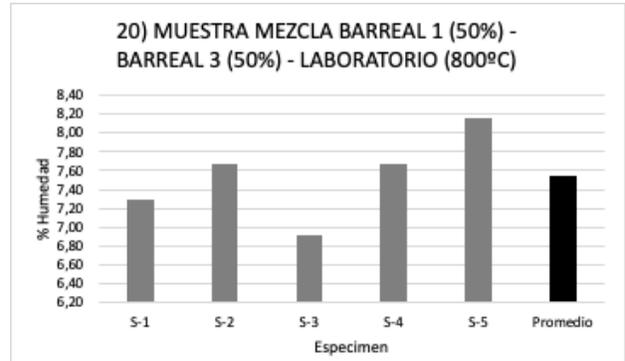
13) MUESTRA BARREAL 1 - MEZCLA 100% - LABORATORIO (1000°C)						
ESPECIMEN	Y-1	Y-2	Y-3	Y-4	Y-5	Promedio
%Humedad x Und.	5,74	5,02	8,20	3,74	7,04	5,1
Ws (gr)	1805	2023	1612	1906	1808	1821
Wsss (gr)	1915	2130	1756	1980	1945	1971



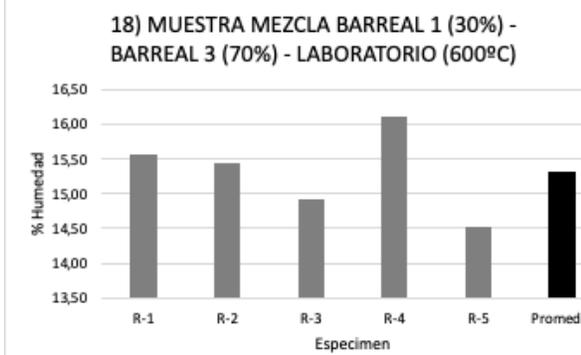
16) MUESTRA MEZCLA BARREAL 1 (70%) - BARREAL 3 (30%) - LABORATORIO (600°C)						
ESPECIMEN	K-1	K-2	K-3	K-4	K-5	Promedio
%Humedad x Und.	14,06	13,82	14,34	12,06	13,49	13,56
Ws (gr)	1772	1870	1792	2188	1924	1909,2
Wsss (gr)	2062	2170	2092	2488	2224	2207,2



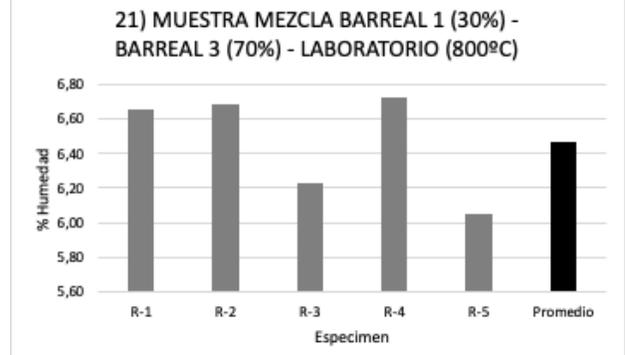
17) MUESTRA MEZCLA BARREAL 1 (50%) - BARREAL 3 (50%) - LABORATORIO (600°C)						
ESPECIMEN	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	Pron
%Humedad x Und.	13,54	14,25	13,13	14,34	15,35	14
Ws (gr)	1915	1805	1984	1792	1654	18:
Wsss (gr)	2215	2105	2284	2092	1954	21:



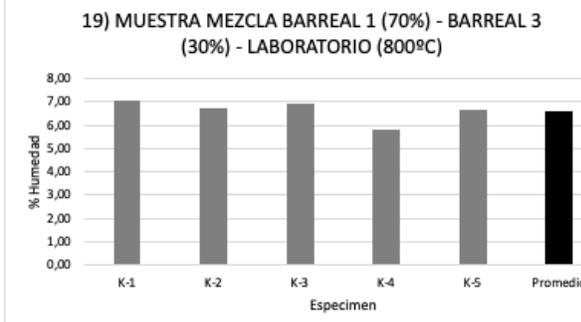
20) MUESTRA MEZCLA BARREAL 1 (50%) - BARREAL 3 (50%) - LABORATORIO (800°C)						
ESPECIMEN	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	Promedio
%Humedad x Und.	7,29	7,66	6,92	7,68	8,17	7,54
Ws (gr)	2034,0	1928,0	2152,0	1924,0	1799,0	1967,4
Wsss (gr)	2194	2088	2312	2084	1959	2127,4



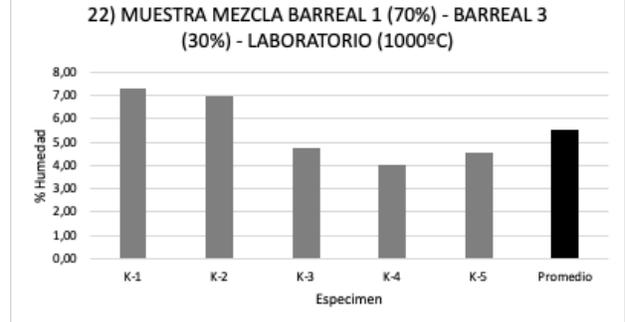
18) MUESTRA MEZCLA BARREAL 1 (30%) - BARREAL 3 (70%) - LABORATORIO (600°C)						
ESPECIMEN	R-1	R-2	R-3	R-4	R-5	Pron
%Humedad x Und.	15,57	15,46	14,93	16,12	14,51	15
Ws (gr)	1790	1805	1880	1717	1944	18:
Wsss (gr)	2120	2135	2210	2047	2274	21:



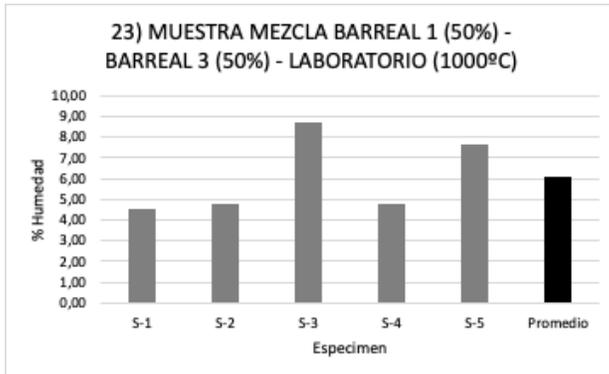
21) MUESTRA MEZCLA BARREAL 1 (30%) - BARREAL 3 (70%) - LABORATORIO (800°C)						
ESPECIMEN	R-1	R-2	R-3	R-4	R-5	Promedio
%Humedad x Und.	6,65	6,69	6,23	6,73	6,05	6,47
Ws (gr)	1964	1954	2107	1940	2174	2027,8
Wsss (gr)	2104	2094	2247	2080	2314	2167,8



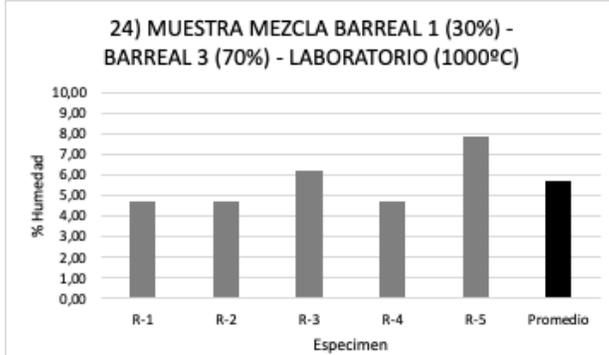
19) MUESTRA MEZCLA BARREAL 1 (70%) - BARREAL 3 (30%) - LABORATORIO (800°C)						
ESPECIMEN	K-1	K-2	K-3	K-4	K-5	Prom
%Humedad x Und.	7,04	6,69	6,95	5,79	6,63	6,6
Ws (gr)	1914	2021	1941	2361	2043	2051
Wsss (gr)	2059	2166	2086	2506	2188	220:



22) MUESTRA MEZCLA BARREAL 1 (70%) - BARREAL 3 (30%) - LABORATORIO (1000°C)						
ESPECIMEN	K-1	K-2	K-3	K-4	K-5	Promedio
%Humedad x Und.	7,32	6,98	4,76	4,00	4,55	5,52
Ws (gr)	1900	2000	2000	2400	2100	2080,0
Wsss (gr)	2050	2150	2100	2500	2200	2200,0



23) MUESTRA MEZCLA BARREAL 1 (50%) - BARREAL 3 (50%) - LABORATORIO (1000°C)						
ESPECIMEN	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	Promedio
%Humedad x Und.	4,55	4,76	8,70	4,76	7,69	6,09
Ws (gr)	2100	2000	2100	2000	1800	2000,0
Wsss (gr)	2200	2100	2300	2100	1950	2130,0



24) MUESTRA MEZCLA BARREAL 1 (30%) - BARREAL 3 (70%) - LABORATORIO (1000°C)						
ESPECIMEN	R-1	R-2	R-3	R-4	R-5	Promedio
%Humedad x Und.	4,76	4,76	6,25	4,76	7,89	5,69
Ws (gr)	2000	2000	2100	2000	2100	2040,0
Wsss (gr)	2100	2100	2240	2100	2280	2164,0

