

ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO MECÁNICO DE MINERALES DE USO INDUSTRIAL EN ZONAS COMUNITARIAS MINERAS DEL MUNICIPIO DE VALLEDUPAR^a

ANALYSIS OF THE MECHANICAL PERFORMANCE OF ORE FOR INDUSTRIAL USE IN COMMUNITY MINING AREAS IN THE MUNICIPALITY OF VALLEDUPAR

CRISTIAN DAZA ÁLVAREZ^b *, MOISÉS BUSTAMANTE RÚA^b, PABLO BUSTAMANTE BAENA^c,
ARTURO DAZA ÁLVAREZ^d

Recibido para revisar 31-08-2022, aceptado 29-12-2022, versión final 24-01-2023.

Artículo Investigación

RESUMEN: El objetivo de este trabajo es mostrar el análisis del desempeño mecánico de los minerales 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. Se propone realizar caracterizaciones fisicoquímicas, térmicas y mecánicas para 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 concluyó 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: Caracterización; fisicoquímica; resistencia; ladrillos; temperatura.

ABSTRACT: The objective of this work is to show the analysis of the mechanical performance of industrial minerals in community mining areas of the municipality of Valledupar, through the physicochemical, thermal and mechanical characterization of the materials present in the active mining fronts of the area under study. Physicochemical, thermal and mechanical characterizations were carried out to compare 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 strength of the clay materials produced from the field operating conditions and the laboratory controlled operating conditions. It was concluded that as the firing

^aDaza Álvarez, C., Bustamante Rúa, M., Bustamante Baena, P., Daza Álvarez, A. (2023). Análisis del desempeño mecánico de minerales de uso industrial en zonas comunitarias mineras del municipio de Valledupar. *Rev. Fac. Cienc.*, 12 (2), 6–21. DOI: <https://10.15446/rev.fac.cienc.v12n2.104545>

^bUniversidad Nacional de Colombia - Sede Medellín (Instituto de Minerales CIMEX)

* Autor para correspondencia: cdazaa@unal.edu.co

^cIngeniero de Minas y Metalurgia - Continental Gold Ltda.

^dIngeniero de Petróleos - Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín

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: Characterization; bricks; mechanical strength; physicochemical; temperature.

1. INTRODUCCIÓN

La industria alfarera en Colombia, especialmente en la región Caribe, enfrenta problemas de calidad en sus productos, debido a la falta de investigaciones y estudios en cuanto a las técnicas, procesos y características de los materiales arcillosos utilizados. Esto ha llevado a que muchos de los productos, como los bloques $H - 10$, no cumplan con las normas técnicas y estándares de seguridad requeridos para la elaboración de ladrillos de uso estructural. Esto debido a deficiencias asociadas a los procesos de obtención de mezclas óptimas durante las etapas de homogeneización y amasado. Además, de que algunas empresas utilizan procesos productivos rudimentarios, que afectan significativamente la efectividad y calidad de los productos finales (Céspedes P. *et al.*, 2014; García-León *et al.*, 2018; Manco-Jaraba *et al.*, 2020).

Por lo cual, el estudio de las propiedades físicas y químicas de las arcillas es esencial para comprender su potencial uso industrial, debido a que la variabilidad de las características de cada arcilla puede tener un impacto directo en su aplicación final (Estrada & Espinosa de los monteros, 1982). Entre estas propiedades se encuentran: la estructura laminar, composición química y mineralógica, tamaño de las partículas, propiedades de consistencia y plasticidad, capacidad de intercambio catiónico, pérdida de masa y la capacidad de endurecimiento a través de los procesos de cocción. Que a través del ajuste de las variables de procesos operativas tanto en campo como en plantas de beneficio de minerales arcillosos, se podrían modificar ciertas características, con el fin de mejorar la calidad de los productos finales y optimizar el proceso de elaboración de los mismos (Céspedes P. *et al.*, 2014; Estrada & Espinosa de los monteros, 1982; Thorez, 1976).

Este artículo presenta un análisis del desempeño mecánico de los minerales de uso industrial en zonas comunitarias mineras del municipio de Valledupar. El cual se presenta como uno de los primeros antecedentes de investigación, relacionado con la caracterización de algunas de las especies minerales más importantes presentes en materiales arcillosos en esta región. Se llevaron a cabo caracterizaciones fisicoquímicas, térmicas y mecánicas, con el fin de obtener una línea base inicial del estado de los productos elaborados, bajo las condiciones operativas de la zona de estudio, que posteriormente fueron comparados con los productos elaborados en el laboratorio bajo condiciones de sinterización controladas. Se espera que este estudio contribuya al conocimiento sobre los minerales arcillosos de la región y su aplicación en procesos industriales en zonas mineras comunitarias del municipio de Valledupar y en el territorio colombiano.

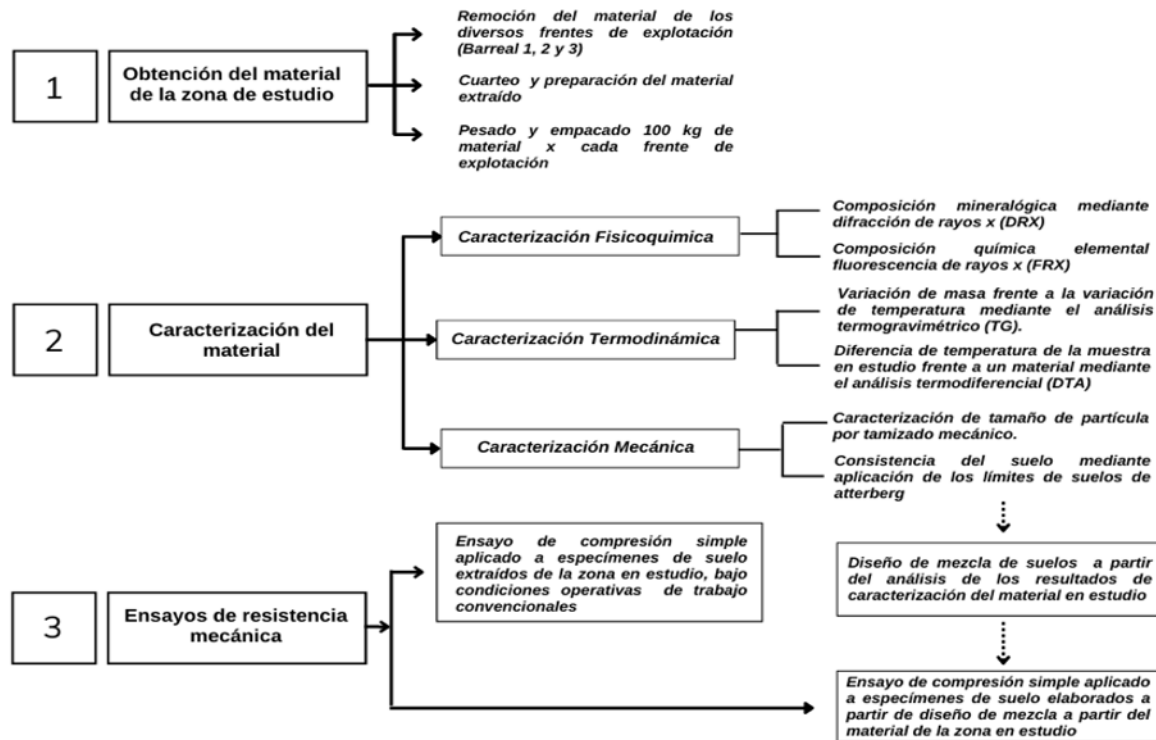


Figura 1: Diagrama metodológico de trabajo propuesto. Fuente: Elaboración propia.

2. METODOLOGÍA

Con el objetivo de analizar el desempeño mecánico del mineral de uso industrial en la zona estudiada, se requirió conocer las características termodinámicas, fisicoquímicas y mecánicas del material presente en esta zona. Para lograrlo, se implementó una metodología específica de trabajo, detallada en la Figura 1. A continuación, se muestran los procedimientos efectuados para conseguir cada uno de los objetivos planteados durante el desarrollo de la metodología en esta investigación.

2.1. Caracterización y preparación de muestras de campo

Para la caracterización y preparación de las muestras de campo, se recolectaron 100 kg de mineral arcilloso de la zona de estudio, libres de aditivos y sustancias que pudiesen alterar su composición. Estas muestras fueron obtenidas de los frentes activos Barreal 1, Barreal 2 y Barreal 3, dentro del título minero bajo el contrato de concesión No. 0175-20, perteneciente a la junta de acción comunal del corregimiento de las Casitas, del municipio de Valledupar.

Para analizar las características de las muestras de mineral en estudio, se realizaron caracterizaciones físicoquímicas y mecánicas en laboratorio. Se utilizó el método de tamizaje mecánico para el estudio gra-



Figura 2: Protocolo utilizado para la obtención de las muestras de estudio. Fuente: Elaboración propia.

nulométrico y el método de Atterberg para evaluar los límites de consistencia y plasticidad. Se analizó la mineralogía mediante difracción de rayos X (DRX) y los elementos químicos mediante fluorescencia de rayos X (FRX). Además, se llevaron a cabo estudios termodinámicos utilizando las técnicas termogravimétricas (TGA) y termo-diferencial (DSC), y para evaluar la resistencia mecánica de compresión se utilizó una prensa hidráulica.

El objetivo de este procedimiento de muestreo es preparar dos grupos de especímenes de prueba para analizar algunas características de interés y establecer una línea base de investigación. Esto con el fin de comparar los resultados obtenidos de las pruebas realizadas bajo condiciones operativas de campo, con los resultados obtenidos en condiciones controladas en laboratorio, tal como se muestra en la Figura 2.

2.2. Materiales y procesos

2.2.1. Nomenclatura y rotulado para clasificación de los especímenes de pruebas

Una vez obtenidas las muestras de los frentes de explotación en estudio Figura 2, se procede a clasificar y rotular por grupo los especímenes de prueba elaborados a partir de las muestras recolectadas en el sitio de estudio. Esto se realiza con el fin de diferenciar y definir los grupos de acuerdo a las condiciones de trabajo y operación de campo y de laboratorio (Estrada & Espinosa de los monteros, 1982), tal como se puede ver en las Tabla 1 y Tabla 2.

Una vez clasificadas por grupos las muestras, de acuerdo a las condiciones de trabajo y operación, se procedió a elaborar cinco (5) probetas de prueba por cada uno de los grupos de muestreo, teniendo en

Tabla 1: Nomenclatura utilizada para especímenes de suelo bajo condiciones operativas de campo.

Nombre de la muestra	Grupo de procesamiento	Nomenclatura	Condición de trabajo
Barreal 1 - Mezcla 100 %	Grupo 1 (G-1)	A_1, A_2, A_3, A_4, A_5	Condición operativa de campo como marco de referencia inicial
Barreal 2 - Mezcla 100 %		$A_6, A_7, A_8, A_9, A_{10}$	
Barreal 3 - Mezcla 100 %		$A_{11}, A_{12}, A_{13}, A_{14}$ A_{15}	

Tabla 2: Nomenclatura utilizada para especímenes de suelo bajo condiciones operativas de laboratorio.

Nombre de la muestra	Grupo de procesamiento	Nomenclatura	Condición de trabajo
Barreal 1 - Mezcla 100 %	Grupo 2 (G-2)	Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5	Situación operativa de control de temperatura en laboratorio a 600°C/ 12 H.
Barreal 2 - Mezcla 100 %		W_1, W_2, W_3, W_4, W_5	
Barreal 3 - Mezcla 100 %		T_1, T_2, T_3, T_4, T_5	
Barreal 1 - Mezcla 100 %	Grupo 3 (G-3)	$Y_6, Y_7, Y_8, Y_9, Y_{10}$	Situación operativa de control de temperatura en laboratorio a 800°C/ 12 H.
Barreal 2 - Mezcla 100 %		$W_6, W_7, W_8, W_9, W_{10}$	
Barreal 3 - Mezcla 100 %		$T_6, T_7, T_8, T_9, T_{10}$	
Barreal 1 - Mezcla 100 %	Grupo 4 (G-4)	$Y_{11}, Y_{12}, Y_{13}, Y_{14}, Y_{15}$	Situación operativa de control de temperatura en laboratorio a 1000°C/ 12 H.
Barreal 2 - Mezcla 100 %		$W_{11}, W_{12}, W_{13}, W_{14}, W_{15}$	
Barreal 3 - Mezcla 100 %		$T_{11}, T_{12}, T_{13}, T_{14}, T_{15}$	

cuenta los criterios presentes en las normas ICONTEC NTC 4205 y NTC 4017 (INCONTEC, 2018a; INCONTEC, 2018b), con el fin de evaluar los requisitos mínimos y parámetros estructurales que deben cumplir los ladrillos y bloques cerámicos para ser utilizados como unidades fijas de mampostería. Por lo que se elaboraron 60 especímenes en total, para comparar las diferencias entre los productos elaborados en campo y los elaborados en laboratorio (Estrada & Espinosa de los monteros, 1982).

2.2.2. Preparación y conformación de pastas cerámicas

Las pastas obtenidas de los frentes de explotación en estudio fueron preparadas a partir de materiales de composición arcillosa de la zona de estudio, teniendo especial cuidado en no obtener muestras con materiales extraños que pudiesen alterar la composición de estas muestras (Darío *et al.*, 2011; Enrique *et al.*, 2017; Manco-Jaraba *et al.*, 2020). Por lo cual todas las mezclas elaboradas a partir de estos materiales arcillosos fueron maduradas, secadas, conformadas, y posteriormente sometidas a procesos de cocción, tanto en campo como en laboratorio, con el fin de evaluar su comportamiento físico-mecánico, mediante la aplicación de pruebas mecánicas de compresión sobre los especímenes de prueba.

2.2.3. Proceso de mezclado y homogenización

Los procesos de mezclado y homogenización se realizaron teniendo en cuenta los procedimientos de trabajo efectuados por alfareros de la zona en estudio. Estos materiales de composición arcillosa se removieron de los frentes de explotación en estudio de manera manual usando herramientas de mano como picos y azadones, posteriormente se agregó agua teniendo en cuenta el peso del material removido en cantidad de cinco(5) puntos por encima del límite líquido (Henao Arrieta *et al.*, 2016; Darío *et al.*, 2011), luego el material se amasó manualmente hasta conseguir una consistencia pastosa homogénea en toda la mezcla, y finalmente, dejar madurar las pastas durante 24 horas para garantizar que el material se humedezca y alcance su mayor plasticidad.

2.2.4. Proceso de secado y conformado de muestras

Una vez obtenidas las pastas arcillosas, se procedió a elaborar y conformar probetas con dimensiones de 4" × 1" × 0.5" por medio de prensado manual, con el objetivo de simular las condiciones operativas y de trabajo de los alfareros de la zona en estudio (Cotes de Álvarez, 2017; Isel Cáceres *et al.*, 2017; Manco-Jaraba *et al.*, 2020). Con el fin de determinar la absorción de agua y los ensayos mecánicos, se tuvieron en cuenta las recomendaciones de las normas NTC 4017 (INCONTEC, 2018a) y NTC 4205 (INCONTEC, 2018b).

Una vez conformadas las probetas de prueba, éstas se sometieron a un proceso mixto de secado. En primer lugar, las probetas se dejaron secar a temperatura ambiente durante tres días y posteriormente se colocaron en un horno eléctrico a una temperatura de 40 grados Celsius durante 24 horas. Esto con el objetivo de evitar cambios volumétricos excesivos en las probetas elaboradas, los cuales podrían ocasionar

agrietamientos durante los procesos de secado y sinterización (Ferrer, 1964; Estrada & Espinosa de los monteros, 1982; Gippini, 1966).

2.2.5. Proceso de cocción y sinterización

Con el objetivo de garantizar una cocción homogénea y controlada de los grupos de prueba bajo condiciones de laboratorio (Tabla 2), éstas se llevaron a cabo en muflas eléctricas con control de temperatura y tiempo, teniendo en cuenta las investigaciones y recomendaciones previas realizadas por los autores Henao Arrieta *et al.* (2016), Darío *et al.* (2011), Ferrer (1964), apoyado con los resultados obtenidos de los ensayos termo gravimétricos (TGA) y termo diferenciales (DSC), realizados a las muestras arcillosas en estudio.

Se llevaron a cabo tres rampas de cocción a temperatura de 600°, 800° y 1000°, con tiempos máximos de residencia en los reactores de 12 horas, en los cuales se ajustaban progresivamente las velocidades de cocción desde los 1°/min hasta los 3.33°/min, durante algunas etapas críticas del proceso de sinterización de estos materiales, con el fin de evitar cambios bruscos de temperatura durante el proceso de sinterización, que posteriormente pudiesen afectar la integridad de las probetas en estudio.

2.3. Equipos e instrumentos

2.3.1. Pesaje de muestras

Para el pesaje de las muestras se utilizó una balanza portátil modelo R31P30 de la marca OHAUS CORPORATION® con las siguientes características, I) Capacidad máxima de 30.000 gr y mínima de 50g y error calibrado de ± 1 gr.

2.3.2. Caracterización granulométrica y límites de consistencia

Para la caracterización del tamaño de partículas se utilizó un juego de tamices serie ASTM de acero inoxidable de la marca ENDECOTTS ® desde la serie 2" hasta el tamiz #200, para la caracterización de límites de consistencia y plasticidad se utilizó una 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.

2.3.3. Caracterización química y mineralógica

La caracterización química se realizó mediante el espectrómetro de fluorescencia de rayos x (FRX) Epsilon 1 de la marca Malvern Panalytical® con las siguientes características, 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 de 30 minutos, mientras que la caracterización mineralógica se realizó mediante el uso del equipo de difracción de rayos x (DRX) de la marca Malvern Panalytical®

con las siguientes características, I) ánodo de Cu y radiación $K_{\alpha 1}$ a 40 Kv y 30 mA, II) longitud de onda 1,54060 Å, III) con 2θ variando desde 5.0116 hasta 69.9856, la identificación de los picos se llevó a cabo empleando los difractogramas presentes en la base de datos de COD 2014.

2.3.4. Análisis termodinámico

El análisis térmico se realizó mediante el equipo SDT Q600 de la marca TA Instruments® donde se realizaron los TGA/DSC de manera simultánea con las siguientes características, I) atmosfera de nitrógeno fluyendo a 40 mL/min, con rampa de 10°C/min desde temperatura ambiental hasta 1050°C.

2.3.5. Procesos de secado

El secado de los especímenes de prueba se realizó 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 $\pm 1^\circ\text{C}$.

2.3.6. Pruebas de esfuerzos y resistencia mecánica final

Las pruebas de resistencia a la compresión simple se realizaron a través de una maquina automática para ensayos de compresión de la marca Control de referencia DPX utilizando las siguientes características, 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.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1. Caracterización de los materiales arcillosos de uso industrial

3.1.1. Análisis de la distribución de tamaño de partículas

En la Figura 3 se muestran las curvas granulométricas de las muestras obtenidas de los yacimientos activos de la zona en estudio, las cuales fueron analizadas teniendo en cuenta la distribución de tamaño de partículas, mediante la técnica de tamizaje en húmedo, según las condiciones de laboratorio establecidas previamente.

En el análisis de la distribución de tamaños de partículas de las muestras en estudio, se pueden observar los diferentes rangos de tamaño teniendo en cuenta las partes finas ($<4\text{mm}$) y arenosas ($>4\text{mm}$) presentes en las muestras en estudio. Donde las fracciones finas de las muestras se encuentran distribuidas de la siguiente forma, 63.80 % para Barreal 1, 67.3 % para Barreal 2 y 48.7 % para Barreal 3, mientras que las fracciones arenosas se presentan en proporciones del 35.87 % para Barreal 1, 32.5 % para Barreal 2 y 49.8 % para Barreal 3. Con lo cual se puede inferir que las muestras Barreal 1 y Barreal 2 presentan un comportamiento más plástico en comparación de la muestra Barreal 3, debido a la alta cantidad de arena que presentan en la

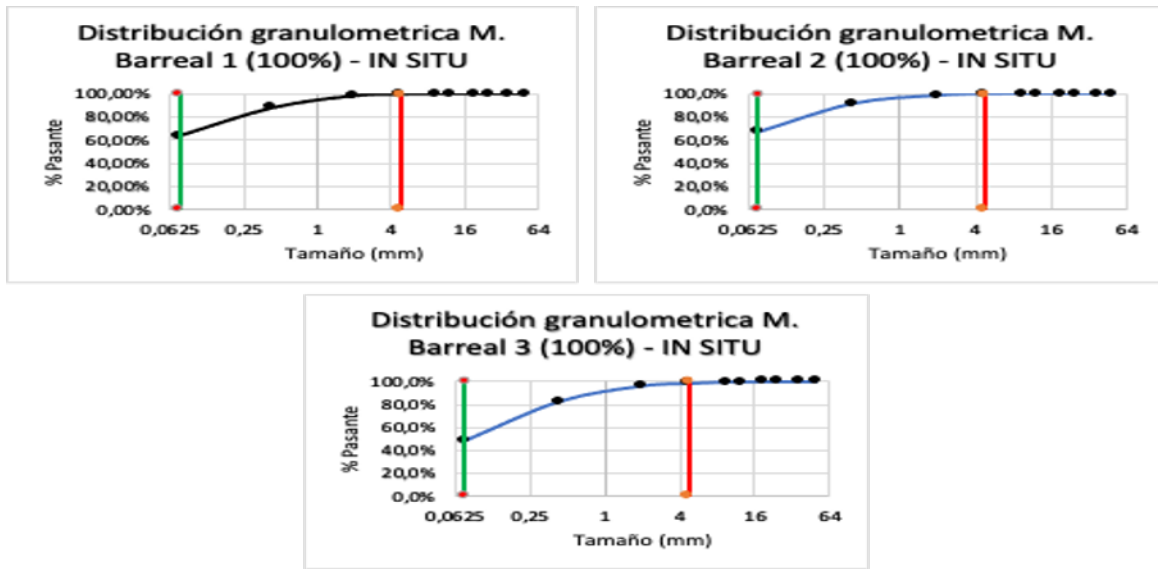


Figura 3: Distribución de tamaño de partículas presentes en los yacimientos activos de la zona en estudio. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3: Límites de Atterberg de las muestras presentes en los frentes de explotación activos.

Nombre de la muestra	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de plasticidad
Barreal 1 - Mezcla 100 %	25,40	19,10	6,3
Barreal 2 - Mezcla 100 %	26,80	20,40	6,4
Barreal 3 - Mezcla 100 %	23,00	17,90	5,1

última muestra en estudio y que le proporciona una característica desgrasante en comparación con las otras muestras de acuerdo con (Darío *et al.*, 2011; Enrique *et al.*, 2017; Garcia Verduch, 1985; Manco-Jaraba *et al.*, 2020).

3.1.2. Límites de consistencia y plasticidad

Mediante la determinación de los límites de consistencia y plasticidad, se puede observar el comportamiento de la cantidad de agua presente en las muestras arcillosas y la variación en el comportamiento de estos materiales, además de afectar algunas variables de procesos que se puedan generar durante los procesos de beneficio de estos minerales y sus productos finales (Sembenelli, 1966).

A través de los ensayos realizados para determinar los límites de consistencia y plasticidad presentes en la Tabla 3, se puede relacionar la distribución de partículas presentes en las muestras de la zona de estudio Figura 3 con el comportamiento plástico de las mismas. Los especímenes con mayor fracción arcillosa (Barreal 1 y 2) presentan mayores valores en los límites plásticos e índices de plasticidad, en

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA DE LAS MUESTRAS EN ESTUDIO			COMPOSICIÓN QUÍMICA EN FORMA DE ÓXIDOS DE LAS MUESTRAS EN ESTUDIO			
Muestra	Especie Mineral	Porcentaje de composición (%)	MUESTRAS	BARREAL 1	BARREAL 2	BARREAL 3
Barreal 1	<i>Cuarzo</i>	36,2	COMPUESTOS EN FORMA DE ÓXIDO	CONCENTRACIÓN (%)	CONCENTRACIÓN (%)	CONCENTRACIÓN (%)
	<i>Ortoclasea</i>	24,1	<i>MgO</i>	9,25	6,41	5,55
	<i>Illita</i>	20,3	<i>Al₂O₃</i>	20,98	20,49	21,97
	<i>Sanidina</i>	10,6	<i>SiO₂</i>	54,94	56,62	57,51
	<i>Moscovita</i>	6,5	<i>P₂O₅</i>	1,33	1,43	1,36
	<i>Clinocloro</i>	2,3	<i>Cl</i>	0,31	0,44	0,34
Barreal 2	<i>Quarzo</i>	38	<i>K₂O</i>	3,51	3,51	3,57
	<i>Illita</i>	34,9	<i>CaO</i>	1,71	2,22	1,89
	<i>Enstatita</i>	26,7	<i>TiO₂</i>	0,89	0,86	0,84
	<i>Langbeinita</i>	0,3	<i>MnO</i>	*	0,13	0,12
Barreal 3	<i>Quarzo</i>	39	<i>Fe₂O₃</i>	7,09	7,73	6,76
	<i>Ortoclasea</i>	35,7	<i>CuO</i>	*	0,08	*
	<i>Moscovita</i>	20,1	<i>BaO</i>	*	0,09	0,09
	<i>Biotita</i>	3,5	Σ	100	100	100
	<i>Illita</i>	1,4				

Figura 4: Composición química y mineralógica de las muestras en estudio. Fuente: Elaboración propia.

comparación con las muestras con una mayor fracción arenosa (Barreal 3). Según Fernández *et al.* (1986), estos fenómenos de plasticidad en las muestras de tipo arcillosas, pueden estar asociados a un mayor contenido de partículas finas y, por lo tanto, a mayores áreas superficiales proporcionadas por minerales de tipo arcilloso presentes en las muestras.

3.1.3. Composición química elemental y mineralógica

A través de los análisis químicos elementales realizados a los materiales de composición arcillosa en estudio presentes en la Figura 4, se observó la presencia de algunos elementos químicos de interés en forma de óxidos como por ejemplo SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃, y que de acuerdo con Prieto R. *et al.* (2019), estos elementos podrían influir de manera positiva o negativa, en la elaboración de algunos productos de alfarería común, pero que a través de técnicas de limpieza y mejora dentro de los procesos de beneficio de minerales, se podrían separar algunos elementos químicos e impurezas en las muestras, con el fin de garantizar la calidad de los productos finales.

Además, se ilustra en la Figura 4, la composición mineralógica de las muestras obtenidas de los frentes de explotación activos en la zona de estudio (Barreal 1, Barreal 2 y Barreal 3). Donde se observa que existe una mayor proporción de los minerales Cuarzo e Illita en las muestras analizadas. De acuerdo con las investigaciones realizadas por Darío *et al.* (2011), la presencia de estos minerales en mayor o menor proporción en las muestras de tipo arcilloso, serían las responsables de aportarle un comportamiento plástico o una mayor capacidad desgrasante.

Cabe destacar que, de acuerdo con investigaciones realizadas por Garcia Verduch (1985), la presencia de especies minerales como la ortoclaseas, pertenecientes a la familia de los feldespatos, presentes en algunas muestras de tipo arcilloso utilizadas en la industria alfarera, podrían favorecer de manera significativamente

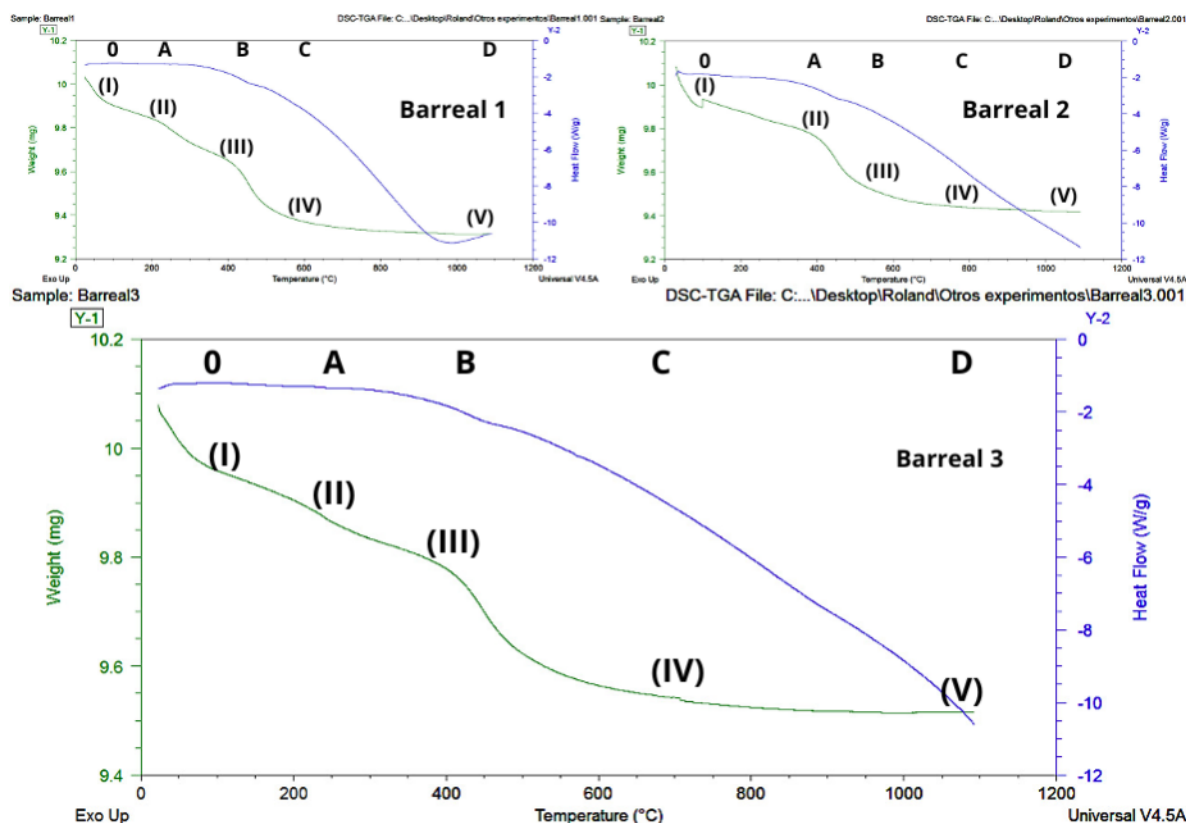


Figura 5: Análisis termodinámico de las muestras en estudio. Fuente: Elaboración propia.

en los procesos de cocción y mejorarían la resistencia mecánica de los productos finales. Debido a que este tipo de minerales ayudan a disminuir las temperaturas de fusión, lo que permite alcanzar fases y estructuras cristalinas de interés, como la fase mullita, la cual es responsable de generar un aumento resistencias mecánicas y por consiguiente mejor calidad de los productos elaborados.

3.1.4. Análisis térmico

En los resultados de los análisis termo gravimétricos (TGA - Línea verde) y termo diferencial (DSC - Línea azul) presentados en la Figura 5, se observaron comportamientos termodinámicos similares entre las tres muestras estudiadas (Barreal 1, 2 y 3). Según Darío *et al.* (2011), estas similitudes pueden estar relacionadas con el aumento de la temperatura de sinterización de los ensayos y su impacto en las pérdidas de agua superficial y químicamente enlazada de las muestras. Además de la generación de algunos compuestos y gases volátiles producidos durante la degradación y oxidación de elementos presentes en las muestras.

En la Figura 5, se pueden identificar cinco etapas distintas en las que ocurren procesos significativos de cambios volumétricos y químicos, generados por la variación de temperatura durante los ensayos termodinámicos propuestos.

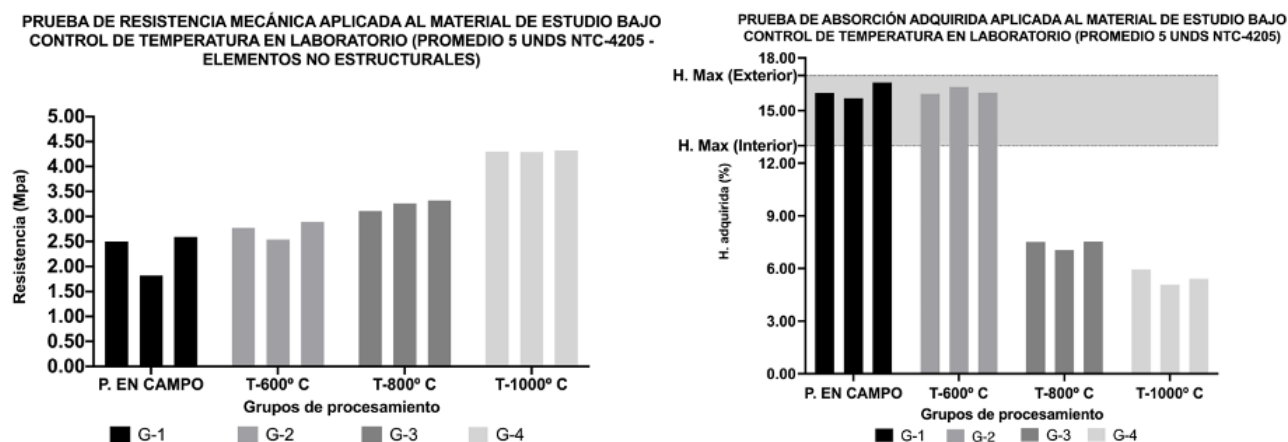


Figura 6: Análisis de resultados de pruebas de resistencia mecánica y de humedad de los productos elaborados. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con las experiencias investigativas asociadas a minerales arcillosos realizadas por García-León *et al.* (2018), se puede inferir que durante las etapas (I) entre 25°C y 100°C, se producen cambios endotérmicos relacionados con los procesos de desorción o secado superficial de las muestras; (II) entre 100°C y 200°C, se aprecia una estabilización temporal en la reacción y una baja tensión de vapor de agua superficial residual; (III) entre 200°C y 400°C, se observan los primeros indicios de reacciones de disociación de los oxidantes del hidróxido de hierro; (IV) entre 400°C y 600°C, se aprecia el inicio de los procesos de deshidratación mediante la pérdida de agua estructural o químicamente enlazada, además de reacciones exotérmicas asociadas a las transformaciones del cuarzo en estado α a cuarzo en estado β ; (V) entre 600°C y 1000°C se observa una disminución en el proceso de pérdida de agua por deshidratación y se inician los procesos de cristalización y posibles cambios de fases, generando posibles formaciones iniciales de mullita en las muestras de estudio.

3.1.5. Análisis mecánico y de humedad de los productos elaborados

En la Figura 6 se pueden apreciar los resultados de los ensayos de laboratorio efectuados para determinar la resistencia mecánica y los porcentajes de absorción de los productos elaborados a partir del material presente en los frentes de explotación activos de la zona en estudio.

En estos ensayos, se observó que al aumentar la temperatura de cocción de las probetas fabricadas bajo condiciones controladas en el laboratorio (Tabla 2) entre los rangos de 600°, 800° y 1000°, y manteniendo las mismas variables de procesos para la elaboración de ladrillos en campo, como la granulometría y la humedad óptima de amasado de las pastas, se aumentó las resistencias mecánicas de los especímenes de prueba hasta los 4.32 Mpa en promedio. Esto es una mejora significativa en comparación con las resistencias mecánicas de los productos elaborados sin control de temperatura en campo (Tabla 1), donde se obtuvieron

valor máximo promedio de 2.59 Mpa. Sin embargo, ambos resultados son bajos en comparación con los requerimientos mínimos de resistencia de 10 Mpa establecidos en la NTC 4205 INCONTEC (2018a) para ladrillos de uso no estructural.

Durante los procesos de sinterización de las probetas en estudio, se observó una relación entre las temperaturas de cocción y la reducción de la absorción del agua adquirida en estos materiales (Figura 6). Ya que a medida que se aumenta la temperatura de cocción, disminuyeron significativamente los porcentajes de humedad en las muestras, en comparación con los valores promedio de las probetas elaboradas bajo condiciones operativas de campo (Tabla 1), donde se obtuvieron porcentajes de humedad adquirida del orden del 16 % en promedio. Sin embargo, para las probetas elaboradas bajo condiciones controladas de temperatura en el laboratorio (Tabla 2), se obtuvieron valores máximo de humedad adquirida del 15.5 %, y a medida que se aumentaba la temperatura de cocción hasta los 1000°C, se observó una disminución drástica en la humedad adquirida hasta alcanzar porcentajes mínimos del 5.42 % en promedio, valores que se encuentran dentro de los límites establecidos en la norma NTC 4205 INCONTEC (2018a), para la elaboración de productos de mampostería no estructural.

De acuerdo con algunas experiencias investigativas desarrolladas por Cotes de Álvarez (2017), García-León *et al.* (2018), Gippini (1966), las bajas resistencias mecánicas de los elementos elaborados a partir de materiales arcillosos, podrían estar relacionadas con las bajas compactaciones de los especímenes elaborados, los cuales serían los responsables de generar una alta porosidad en los productos, generando micro grietas y vacancias internas o externas, que posteriormente se convertirían en planos de fallas y vacancias donde se podrían almacenar impurezas y moléculas de agua presentes en el ambiente, las cuales podrían debilitar la estructura de los productos finales elaborados.

4. CONCLUSIONES

Se reportan por primera vez las composiciones químicas y mineralógicas de las muestras de minerales de tipo arcillosos presentes en los frentes de explotación (Barreal 1, 2 y 3) del título minero otorgado a la comunidad alfarera del corregimiento de las casitas, del municipio de Valledupar, donde se apreciaron en su mayoría algunos elementos químicos tales como sílice, aluminio, hierro, magnesio, potasio y titanio, y de especies minerales como las illitas, moscovitas y ortoclasas.

Los resultados del estudio mecánico de compresión simple mostraron, que las probetas elaboradas bajo condiciones controladas de temperatura en laboratorio lograron valores máximos de resistencias mecánicas de 4.50 Mpa en promedio, lo que significó una mejora del 80 % en comparación con los especímenes elaborados bajo condiciones operativas de campo, en las que se obtuvieron resistencias mecánicas de 2.50 Mpa en promedio.

A temperaturas de sinterización por encima de los 800°C, se aprecian mejoras significativas en los porcentajes de humedad adquirida en las probetas elaboradas en laboratorio, en comparación con los resultados de las pruebas de humedad a especímenes elaborados bajo condiciones operativas de campo, teniendo en cuenta los límites de humedad adquirida establecidos en la norma NTC 4205-2 / 2009, para ladrillos de uso no estructural.

En general, de acuerdo con los resultados obtenidos, se aprecia una relación entre la temperatura de sinterización, el aumento de las resistencias mecánicas y la disminución de los porcentajes de humedad adquiridos en los elementos de prueba, debido a que a medida que se aumentaron las temperaturas de pruebas, se promovieron mejores procesos de densificación de las partículas minerales en las probetas, mejorando su resistencia a los esfuerzos de compresión y reduciendo las superficies de contacto internas y externas que pudiesen estar en contacto con las partículas de agua durante los ensayos de humedad.

Contribución de los autores

Moisés Bustamante-Rúa: Investigador senior principal de la investigación, encargado del seguimiento de cada una de las etapas de desarrollo del proyecto, además de validar la información resultante de los ensayos de difracción y fluorescencia de rayos X, con respecto a los minerales y elementos químicos presentes en las muestras en estudio.

Cristian Antonio Daza-Álvarez: Ingeniero de soporte y desarrollo de la investigación, encargado de la toma de muestras, procesamiento y el análisis de datos de los materiales en estudio a nivel de pruebas de campo y laboratorio.

Pablo Bustamante-Baena: Ingeniero de soporte de la investigación, encargado de la revisión y análisis de datos obtenidos de las muestras de campo y resultados de laboratorio, con el fin de procesarlos y validarlos con respecto a modelos estadísticos y la revisión de antecedentes científicos.

Arturo Alejandro Daza-Álvarez: Ingeniero de apoyo en campo de la investigación, encargado de las relaciones con comunidades de impacto del proyecto en mención, además coordinar junto al equipo de trabajo las condiciones de recolección de muestras de acuerdo a los criterios técnicos establecidos dentro del estudio.

Referencias

Céspedes P., N. E., Fonseca G., U., Valencia R., J. S., & Carda C., J. B. (2014). Valoración de Minerales Arcillosos del departamento de Boyacá(Colombia) para la Producción de Materiales Cerámicos Gresificados. *Qualicer*, 1–11. www.qualicer.org

- Cotes de Alvarez, M. C. (2017). Caracterización de las arcillas utilizadas en alfarería en tres corregimientos del municipio de Valledupar - Cesar, Colombia. *Revista de Investigación en el Campo del Arte*, 13(23), 198–209. <https://doi.org/10.14483/21450706.12999>
- Darío, J., Malagón, P., & Córdoba, E. (2011). Caracterización de arcillas y preparación de pastas cerámicas para la fabricación de tejas y ladrillos en la región de Barichara, Santander. *Dyna*, 78(167), 50–58. <http://bdigital.unal.edu.co/27865/1/25762-90524-1-PB.pdf>
- Enrique, R., Aguilar, G., & Noe, W. (2017) Caracterización de las arcillas del norte del Cauca, Colombia enclave para la optimización del proceso productivo de la industria ladrillera. *Journal de Ciencia e Ingeniería*, 9(1), 34–41. [https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/15538/PROYECTO DE GRADO.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/15538/PROYECTO%20DE%20GRADO.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Estrada, D. & Espinosa de los monteros, J. (1982). El secado en productos cerámicos. *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr.* 21(6), 327–337. <http://boletines.secv.es/upload/198221327.pdf>
- Fernandez, J. (1962). Plasticidad de las arcillas. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 1(7), 449–472. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7500781>
- Ferrer, L. (1964). Resistencia de los materiales cerámicos a los cambios bruscos de temperatura. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 3(6), 603–610. <http://boletines.secv.es/upload/196405605.pdf>
- García-León, R. A., Flórez Solano, E., & Acevedo Peñaloza, C. (2018). Caracterización térmica de mezclas de arcillas utilizadas en la fabricación de productos de mampostería para la construcción. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA)*, 1(31), 22–30. <https://doi.org/10.24054/16927257.v31.n31.2018.2760>
- Garcia Verduch, A. (1985). Origen y composición de las arcillas cerámicas. *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 24 (6), 395–404.
- Gippini, E. (1966). Transformaciones en la cocción. *Materiales de Construcción*, 16(124), 17–30. <https://doi.org/10.3989/mc.1966.v16.i124.1696>
- Henaó Arrieta, A. P., García Palacio, D. F., Rodríguez, J. E., Hoyos Machado, Á. M., López, M. E., & Gómez Álvarez, C. (2016). Caracterización térmica, química y mineralógica de un tipo de arcilla roja propia de la región andina Colombiana, empleada para la producción de ladrillos para construcción. *Revista Colombiana De Materiales*, 9(9), 59–63. <https://doi.org/10.17533/udea.rcm.326494>
- ICONTEC (2018a). NTC 4205. Ingeniería civil y arquitectura. Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos. *Norma Técnica Colombiana*, <http://www.cytarcillasyprefabricados.com/wp-content/uploads/2017/02/NTC-4205-Unidades-de-mamposteria-de-arcilla-ladrillos-y-bloques-ceramicos.pdf>

- ICONTEC. (2018b). *Norma Técnica Colombiana 4017*. <https://qdoc.tips/norma-tecnica-colombiana-4017-pdf-free.html>
- Isel Cáceres, V., Sánchez-Molina, J., & Chaparro-García, A. L. (2017). Evaluación de arcillas caoliniticas-illiticas provenientes de la formación guayabo del Area Metropolitana de Cúcuta, Norte de Santander, Colombia *Revista ION*, 30(1), 117–127. <https://doi.org/10.18273/revion.v30n1-2017009>
- Manco-Jaraba, D. C., Martínez-Contreras, C. A., Gómez-Jiménez, J. E., Giraes-Puerta, D. L., & Molina-Arenas, S. I. (2020). Caracterización fisicoquímica de las arcillas utilizadas en la preparación de pastas cerámicas para la producción de los lotes de ladrillo tipo h-10 en la empresa Ladrillera Valledupar s.a.s. (Colombia). *Aibi Revista de Investigación, Administración e Ingeniería*, 8(3), 54–59. <https://doi.org/10.15649/2346030X.850>
- 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/NoSeriadas/Documents/recursos-minerales-de-colombia-vol-1.pdf>
- 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/10.5989/mc.1966.v16.i124.1695>
- Thorez, J. (1976). Practical identification of clay minerals: a handbook for teachers and students in clay mineralogy. Universite de Liege.