

CARACTERIZACIÓN DE LAS ARCILLAS DE SOGAMOSO

SECCIÓN III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las características físicas, químicas, mineralógicas y térmicas condicionan las propiedades y usos de las arcillas, e influye en la calidad de los productos terminados, como lo son las artesanías. Aunque todos los niveles arcillosos muestreados corresponden a la misma formación geológica, se identificó que el comportamiento físico y térmico varía entre las muestras.

El análisis granulométrico determinó que las muestras (GQ1, GQ2, GQ3 y GQ5) corresponden a arcillas y limos inorgánicos (GQ4), de mediana y ligera plasticidad ($IP > 10\%$) (Tabla 2) aptas para la fabricación de cerámicos por el bajo riesgo de fracturas durante el proceso de extrusión (Özkan, 2017), además de presentar características de baja plasticidad, lo cual evita la generación de fracturas durante el proceso cocción (I. Bernal et al., 2003).

La muestra GQ3 presentó una variabilidad granulométrica en el contenido de arena (16%) que supera la distribución en los demás niveles (0.17 – 3.46 %) y modifica los tiempos de secado en las piezas cerámicas; a medida que aumentan los contenidos de cuarzo, es necesario incrementar la temperatura de cocción para reducir la porosidad de la pieza; mientras que a bajas temperaturas se tendrá mayor absorción de agua y baja resistencia mecánica (Flórez-Vargas et al., 2018). Las curvas granulométricas se presentan en el anexo B.

SECCIÓN III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 2

Clasificación descriptiva de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS)

Caracterización física		
Muestra	Clasificación USCS	
GQ1	CL	Arcilla inorgánica de mediana plasticidad
GQ2	CL	Arcilla inorgánica de mediana plasticidad
GQ3	CL	Arcilla inorgánica de mediana plasticidad
GQ4	ML-OL	Limo - arcilla de mediana plasticidad
GQ5	CL	Arcilla inorgánica de mediana plasticidad

A través de la técnica de fluorescencia de rayos X se determinaron contenidos de sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3) recurrentes, óxido de hierro (Fe_2O_3) bajo, así como porcentajes variables de óxidos de Ca, Mg, S, K, Na y P (Tabla 3). Los resultados son concordantes con el ambiente de depósito de la Formación Arcillas de Socha, que corresponde a llanuras aluviales de inundación con canales que distribuyen el agua y los sedimentos a un cauce principal (Ulloa et al., 2001); donde hay variabilidad entre los contenidos orgánicos e inorgánicos además de la presencia de minerales característicos de una sedimentación evaporítica.

Las arcillas varicoloreadas indican cambios en los niveles de los pantanos o lagunas, y sus coloraciones tienen fuerte influencia química común en ambientes reductores y ácidos (Pardo Trujillo, 2009). De acuerdo con la tabla de clasificación de Munsell, las muestras presentaron variedad de colores: la GQ1 se catalogó como café rojizo oscuro (10R 3/4), la GQ2 como café amarillento moderado (10YR 5/4), la GQ3 como café amarillento pálido (10YR 6/2), la GQ4 como café rojizo (10R6/2) y, por último, la GQ5 como rojo pálido (10R 6/2).

CARACTERIZACIÓN DE LAS ARCILLAS DE SOGAMOSO

El beneficio de las arcillas está condicionado por su composición química, sus propiedades térmicas y la ocurrencia de impurezas tales como fragmentos líticos, cuarzo, micas, feldspatos, óxidos de hierro, carbonatos, materia orgánica, entre otros. Por ejemplo los contenidos de alúmina inciden sobre la capacidad refractaria y óxidos de hierro modifican los colores finales de las piezas (Cáceres et al., 2021)

Los resultados de la fluorescencia de rayos X suministran información preliminar que orienta los análisis de difracción de rayos X, de manera que las bases de datos cristalográficas se ajustan sobre elementos específicos. Aunque la composición química entre las muestras presenta baja variabilidad, esta técnica se limita a identificar los elementos en funciones de óxidos y no discrimina entre las fases minerales.

Tabla 3

Resultados del Análisis de Fluorescencia de Rayos X (FRX)

Fluorescencia de rayos X									
Muestra	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃	K ₂ O (%)	Na ₂ O	P ₂ O ₅ (ppm)
1GQ	72.48	21.3	4.14	0.18	0.27	366 ppm	0.93	740 ppm	692
2GQ	69.05	22.84	5.39	0.21	0.34	0.10%	1.28	0.17%	480
3GQ	69.95	21.80	-	0.21	0.45	242 ppm	1.06	0.14%	-
4GQ	71.33	21.21	4.90	-	0.66	199 ppm	1.38	-	-
5GQ	73.9	20.26	3.39	0,24	0,46	317 ppm	1.11	910.6 ppm	-

Nota. Se muestra la composición química de las arcillas de la vereda Pantanitos.

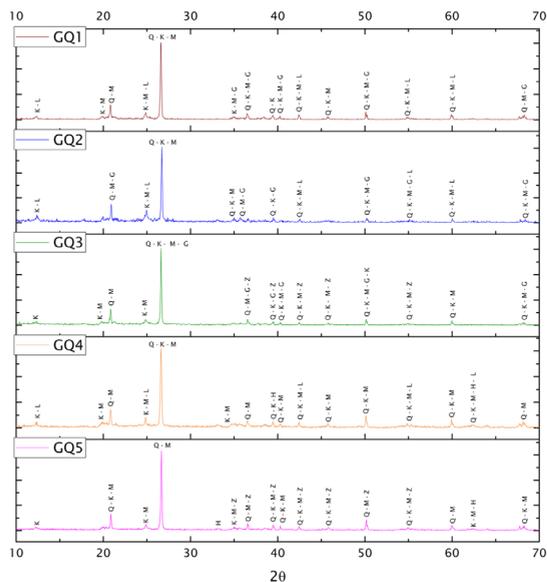
El análisis semicuantitativo de las fases cristalinas realizado mediante el refinamiento por el método de Rietveld permitió identificar la composición de las muestras (Figura 17).

SECCIÓN III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se determinaron fases de cuarzo, minerales arcillosos constituidos por aluminosilicatos hidratados con algunas impurezas como hierro y calcio, caolín, montmorillonita, zeolita y lizardita (Tabla 4).

Así como fases de óxidos de goethita, hematita, que son coherentes con los resultados de FRX y los análisis previos realizados por otros autores (Curtidor et al., 2014) (Sánchez & Vargas, 2009). Las arcillas tienen carácter caolinitico-illítico; el contenido de potasio en la estructura de la illita puede influir en la capacidad fundente durante el proceso cerámico, mientras que el cuarzo proporciona un control dimensional (Flórez-Vargas et al., 2018), (I. Bernal et al., 2003).

Figura 17
Difractogramas de las muestras de arcillas



Nota. Cuarzo (Q), Caolinita (K), Goethita (G), Lizardita (L), Montmorillonita (M), Zeolita (Z), Hematita (H). Tamaño de paso de 2θ y un rango de medición de 5-70° durante 21 minutos.

CARACTERIZACIÓN DE LAS ARCILLAS DE SOGAMOSO

Tabla 4

Resultados Difracción de Rayos X

Muestra	Cuarzo (%)	Caolinita (%)	Montmorillonita (%)	Goethita (%)	Hematita (%)	Lizardita (%)	Zeolita (%)
GQ 1	77.4	15.9	4.9	1.5	-	0.3	-
GQ 2	33.9	51.4	11.9	0.7	-	2.2	-
GQ 3	75.5	13.1	9.9	1.1	-	-	0.5
GQ 4	71	17.7	5.4	-	4.9	1	-
GQ 5	83.5	0.8	12	-	3.1	-	0.7

En el estudio de los espectros FTIR se identificaron distintas formas de minerales que componen las arcillas, entre ellos caolinita, cuarzo, montmorillonita, illita, hematita y magnetita, que predominan en todas las muestras.

Se consideraron las bandas y asignación de enlaces observadas en el rango de 400 y 4000 cm^{-1} según se indica en la Tabla 5. El procesamiento de los espectros de infrarrojo a través de transformada de Fourier indicó que los datos son correlacionables con el ensayo de DRX, y ratifican las fases cristalinas que presentaron las muestras (Figura 18). En los minerales de arcilla las bandas de absorción que producen los grupos OH estructurales Si-O son muy importantes para la diferenciación entre fases cristalinas. Algunos minerales se caracterizan por la disposición de apilamiento de sus hojas y por la ocupación de los iones en los sitios octaédricos y tetraédricos (Madejova, 2003).

El estiramiento en la región OH de la caolinita muestra 3 bandas importantes (3694, 3620, 1024 cm^{-1}), en la Figura 18 se observaron 3 picos principales de 3694, 3620 y 1034, que corresponden a la ubicación de estiramiento acoplada en fases de la superficie perpendicular OH, confirmando la hidratación del mineral de arcilla (Sivakumar et al., 2012) (Hariprasath & Rajesh, 2015), (Saikia et al., 2016).

SECCIÓN III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se observó una banda de 1633 cm^{-1} , que corresponde a las vibraciones H-O-H de agua absorbida en las muestras (Madejova, 2003); (Nayak & Singh, 2007); (Shoval & Beck, 2005). Las vibraciones de Si-O generaron picos fuertes y bien resueltos en las bandas de frecuencia de 1120 a 1000 cm^{-1} correspondientes a bandas para las vibraciones de estiramiento asimétricas de Si-O-Si, que confirman la presencia de cuarzo en todas las muestras, al ser el mineral más resistente durante el proceso diagenético, el más común en las rocas y el segundo más presente en la corteza terrestre (Hariprasath & Rajesh, 2015).

Se identificaron picos relevantes en 1020 y 910 cm^{-1} que representan las bandas de flexión de Al_2OH de los minerales de caolinita provenientes del grupo OH. Finalmente, se presentaron algunos picos débiles en las bandas de frecuencia de 776 y 633 cm^{-1} relacionados con vibraciones perpendiculares de Si-O. (Hariprasath & Rajesh, 2015; Rahmalia et al., 2018; Saikia et al., 2016; Sivakumar et al., 2012; Yin et al., 2019), así mismo, se identificó hematita en las bandas de $582,578$ y 564 cm^{-1} y magnetita en la banda 633 cm^{-1} debido al estiramiento simétrico de Fe-O (Saikia et al., 2016).

CARACTERIZACIÓN DE LAS ARCILLAS DE SOGAMOSO

Tabla 5

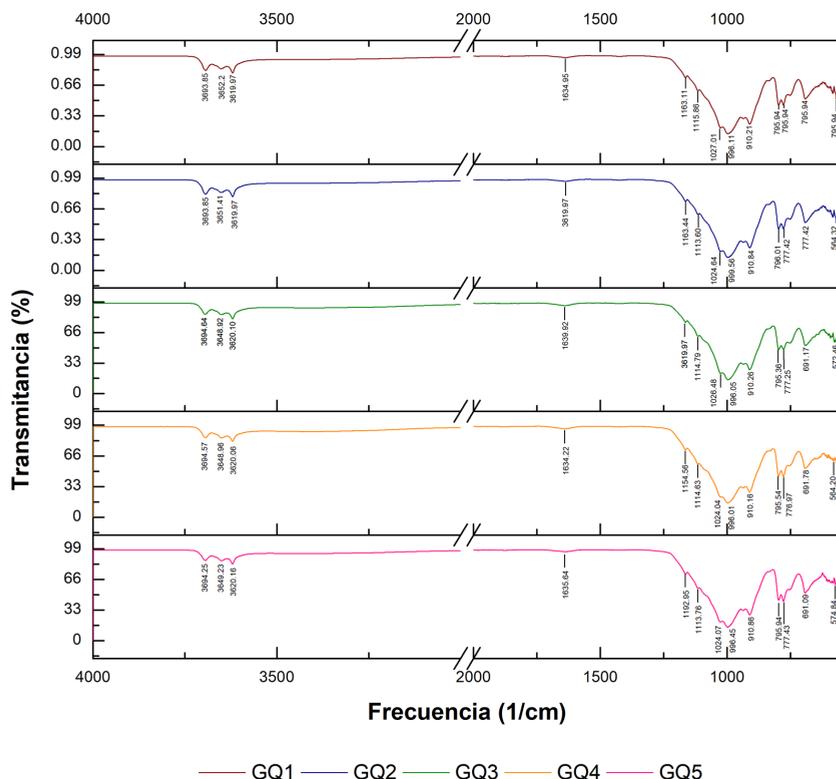
FTIR de las muestras de arcilla de la vereda Pantanitos

Mineral	Formula química	Banda de frecuencia	Asignación
Caolinita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	3694, 3620, 1024	(OH) Estiramiento acoplada superficie perpendicular -OH Vibraciones acopladas de los grupos OH
Cuarzo	SiO_2	1163, 1113, 795, 777	Vibraciones perpendiculares de Si-O
Montmorillonita	$(Na, Ca)_{0.3}(Al, Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2nH_2O$	1024, 996, 935, 910	Vibraciones de estiramiento asimétricas de Si-O-Si. Flexión de Al_2OH de los minerales de caolinita provenientes de vibraciones del grupo OH
Illita	$(K, H_3O)(Al, Mg, Fe)_2(Si, Al)_4O_{10}[(OH)_2, (H_2O)]$	777, 691	Vibraciones perpendiculares de Si-O
Hematita	Fe_2O_3	582, 578, 564	Estiramiento simétrico de Fe-O
Magnetita	Fe_3O_4	633	

SECCIÓN III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Figura 18

Espectros de Infrarrojo de las muestras de arcilla de la vereda Pantanitos



Nota. Se muestran los picos relevantes en las bandas de frecuencia de 3800 a 400 cm^{-1} .

A través del análisis térmico se determinaron los cambios de peso que en cada muestra en función de la temperatura bajo una atmósfera controlada. Se identificó la pérdida de masa del material durante el calentamiento, contracción y deformación de las figuras por fenómenos físicos y químicos (Añez, 2006).

CARACTERIZACIÓN DE LAS ARCILLAS DE SOGAMOSO

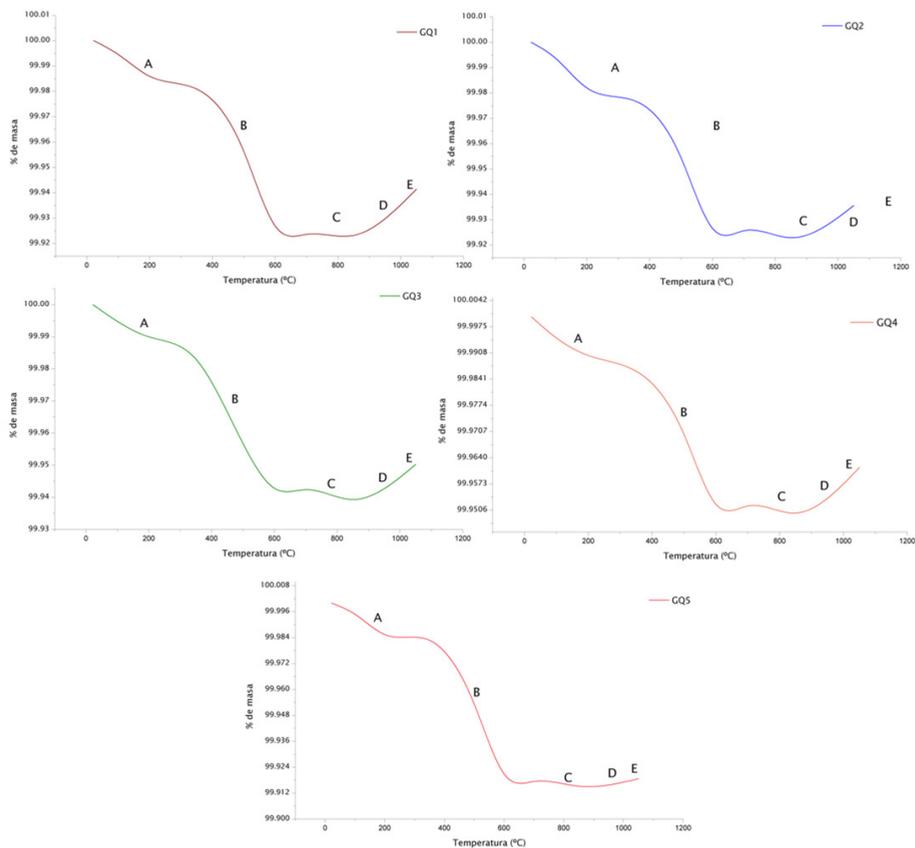
En los análisis TGA (Figura 19) se generó una primera pérdida de masa relacionada con la eliminación de agua absorbida químicamente (aguas connatas, de formación, de adherencia) (Schlumberger, 2020) entre los 100 y 200 °C (Castrillón et al., 2016); pérdida de masa por deshidroxilación, asociada con la liberación de agua en la moscovita en el rango de 400 – 700 °C; la expulsión del agua residual restante en la red cristalina de los minerales arcillosos genera el rompimiento de su estructura a los 800 °C, a partir de esta temperatura empieza la formación de silicatos amorfos lo que provoca una fuerte contracción con pérdida de porosidad. La formación de metacaolín y reordenamiento de las estructuras cristalinas de silicatos de aluminio anhidro ocurre con liberación de sílice amorfa entre los 850 – 900 °C; los procesos de sinterización comienzan desde los 950 °C y hasta los 1050 °C en el cual se mantiene la recristalización; la formación de mullita se produce por encima de los 1000 °C (Cáceres et al., 2021) (Sánchez & Vargas, 2009).

Los cambios de fase se explican a partir de las propiedades que aporta cada mineral dentro del proceso de cocción, los feldespatos actúan como fundentes y constituyen las fases finales del vidrio residual. La porosidad y la difusión gaseosa en el interior de la pieza se modifican durante vitrificación, esenciales para controlar las reacciones de oxidación en algunos componentes de las pastas cerámicas (Añez, 2006).

SECCIÓN III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Figura 19

Curvas Termogravimétricas de las muestras de arcillas



Nota. Cambios de fases A. Eliminación de agua absorbida B. pérdida de masa por deshidroxilación C. Pérdida del agua residual restante D. Presumiblemente empieza la formación de silicatos amorfos E. Procesos de sinterización.

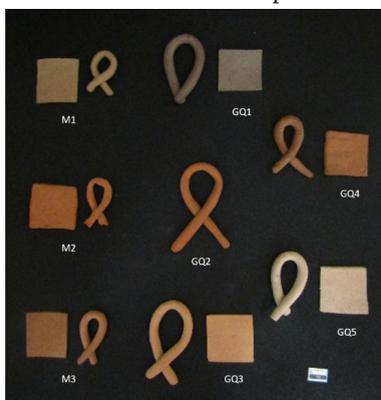
CARACTERIZACIÓN DE LAS ARCILLAS DE SOGAMOSO

El cuarzo contenido en las arcillas empleadas por las alfareras de ASOAMME para la elaboración de artesanías probablemente provoca el rompimiento de las piezas durante la cocción, debido a que éste interviene como ingrediente para controlar la plasticidad de las pastas, contracción de secado y cocción. Asimismo, influyó en la porosidad, y aumentó la velocidad de secado de las piezas modeladas. La disminución de la contracción de secado reduce el riesgo de agrietamiento y deformación de las piezas (Añez, 2006).

El comportamiento de las arcillas durante los cambios de temperatura y la composición mineralógica influye en las propiedades mecánicas, físicas y térmicas de las pastas cerámicas, así como, la consolidación y formación de una estructura sólida durante la cocción (Figura 20); las rampas de calentamiento y enfriamiento afectan la densidad, la porosidad, la contracción y la resistencia de las piezas cerámicas; en consecuencia, el control cuidadoso de estos parámetros permite una sinterización adecuada, mayor densificación de las piezas cerámicas y productos de alta calidad (Özkan, 2017).

Figura 20

Probetas de arcillas para análisis TGA



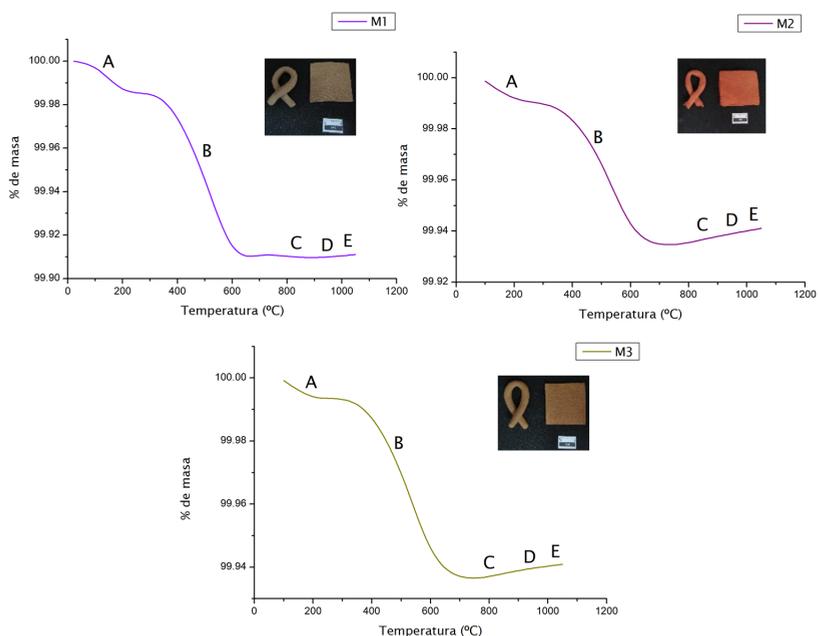
Nota. Placas y moños cocinados para verificar apliques y el comportamiento de curvaturas durante la cocción.

SECCIÓN III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizaron tres mezclas 1:1 de las muestras para complementar el estudio, estas fueron M1 (QG1 y GQ3), M2 (QG3 y GQ4) y M3 (GQ2 y GQ5), los resultados se observan en la Figura 21; las curvas se comportaron de manera similar a las iniciales, sin embargo, las fases de vitrificación son casi imperceptibles con mayor tendencia a la fracturación y a la pérdida de calidad durante el proceso de beneficio.

Figura 21

Curvas Termogravimétricas de las mezclas de arcillas



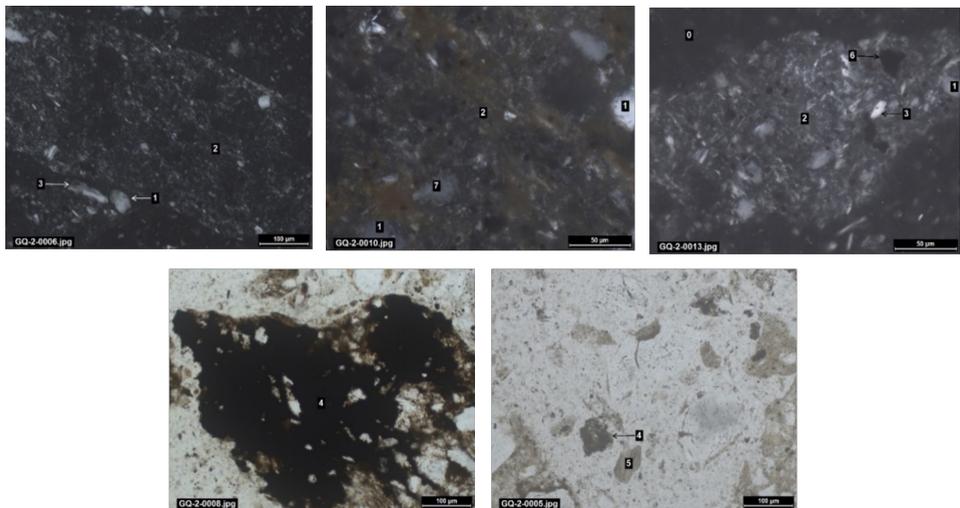
En el análisis petrográfico de los minerales presentes en la muestra GQ2 (ver Figura 22) y con la ayuda fotográfica de 800 pixeles, se clasificó la agrupación mineralógica, como una lodolita arenosa según el diagrama de Folk, 1970 (Folk, 1974) (Apéndice G).

CARACTERIZACIÓN DE LAS ARCILLAS DE SOGAMOSO

Por microscopía electrónica de barrido SEM (ver Figura 23), se identificaron estructuras laminares en su mayoría con escamas y bordes rotos, las partículas enrolladas parecen indicar la presencia de caolinita desordenada (Milošević & Logar, 2017). La morfología es coherente con el empaquetamiento atómico de los filosilicatos en una red monoclinica.

Figura 22

Imágenes microscópicas de la sección delgada en diferentes aumentos



Nota. A. 1000x tomadas en el microscopio LEICA DM4500P con polarizadores cruzados y paralelos. 0. Vacío 1. Cuarzo 2. Minerales arcillosos 3. Moscovita 4. Óxidos de hierro 5. Trazas de preñdita 6. Pirita 7. Ortoclasa 8. Pedernal.

SECCIÓN III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

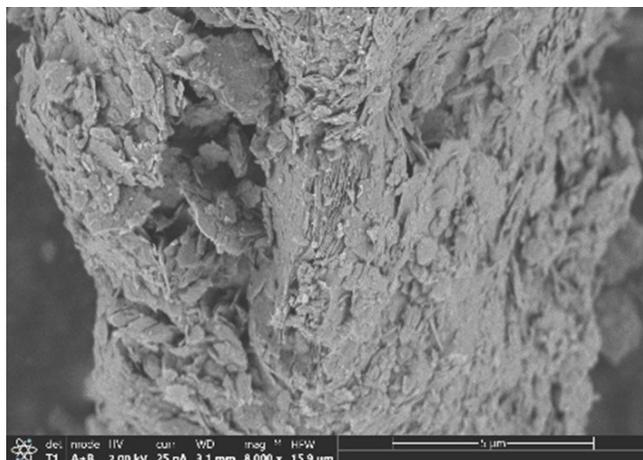


Figura 23

Microfotografía SEM muestra GQ2

Las muestras analizadas presentan características similares en la composición química, las fases cristalinas, grupos funcionales, comportamiento térmico y propiedades físico-cerámicas tales como la resistencia mecánica, dureza, conductividad térmica y resistencia al desgaste; en correspondencia, es muy probable que las pastas cerámicas derivadas de ellas sean aptas para el proceso alfarero. Además, la ocurrencia de fases cristalinas similares, en presencia de diferentes reactivos químicos, derivan en comportamientos térmicos y propiedades físicas análogas.

A partir de la caracterización fisicoquímica, mineralógica y petrográfica de las arcillas empleadas como materia prima en la elaboración de artesanías, se concluye que las muestras estudiadas son aptas para producir piezas cerámicas; sin embargo, se sugiere un modelo de cocción controlado para evitar daños y pérdida de material, se consideraron aspectos como la preparación, el moldeado y el secado previo de las arcillas.

CARACTERIZACIÓN DE LAS ARCILLAS DE SOGAMOSO

Diagnóstico y aportes al proceso alfarero artesanal

De acuerdo con lo recomendado por (Özkan, 2017), el trabajo de las arcillas se debe realizar bajo condiciones de humedad y plasticidad promedio inferiores al 10%, por lo tanto, se sugiere controlar el nivel de saturación de las muestras y secarlas en un lugar con buena ventilación, sin luz directa del sol; la pérdida de humedad de manera abrupta provoca que las piezas se fracturen con facilidad, por ejemplo en materiales con bajos contenidos de montmorillonita (Cáceres et al., 2021), (Amado et al., 2011).

El uso de leña o carbón es poco favorable para el control de la temperatura y la pérdida gradual de la humedad, se recomienda que la difusión del calor sea uniforme dentro del horno y el flujo de llama esté a una distancia considerable de la pieza cerámica; además, es necesario disponer las artesanías separadas unas de otras en bandejas resistentes. Se aconseja retomar los procesos de cocción que utilizan el gas propano, debido a que la distribución de calor se estabiliza y controla a través de condiciones programables y de monitoreo, por ejemplo, con una termocupla.

Con base en la caracterización descrita previamente, se identifica que las materias primas son aptas para la fabricación de artesanías solo cuando se trabajan de manera independiente, ya que las mezclas reducen su calidad.

Para el nivel arcilloso correspondiente a la muestra GQ2 se recomienda realizar un tamizado extra o usar en otros productos como ladrillos, tejas, bloques y otros materiales de construcción, debido a la presencia de granulometrías tamaño arena (>2 mm).

En el proceso de elaboración de artesanías, se evidenció que durante la cocción en los hornos artesanales se presentaban inconvenientes

SECCIÓN III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

relacionados con el gradiente de temperatura (Figura 24); los rangos eran inapropiados para el material y el flujo de calor carecía de control. La temperatura aumentaba drásticamente en lapsos de corta duración, además la humedad se liberaba de manera abrupta y se generaban fracturas en las piezas cerámicas finales.

Figura 24

Piezas cerámicas que presentan daños después de la cocción



La recomendación que se comparte al grupo de ASOAMME hace referencia al control de la curva de temperatura de cocción, la cual consiste en programar un valor de referencia y mantenerlo durante un tiempo específico, así: 200 °C en 90 minutos y mantener durante 20 minutos; 500 °C en los siguientes 100 minutos; 700 °C en los próximos 200 minutos; y finalmente, 1050 °C en los últimos 75 minutos que se conserva durante 120 minutos; luego se apaga el horno y se deja enfriar progresivamente.

CARACTERIZACIÓN DE LAS ARCILLAS DE SOGAMOSO

Este proceso se implementó en la etapa final de la investigación en el taller de ASOAMME mediante el uso de una termocupla como instrumento de control para la cocción de las artesanías.

Conclusiones y Recomendaciones

Se caracterizaron 5 niveles de arcillas correspondientes a la Formación Arcillas de Socha en la vereda Pantanitos, que presentan características similares, tales como: fases cristalinas, grupos funcionales, comportamiento térmico y propiedades cerámicas, que permiten que las materias primas puedan ser tratadas de manera similar.

Los análisis de las muestras por FRX indicaron que la sílice y alúmina están en mayor concentración seguido por óxidos de hierro, y otras trazas como óxidos de Ca, Mg, S, K, Na y P, los análisis semicuantitativos de DRX relacionan las principales fases cristalinas, cuarzo, caolín, montmorillonita, goethita y hematita y en menor cantidad lizardita y zeolita; así mismo, las bandas de absorción por FTIR corroboran los enlaces químicos con las fases cristalinas. Finalmente, a nivel textural y de plasticidad, las muestras corresponden a arcillas y limos inorgánicos de mediana plasticidad.

La curva de cocción del TGA se estableció teniendo en cuenta la composición mineralógica para permitir las transformaciones químicas y físicas en la pasta cerámica; el uso de una la termocupla le permite a la asociación controlar la temperatura del horno durante la cocción de las piezas y prevenir las fracturas en las artesanías finales. Las propiedades evaluadas permiten inferir desde la perspectiva mineralógica, que estas arcillas son aptas para la fabricación de artesanías, con relación a los contenidos de caolinita, illita, y montmorillonita.

Se identificaron fallas durante el proceso de elaboración de artesanías relacionadas con el control de la temperatura y contenido de humedad durante la cocción; aunque las arcillas son adecuadas para el uso alfarero, se recomienda evitar las mezclas y trabajarlas de

SECCIÓN III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

manera independiente; además es necesario hacer caracterizaciones periódicas ya que puede existir variación lateral en el yacimiento.

La comunidad está dispuesta a mejorar su proceso en condiciones específicas que contemplen su territorio y sus ideas, esta necesidad es prioritaria para adaptar un proceso en el marco de la sostenibilidad como lo define la ONU.