

MINERALES ARCILLOSOS DEL ECUADOR. PROTOCOLO DE CATEGORIZACIÓN CERÁMICA: UNA REVISIÓN

CLAY MINERALS FROM ECUADOR. CERAMIC CATEGORIZATION PROTOCOL: A REVIEW

Rafael Uribe,^{1,2*} Andrés Chico,¹ Nelly Rosas³ & Luis Lascano⁴

Recibido: 1 de octubre 2019 / Aceptado: 18 de diciembre 2019

DOI: 10.26807/ia.v8i1.125

Palabras clave: Arcillas, caracterización cerámica, minerales arcillosos, minerales no metálicos, propiedades cerámicas.

Keywords: Clays, ceramic characterization, clay minerals, non-metallic minerals, ceramic properties.

RESUMEN

Para el sector cerámico europeo resulta natural reconocer y distinguir, dentro de una mina o afloramiento de mineral arcilloso, propiedades similares y de-

1 Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Ingeniería Química. PO-Box 17-01-2759, Quito-Ecuador. (* correspondencia: rafael.uribe@epn.edu.ec ; andres.chico@epn.edu.ec)

2 Instituto Universitario de Tecnología “Dr. Federico Rivero Palacio”, Dpto. de Tecnología de Materiales, PO-Box 40347, Caracas 1040-A, Venezuela.

3 Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Materiales. PO-Box 17-01-2759, Quito, Ecuador (nelly.rosas@epn.edu.ec)

4 Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Física. PO-Box 17-01-2759, Quito, Ecuador. (luis.lascano@epn.edu.ec)

terminar correspondencias beneficiosas entre la naturaleza mineral. Así, es posible prever el potencial de uso de un lote, concertar su influencia en producción y prevenir las variaciones que generan pérdidas, minimizan la productividad y la calidad en los productos. En Latinoamérica, y en especial en el Ecuador, es escasa la información que se tiene sobre las propiedades tecnológicas de las materias primas utilizadas en el sector cerámico. Pocos industriales, artesanos y centros de investigación realizan estudios formales para minimizar y controlar el efecto de las materias primas en la productividad. Dada la falta de conocimiento que se tiene para abordar esta problemática, en este trabajo se plantea la descripción de un protocolo de caracterización y categorización cerámica mineral. Protocolo que se valida con la exposición de las características tecnológicas y cerámicas de minerales arcillosos, pertenecientes a la Sierra del Ecuador, su clasificación y potencial de aplicación dentro del sector cerámico, a partir del uso del protocolo de categorización propuesto.

ABSTRACT

For the European ceramic sector, it is natural to recognize similar properties within a mine or mineral clay outcrop and to determine useful correspondences between the mineral nature and its properties. Thus, it is possible to predict the potential use of a batch of mineral, to agree on its influence on production and to prevent changes that could generate losses, minimize productivity and affect the quality of the products. In Latin America, and especially in Ecuador, there is a lack of information regarding the technological properties of raw materials used in the ceramic sector. Indeed, only a few industrials, artisans and research centers carry out formal studies to minimize the effect of raw materials in productivity and to control it. Given the lack of knowledge to address this problematic, this paper suggests the description of a protocol for the characterization and categorization of clay minerals, that could be used for both the artisanal and the industrial ceramic sector. In this way, this work has focused on exposing the technological and ceramic characteristics of clay minerals from Ecuador's highlands, establishing its classification and presenting its potential application within the ceramic sector, based on the proposed categorization protocol.

INTRODUCCIÓN

Todos los fabricantes de piezas cerámicas parten de un origen común, el consumo de minerales arcillosos, diferenciando sus productos a partir de las innovaciones propias introducidas en los procesos de producción artesanal o industrial, donde se emplean tecnologías tradicionales y/o modernas de fabricación (Uribe, 2015). Los minerales arcillosos se originan de la descomposición de rocas feldespáticas, cuyo componente principal es la caolinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), estos son utilizados en diversas aplicaciones que van desde la industria cerámica, la del cemento hasta otras industrias como la del papel, pintura, pesticidas, farmacéuticos y cosméticos, entre otras (Guillén, Briviesca & Escudero, 2012).

Las materias primas minerales usadas en la obtención de piezas cerámicas son principalmente sólidos cristalinos inorgánicos no metálicos, los cuales han sido formados por procesos geológicos complejos (Vázquez, Torres, Garza, Martínez & López, 2009). Las propiedades de las piezas cerámicas están determinadas principalmente

por la estructura cristalina, la composición química de sus constituyentes esenciales y por la naturaleza y cantidad de los aditivos minerales presentes. Las características mineralógicas de tales materiales y por lo tanto sus propiedades cerámicas están sujetas a la gran variación que existe entre las diferentes ocurrencias o aún entre la misma ocurrencia, dependiendo del ambiente geológico en el cual se formó el depósito mineral, así como también de las modificaciones físicas y químicas que hayan tenido lugar durante la historia geológica posterior (Uribe, 2015).

De manera general, el valor económico de los minerales arcillosos tiende a ser bajo en relación directa con la cantidad de impurezas que contienen, se comercializan a granel, se clasifican de acuerdo con su coloración y su procesamiento consiste básicamente en las mezclas de extracción y en el mejor de los casos en algún tipo de molturación. Las diversas aplicaciones de estos minerales en procesos industriales dependen de su mineralogía y de las propiedades físicas, así por ejemplo el tamaño de

partícula afecta la fluidez, la plasticidad y la facilidad de dispersión de las pastas utilizadas (Espinosa, 1979). Las impurezas mineralógicas de los caolines afectan la refractariedad, resistencia mecánica, estabilidad térmica y las transformaciones de fase que ocurren durante el quemado. La relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ es fundamental en la respuesta térmica de los minerales arcillosos, el contenido de alúmina determina la plasticidad de la pasta, el índice de contracción, la refractariedad y la resistencia mecánica de las piezas cerámicas. Por ejemplo, contenidos de óxido de hierro y titanio superiores al 1 % afectan de manera significativa la producción de cerámica blanca, aportando cambios en la coloración y manchas no deseables durante la cocción de las piezas (Guillén et al., 2012).

Cuando la empresa se limita solo a realizar los ensayos más básicos sobre su materia prima (por ejemplo: rechazo sobre malla ASTM 100 u otra, color y contracción de cocción), el efecto de tales variaciones es a menudo supuesto de manera meramente intuitiva y a veces, simplemente, ignorado en la toma de decisiones. Por ello, se suelen sufrir los efectos

de la entrada de una materia prima variable, sobre los parámetros claves de producción, con escasas posibilidades de prevenirlos y con muchas dificultades para compensarlos. Por ejemplo, en el caso de la producción de baldosas, se pueden mencionar como parámetros claves: la fluidez de la pasta, su molturabilidad; la permeabilidad de la mezcla y su efecto en la humedad de los gránulos de atomización y de las baldosas al salir del secadero; la plasticidad de la mezcla y su efecto en el módulo de rotura en crudo y en seco de las piezas prensadas y el comportamiento en el horno, reflejado entre otros por la absorción de agua y la contracción de quema. Las fallas de productividad y de la calidad, y con ellas las pérdidas económicas, son una consecuencia de esta variación poco entendida y/o ignorada de las características de la mina o afloramiento mineral (Amorós, 1998).

En Latinoamérica y en especial en el Ecuador en pleno siglo XXI, la mayoría de la producción cerámica artesanal o industrial, es particularmente empírica “práctica-vivencial”, en el sentido de que el control de las materias primas, la preparación de las

pastas, el conformado de piezas y la cocción se hace sin el empleo de protocolos de control de los parámetros técnicos y claves de producción, incluso sin contar con aparatos simples de medida de alguna variable. La producción depende de la experiencia, el criterio y la sensatez del encargado del proceso, se utilizan los dedos para conocer la plasticidad de una arcilla y los ojos para certificar la temperatura óptima de cocción de los productos (Poirier, Baena, Picardo & Hung, 2014).

Hoy en día, por el contrario, el responsable de la producción debe estar al corriente y controlar una serie de especificaciones, debe plasmar en números sus resultados e ideas y para esto no bastan los sentidos. Cuanto mayor es el grado de automatización, mayor es la necesidad de la uniformidad del producto. Por ello es por lo que en la industria cerámica se vuelve fundamental el uso de protocolos y ensayos precisos, pues a través de estos se controla el fin último de la industria, es decir, la producción (Amorós, 1998).

Los ensayos deben ser de ejecución rápida, para poder ejercer una acción

correctora en el momento justo. Resulta así indispensable en toda producción artesanal o industrial, realizar controles y ensayos de forma periódica y habitual, sin esperar a que se presenten los problemas de desajuste o descontrol de la producción, pues entonces suele ser demasiado tarde para evitarlos y ello representa mermas en la productividad e importantes pérdidas de dinero.

En cualquier caso, para poder remediar un defecto, se hace preciso conocer perfectamente sus condiciones y características en estado normal de operación y para ello nada mejor que los ensayos precisos y cotidianos. Los ensayos por realizar deben adaptarse a las circunstancias de cada empresa, su presupuesto y tipo de fabricación deben irse perfeccionando y, a medida que la tecnología avanza, irse cambiando por otros más adecuados e innovadores (Torres, Gutiérrez, Castelló, & Vizcayno, 2011).

En cuanto al uso de minerales arcillosos hay solamente dos posibilidades de control, en el proceso de fabricación de piezas de cerámica: cambiar incesantemente los parámetros de los procesos en función del análisis fre-

cuento y sucesivo realizado a la materia prima o uniformizar la materia prima, de tal manera que el control de procesos puede limitarse a ajustar eventualmente los niveles de los parámetros hacia la mejor calidad del producto (Amorós, 1998).

El primer caso resulta bastante difícil debido a la alta inercia de los procesos de producción y el elevado costo del análisis y caracterización de cada lote de materia prima introducido al proceso. Parece entonces más beneficiosa la segunda alternativa, debido al ahorro concreto en el costo de los análisis tecnológicos y al mejor control de los parámetros de producción, ya que se proyecta homogeneizar las materias primas hasta un nivel donde la variación restante no influya significativamente en la calidad del producto.

Dada la importancia que tiene el poseer el control tecnológico sobre las variables que influyen en la elaboración de piezas cerámicas, base que permite obtener piezas con las propiedades y la calidad adecuadas en el servicio, garantizando la reproducibilidad de las mismas, en este trabajo se ha prestado atención a un

importante grupo de trabajos de investigación (ya referenciados y por referenciar). Correspondientes al estudio de yacimientos y afloramientos de minerales arcillosos, los cuales han permitido concretar procedimientos comunes de exploración, caracterización y análisis de este tipo de materias primas y lo más importante describir la naturaleza y comportamiento de minerales primarios y secundarios contenidos en arcillas, determinar fases minerales presentes, definir y clasificar las arcillas según criterios cerámico-geológicos y el ámbito artesanal, industrial o científico de su utilización.

La investigación se ha centrado en el uso de un protocolo de caracterización y valoración de minerales arcillosos, que servirá de guía al sector cerámico artesanal e industrial del Ecuador. Esto nos permite exponer las potencialidades tecnológicas de minerales arcillosos existentes en la Sierra del Ecuador, escogidos como ejemplo de aplicación del protocolo, establecer su clasificación según criterios cerámicos y fisicoquímicos, así como su mejor perspectiva de aplicación en el sector cerámico.

Programa de control y validez de minerales arcillosos

En la Figura 1 se resume el programa de control de minerales arcillosos que se sugiere seguir para asegurar la

validez y el control de las propiedades y características de una materia prima, a ser usada en un proceso de fabricación artesanal o industrial de piezas cerámicas (Paetsch, 1977).

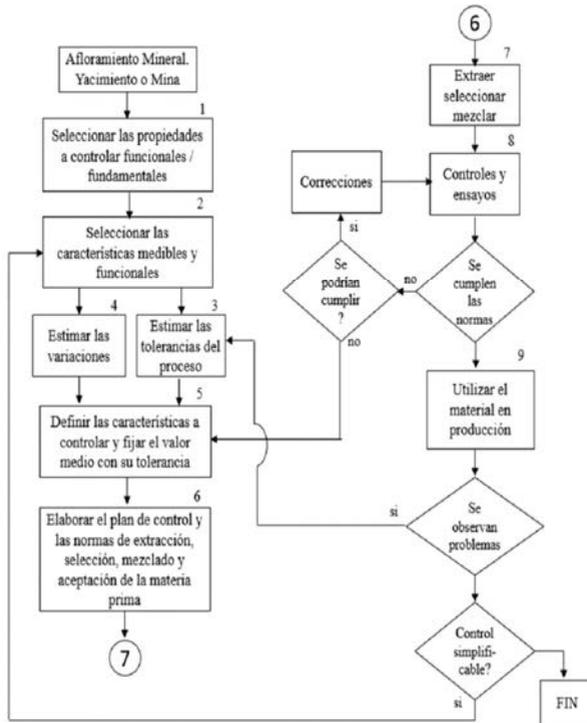


Figura 1. Esquema. Programa de control y validez de minerales arcillosos para uso artesanal y/o industrial cerámico. Basado en Paetsch, 1977

Mitchell (1974) estableció la diferencia entre propiedades fundamentales y funcionales de los minerales,

siendo las últimas las asociadas al control directo y práctico que implica la toma de decisiones oportuna

nas, cuando se detecta alguna desviación en la medida; por ejemplo: el módulo de ruptura de una arcilla, el color de quema, el residuo de cuarzo sobre una malla, etc. Por otra parte, las propiedades fundamentales son las que evidencian la naturaleza física y química del mineral, por ejemplo: la distribución granulométrica, la composición mineral, densidad, etc. Por consiguiente, se estudiará cuidadosamente qué propiedades pueden caracterizar las desviaciones de la materia prima, que influirán directamente en la calidad de subproductos y productos.

Según Paetsch (1973), si la característica es constante, por consiguiente, las demás propiedades del material son igualmente constantes, el método de medición debe ser rápido, económico y con la precisión deseada, y las desviaciones de la característica deben indicar qué medidas deben tomarse para corregir la desviación de materia prima. Por lo general, se deben escoger como mínimo tres características, que en conjunto indiquen si un mineral cumple con las exigencias y puede aceptarse en la producción sin dificultad.

Variaciones de las materias primas causan variaciones más o menos notables en las propiedades del producto. El conocimiento de la tolerancia de un proceso es fundamental para poder establecer el margen dentro del cual la calidad de una materia prima puede variar sin perjudicar la calidad del producto. El paso 6 indicado en la Figura 1 se basa en el diálogo entre el consumidor y el productor de la materia prima, a fin de definir la calidad de la materia prima y su variación. Esta variación del mineral se estima en base al registro cronológico de datos analíticos de varios meses y a los resultados de una serie de experimentos que inquirieron los cambios que sufren las propiedades, en relación con variaciones de la composición normal de la pasta, si no se tienen los registros es hora de corregir (Paetsch, 1977). Cada yacimiento o afloramiento mineral contiene material útil e inútil, pudiendo el material inútil perjudicar las propiedades del resto útil.

Si el yacimiento ofrece los minerales separados por estratos o en bolsa, la separación de minerales es fácil. Por el contrario, si la mayoría de los minerales arcillosos y arenas están ínti-

mamente mezclados no pueden distinguirse y por ende no pueden ser juzgados solo por su apariencia, en este caso la selección se vuelve muy delicada y debe obedecer a protocolos bien específicos (Paetsch, 1977). Tomando en cuenta las dificultades de la extracción y del transporte que se tiene en muchos casos para el estudio de nuevos minerales arcillosos, se recomienda el acopio (preparación de depósitos) de lotes que contengan una cantidad de mineral adecuada al volumen y gasto de producción, ya sea mensual, semestral o anual. Se recomiendan cantidades entre 1-2 toneladas para procesos artesanales y del orden de 3000 toneladas en procesos industriales.

En consecuencia, para mantener los parámetros de producción en sus valores óptimos se necesita, por una parte, establecer un adecuado sistema de homogeneización que consiga uniformizar las distintas calidades de arcilla suministrada y, por otra, realizar una serie de controles que permitan observar la evolución de sus características y, de este modo, discernir si son aptas o no para su introducción en el proceso de fabricación (Amorós, 1998).

A partir de consideraciones estadísticas y de los años de experiencia acumulada en la evaluación de minerales arcillosos, se recomienda tomar del acopio una muestra representativa de entre 5-15 kg. En general, como paso previo a la preparación específica de las muestras y/o probetas objetos de evaluación, se prepara mediante homogeneización y cuarteo una muestra representativa de los distintos minerales arcillosos. Es obvio que la toma de la muestra correcta y su preparación es tan importante como el análisis mismo, sin embargo, hay pocas publicaciones y menos reglas integrales de evaluación de minerales arcillosos.

Para el estudio propiamente dicho de los minerales arcillosos (punto 8, Figura 1), se propone el conjunto de ensayos establecido en el protocolo de análisis delineado en la Figura 2. En este protocolo se pone de manifiesto la idoneidad de la técnica y/o método para la caracterización de los minerales y se analizan los principales indicios y características de los depósitos minerales, efectuándose entre otros estudios granulométricos, mineralógicos, químicos y tecnológicos, que indican el aprovechamiento

más favorable de este tipo de materiales arcillosos.

Cabe indicar que siempre los métodos de preparación de muestra y control seleccionados, en general, deben satisfacer los criterios de rapidez,

sencillez y fiabilidad requeridos para un adecuado control preventivo. Por consiguiente, cada laboratorio, en función de sus posibilidades seleccionará las técnicas que considere más adecuadas.

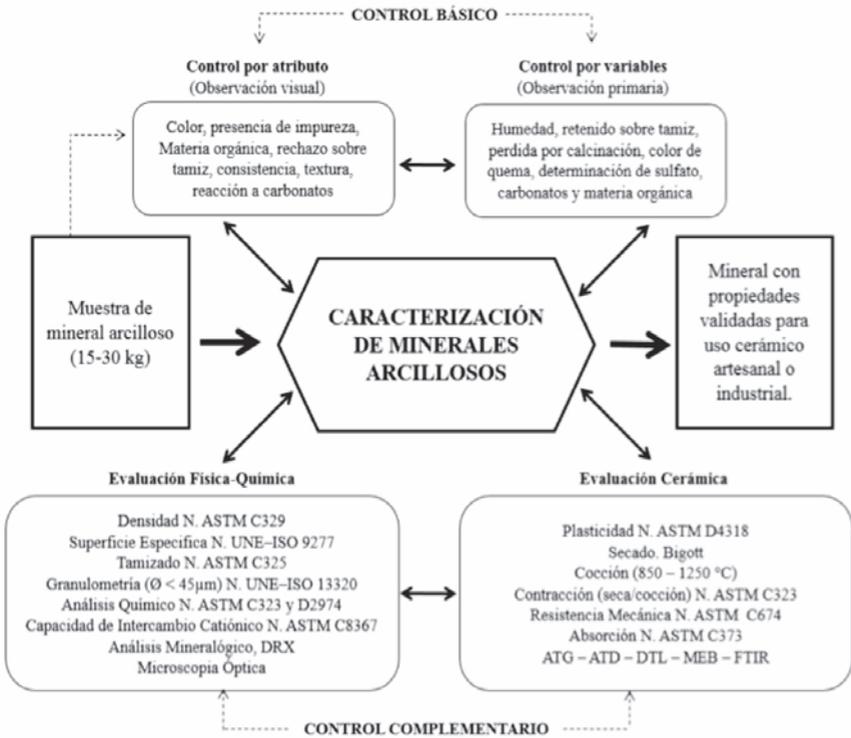


Figura 2. Protocolo de validación de minerales arcillosos para uso cerámico artesanal o industrial

Se establecen en el protocolo propuesto (Figura 2) dos tipos de controles: *el control básico y el complementario*. En el *control básico* se incluyen los ensayos que se caracterizarán por su sencillez y por la rapidez con la que se realizan (no más de 6 horas), y sirven para comprobar, inicialmente, la conformidad o no de la materia prima. En el *control complementario* se incluyen ensayos más exhaustivos, que se llevarán a cabo cuando la muestra no haya superado el control anterior, al objeto de verificar la no conformidad. Estos ensayos podrán ser más complicados, requerir de equipamiento tecnológico especializado y un tiempo de análisis substancialmente mayor (más de 24 horas). Este control también se realiza con el propósito de obtener una caracterización completa de la arcilla, cada cierto periodo de tiempo, por ejemplo, anualmente (Amorós, 1998).

Una vez definidos los tipos de controles por los que se verificará la con-

formidad o no de un determinado lote de mineral es preciso seleccionar los ensayos que deberán ser incluidos en cada uno de estos controles, las características medidas o evaluadas a partir de estos ensayos definirán la calidad de la materia prima. Se deberá otorgar prioridad a aquellas características que sean más sensibles a los cambios fisicoquímicos del material arcilloso y que influyan más sobre el comportamiento de la composición durante el proceso de fabricación, así como sobre la calidad del producto acabado.

Para este estudio se colectaron muestras minerales de la Región Sierra del Ecuador, con diferentes contenidos del mineral arcilloso pertenecientes a distintos afloramientos y minas de explotación artesanal e industrial. Se pone de manifiesto, a través de la evaluación de estos minerales, la idoneidad de las técnicas y/o métodos para la caracterización de los minerales.

RESULTADOS

En este apartado se presentan ejemplos específicos de los resultados de la aplicación del protocolo propuesto en el estudio de los fenómenos asociados.

En los laboratorios o talleres se debe preparar una pasta plástica con la proporción de humedad adecuada para el conformado, de aproximadamente 20%, se debe lograr homogeneizar completamente el mineral otorgándole una plasticidad uniforme, se preparan probetas con dimensiones aproximadas de 5 x 5 x 0.5 cm, a objeto de evaluar el comportamiento del mineral al secado y sometido a distintos ciclos térmicos (entre 850 y 1150 °C), su contracción de secado y cocción, los niveles de absorción y resistencia mecánica alcanzados y color de quema, entre otros.

Control Básico

Las características de las arcillas o parámetros de calidad que se consideran más interesantes de determinar son: el *color natural* del mineral, afectado por la presencia de vetas mine-

rales de distinto color o aglomerados de materia orgánica y óxidos; la *humedad inicial*, referida a la cantidad de agua libre que está presente en las arcillas cuando se extraen de la mina, producto de las condiciones atmosféricas y del clima; la *consistencia*, manifestación de las fuerzas físicas de cohesión y adhesión que actúan dentro de las arcillas, dependiendo de los contenidos de humedad específicos que poseen; y, finalmente, la *textura*, determinada por los componentes minerales (arcilla, sedimento y arena), punto en el cual la arcilla se vuelve maleable y se le puede dar forma (Amorós, 1998).

En la Tabla 1 se observa que las muestras en estado de entrega presentan suficiente homogeneidad en cuanto a su constitución mineral, no evidenciándose la presencia significativa de materiales inertes ajenos a la propia naturaleza mineralógica, así como una excelente sensación al tacto, lo que evidencia de antemano el importante margen de trabajabilidad que poseen las arcillas. Las arcillas son de consistencia extrafirme y firme, lo que implicará que el empleo de estas re-

querirá de equipos desmenuzadores y/o desintegradores, con el objeto de optimizar la eficiencia de molienda, para lograr el tamaño de partículas adecuado para su uso en pastas cerá-

micas. La presencia de aglomerados de color violáceo y rojizo moreno en la Arcilla AR-BO-15-01, sugiere la presencia de materia orgánica y de óxidos de hierro.

Tabla 1. Resultados del control básico de minerales arcillosos de la Sierra del Ecuador. Según protocolo de caracterización cerámica propuesto

PROPIEDADES	Mineral Arcilloso / Materia Prima			
	Arcilla AR-PI-15-01	Arcilla AR-BO-15-01	Arenosa SI-CH-15-01	Arena SI-PI-15-01
Estado de entrega	Terrones gruesos	Terrones gruesos	Terrones desmenuzables	Suelta
Sensación al tacto	Untuosa con presencia de aglomerados extraduros de vetas de arcilla pura	Untuosa con presencia de aglomerados negros de materia orgánica	Árida se rompe antes de manejarla	Árida
Consistencia	Extrafirme	Firme	Frágil	Suelta
Textura	Franco Arcillosa	Arcillosa	Arenosa	Arenosa
Color en estado natural	Beige grisáceo	Marrón	Rojiza	Amarilla
Color beneficiado	Beige	Marrón	Rojiza	Amarilla
Presencia de impurezas	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna
Materia Orgánica	Reacción moderada	Reacción fuerte	Sin reacción	Sin reacción
Carbonatos	Sin reacción	Sin reacción	Sin reacción	Sin reacción
Sulfatos	> 2000 ppm	1000 ppm	-	-
Humedad Inicial (%)	4	6	2	0

De la evaluación química preliminar de las materias primas se puede observar que la arcilla AR-BO-15-01 presenta evidencias de poseer canti-

dades apreciables de materia orgánica, lo cual merece especial atención por su influencia en la aparición de manchas negras (corazón negro),

la disminución de la porosidad del material, roturas de secado, etc., en piezas de quema roja. La no detección de contenidos importantes de carbonatos en las arcillas favorece que no se produzca la aparición de defectos como los grumos de cal, defecto importante de controlar en productos de obra limpia. Los altos contenidos de sulfatos detectados, al igual que el caso de la materia orgánica, potencian la aparición de eflorescencias en las superficies exteriores de las piezas. El color natural de las arcillas, así como la muestra arenosa SI-CH-15-01 anticipan el contenido de hierro presente, lo cual aporta a los productos obtenidos, el color rojo característico de piezas alfareras, después de la quema.

La aplicación de la primera parte del protocolo de caracterización y valoración de minerales arcillosos propuesto (control básico), ha evidenciado que este sirve de guía para el sector cerámico artesanal e industrial del Ecuador. La apreciación inicial de los minerales arcillosos evaluados anticipa el potencial de uso de estos minerales, debido a las excelentes

propiedades y la calidad que aportarían en productos cerámicos de quema roja como piezas modeladas a mano, torno, extrusión de bloques, tejas y ladrillos que se desean fabricar artesanal y/o industrialmente.

Control Complementario

En la Tabla 2 se describen los resultados de la evaluación de la fracción granulométrica gruesa de las materias primas, según la norma ASTM C325. Se puede observar cómo las arcillas presentan una proporción de partículas inferior a 45 μm superior al 90 %, lo que da una clara indicación de que ambas materias primas están constituidas predominantemente por una fracción franco-arcillosa.

Los minerales arenosos presentan una proporción de partículas inferior a 45 μm superior al 40 %, lo que las hace buenas candidatas para introducirla como material desgrasante en pastas de quema roja, en proporciones que pueden variar entre 15 y 30 %, donde son requeridas arenas de granulometría comprendidas entre 50 y 500 μm (Murray, 2000).

Tabla 2. Análisis granulométrico por tamizado de minerales arcillosos de la Sierra de Ecuador, según la norma ASTM C325

Malla ASTM		% Retenido en Malla ASTM			
N°	Diámetro (μm)	Arcilla AR-PI-15-01	Arcilla AR-BO-15-01	Arenosa SI-CH-15-01	Arena SI-PI-15-01
100	$\varnothing > 150$	2,4	4,7	28,4	44,4
140	$150 > \varnothing > 125$	0,5	0,9	5,8	6,5
200	$125 > \varnothing > 75$	1,0	0,8	3,1	4,1
270	$75 > \varnothing > 53$	1,3	0,6	1,7	3,6
325	$53 > \varnothing > 45$	0,1	0,1	0,5	0,2
Total, retenido ($\varnothing > 45$)		5,3	7,1	39,5	58,8
Total, pasante ($\varnothing < 45$)		94,7	92,9	60,5	41,2

En la imagen de la Figura 3 se muestran los resultados obtenidos de la evaluación de la fracción granulométrica fina ($\varnothing < 45 \mu\text{m}$) de las materias primas, según la norma UNE-ISO 13320. Los ensayos reflejan que la arcilla AR-BO-15-01 presenta un diámetro promedio de partícula propio de una materia prima de naturaleza arcillosa pura ($3,2 \mu\text{m}$), así mismo, la superficie específica da indicios de que la muestra posee importantes proporciones de partículas muy finas que tienen influencia predominante en la plasticidad de las materias primas. Corroborándose así la naturaleza arcillosa de la arcilla AR-BO-

15-01 indicada en la Tabla 1 (Santos, Malagón & Córdoba, 2011).

En la Tabla 3 se puede observar que las materias primas objeto de estudio poseen tenores de óxidos del orden establecido para minerales arcillosos, lo que permite inferir un buen comportamiento de las arcillas en producción (Guillén et al., 2012). Sin embargo, no se puede limitar este comportamiento a la lista de óxidos presentes, ya que estos pueden combinarse de distinto modo para dar lugar a fases mineralógicas de diversa y significativa importancia de actuación en la producción, sin dejar de

considerar, por otra parte, la variabilidad de composición en el mismo yacimiento arcilloso. Podemos acotar positivamente que la proporción de óxido férrico detectado es inferior al límite máximo (10 %) permitido en

productos de quema roja. Asimismo, otros óxidos (Na_2O , K_2O , TiO_2 , etc.), están presentes en cantidades mínimas y globalmente no superan el 5 % máximo permitido, valores que aseguran una buena resistencia térmica.

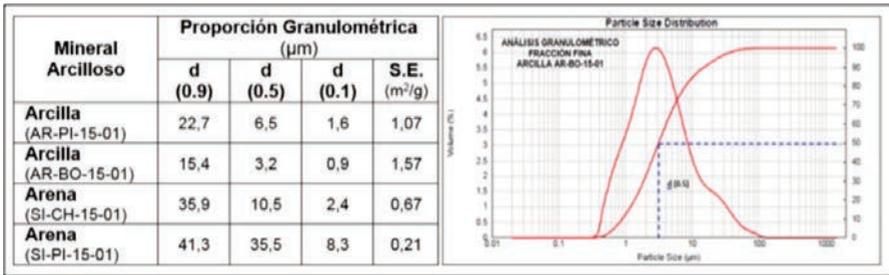


Figura 3. Evaluación de la fracción granulométrica fina ($\text{Ø}<45\mu\text{m}$) de minerales arcillosos de la Sierra del Ecuador, según la norma UNE-ISO 13320.

Tabla 3. Análisis químico por ICP de minerales arcillosos de la Sierra de Ecuador, según la norma ASTM C323

Mineral Arcilloso	% SiO_2	% Al_2O_3	% Fe_2O_3	% CaO	% MgO	% Na_2O	% K_2O	% TiO_2	% PF Total
Arcilla (AR-PI-15-01)	66,24	17,25	4,23	0,99	0,75	1,62	0,84	0,55	7,53 100
Arcilla (AR-BO-15-01)	60,12	20,04	3,33	2,04	0,95	1,89	0,83	0,53	10,27 100
Arenosa (SI-CH-15-01)	75,33	7,56	3,66	2,97	0,31	1,99	1,81	0,33	6,01 100
Arena (SI-PI-15-01)	89,37	1,01	4,54	0,05	0,22	0,30	0,14	0,09	4,28 100

Los productos cerámicos también adquieren diferentes coloraciones en función de la relación de los diferentes óxidos presentes en las arcillas, por ejemplo, se obtiene el color amarillo, marrón claro y oscuro cuando

se da la relación $\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{CaO} = 0,6:0,8$ y da color amarillo brillante y amarillo, para $\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{CaO} = 0,5:0,6$. Los óxidos de manganeso proporcionan el color naranja y el color negro.

En la Tabla 4, se muestra el análisis cuantitativo mineral, obtenido a partir de los difractogramas de rayos x de los minerales seleccionados para este estudio (fracción < 45µm). Se muestra las fases cristalinas identificadas y se presenta el análisis mineralógico cuantitativo a partir de los tenores de óxidos que componen químicamente cada una de las muestras arcillosas (Tabla 3), de la determinación las diferentes fases cristalinas y los constituyentes (óxidos) que componen estas fases (teoría). Este análisis per-

mitió realizar la aproximación teórica de las proporciones de los minerales presentes, notándose principalmente que en la arcilla AR-BO-15-01 predomina la proporción de fase caolinitica respecto de la arcilla AR-PI-15-01, hecho asociado a la importante pérdida al fuego que posee la arcilla AR-BO-15-01. Así como, las proporciones importantes de hidratos de hierro, la poca o nula presencia de calcita y la aproximación por ajustes de sustancias como los compuestos orgánicos (Nayak & Singh, 2007).

Tabla 4: Análisis mineralógico cuantitativo por DRX de minerales arcillosos de la Sierra de Ecuador

MINERALES	ARCILLA (AR-BO-15-01)	ARCILLA (AR-PI-15-01)	ARENOSA (SI-CH-15-01)	ARENA (SI-PI-15-01)
Muscovita	5,66	7,12	—	—
Albita	16,43	13,73	5,57	—
Caolinita	24,9	14	—	—
Illita	20,1	16,48	7,99	—
Calcita	1,04	—	—	—
Sílice Libre	25,36	35,64	78,35	88,44
Goethita	3,16	4,22	2,69	6,27
Ilmenita	1,04	0,91	4,95	4,84
Materia Orgánica	2,31	7,90	1,45	0,45

Siguiendo el procedimiento descrito en la Norma ASTM D-4318 para la determinación del nivel de plasticidad de una muestra mineral, donde

se especifica el límite líquido (LL) determinado por el método de Casagrande y el límite sólido (LS) determinado por el ensayo de consis-

tencia. El índice de plasticidad (IP) se obtiene por diferencia entre los límites anteriores, este permite determinar las proporciones de agua necesarias para obtener una pasta

plástica de óptima trabajabilidad. En la Tabla 5 se pueden observar los datos obtenidos para los límites líquidos y plásticos de cada muestra.

Tabla 5. Determinación de los Límites de Atterberg de minerales arcillosos de la Sierra de Ecuador

Límites de Atterberg	Materias Primas		
	Pasta comercial	Arcilla AR-PI-15-01	Arcilla AR-BO-15-01
Límite Líquido (LL)	38,0	40,0	47,5
Límite Plástico (LP)	20,5	22,9	27,6
Índice de Plasticidad (IP)	17,5	17,1	19,9

El Diagrama de Casagrande permite visualizar cómo las arcillas AR-PI-15-01 y AR-BO-15-01 y de una mezcla patrón se sitúan en la zona correspondiente de mediana plasticidad ($30 < LL < 50$ y $5 < LP < 25$). La arcilla AR-BO-15-01 presenta el comportamiento típico de una pasta de mayor plasticidad, que no se puede secar en ciclos cortos, asociada a una mayor contracción, lo que indica el uso de un ciclo de secado delicado. La curva de Bigot, que se muestra en la imagen de la Figura 4, muestra un ejemplo el comportamiento al secado de una mezcla de materias primas arcillosas (70 % Arcilla (AR-PI-

15-01) / 30 % Arenosa (SI-CH-15-01)), bajo condiciones controladas de temperatura y humedad relativa.

Esta imagen, nos permite evaluar la evolución de la contracción que sufren las piezas en función de las pérdidas de humedad, mediante la medida simultánea de las longitudes y las variaciones de peso a intervalos de tiempo de secado determinados, una vez sometidas las probetas de ensayo al proceso de secado a 120 °C por más de 24 horas. condiciones controladas de temperatura y humedad relativa del 70 %.

Se puede observar para la Mezcla 70/30 que el avance de la contracción es más débil que la pérdida de humedad, notándose adicionalmente que la desviación de la curva con respecto al punto de corte es mínima, lo cual significa que el secado se desarrolla con gran uniformidad. Por consiguiente, esta mezcla en la práctica industrial no debería presentar problemas de secado, pudiéndose desa-

rollar el proceso en ciclos excepcionalmente cortos para materiales huecos de poco espesor. La curva de retractometría nos indica que bajo las condiciones de secado establecidas la Mezcla 70/30 presenta una pendiente de contracción muy suave en función del tiempo, lo que corrobora el buen comportamiento al secado determinado en la curva de Bigot.

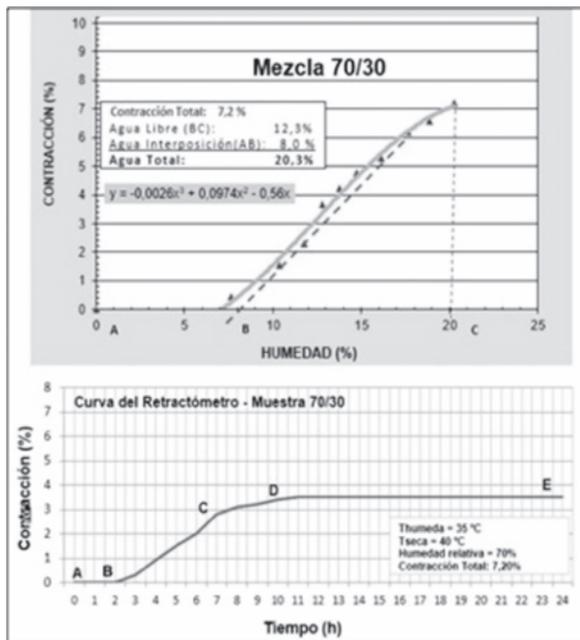


Figura 4. Curva de comportamiento al secado de una mezcla de minerales arcillosos de la Sierra de Ecuador, 70 % Arcilla (AR-PI-15-01) / 30 % Arenosa (SI-CH-15-01)

Las arcillas AR-BO-15-01 y AR-PI-15-01 se sometieron a un ciclo de cocción de 8 horas en horno eléctrico, con un mínimo de permanencia de media hora a la temperatura máxima de cocción de 850-950-1050 °C, con el objeto de determinar el intervalo de cocción más adecuado en cuanto las propiedades del producto que se desea obtener, contracción, grados de absorción de agua, pérdida al fuego, resistencia mecánica a la flexión y color de quema. En la Tabla 6 se muestran los resultados de la evaluación de contracción lineal en seco

(CS), cocción (CC), contracción total (CT) y pérdida al fuego (PF) de las probetas realizadas por extrusión y sometidas a tres ciclos de cocción distintos. Se observa la mayor proporción de pérdida al fuego para las piezas obtenidas a partir de la arcilla AR-PI-15-01, acompañados de la misma tendencia los valores de contracción de las piezas, valores que son coincidentes con los resultados anticipados en el análisis mineralógico e índice de plasticidad de las materias primas utilizadas.

Tabla 6. Propiedades de las piezas cerámicas obtenidas de minerales arcillosos de la Sierra de Ecuador

Cocción	Pérdida al fuego (%PF)	Contracción Secado (%CS)	Contracción Cocción (%CC)	Contracción Total (%CT)	I (%)	RMF (kg/cm ²)
ARCILLA (AR-BO-15-01)						
850 °C	6,92 ± 0,61	8,20 ± 0,28	0,27 ± 0,06	8,48 ± 0,27	16 ± 2	75 ± 8
950 °C	7,81 ± 0,72	8,15 ± 0,10	0,33 ± 0,10	8,47 ± 0,09	15 ± 1	125 ± 11
1050 °C	8,12 ± 0,25	8,11 ± 0,21	1,02 ± 0,28	9,13 ± 0,18	12 ± 2	151 ± 15
ARCILLA (AR-PI-15-01)						
850 °C	9,55 ± 0,20	8,48 ± 0,31	0,36 ± 0,07	8,84 ± 0,32	14 ± 3	120 ± 10
950 °C	10,77 ± 0,57	8,42 ± 0,47	0,62 ± 0,11	9,04 ± 0,52	12 ± 1	160 ± 20
1050 °C	13,45 ± 0,41	8,46 ± 0,07	4,62 ± 0,57	13,08 ± 0,58	6 ± 2	213 ± 18

Índice de absorción (I %) ; Resistencia mecánica a la flexión (RMF kg/cm²)

En todos los casos las piezas cocidas poseen Índice de Absorción muy por debajo de los límites de absorción máximos permitidos de 18 % para Tejas y 20 % para Ladrillos. La resistencia mecánica a flexión en seco es del orden de $35 \pm 5 \text{ kg/cm}^2$, por debajo de los 20 kg/cm^2 suele ser característica de arcillas magras y baja plasticidad en las que el secado se desarrolla con rapidez y sin problemas. Resistencias entre 20 y 60 kg/cm^2 pueden considerarse normales y por encima de los 60 suelen ser características de arcillas muy plásticas en las que el secado puede resultar problemático.

Asimismo, las arcillas evidencian valores de resistencia mecánica superiores a los mínimos establecidos por las normas (80 kg/cm^2 para tejas y 50 kg/cm^2 para bloques).

Finalmente, para complementar los ensayos anteriores, es recomendable en función del uso que se le dará al mineral arcilloso realizar ensayos de caracterización térmica. Se otorgará prioridad a aquellas variables que sean más sensibles a los cambios físico-químicos del material arcilloso y que influyan más sobre el proceso de

fabricación y la calidad del producto acabado. El número de parámetros especializados de calidad a determinar podrá reducirse o ampliarse en función de las características físico-químicas de las materias primas. Además, no será siempre necesario realizar todos los ensayos, sino que, en cada ocasión, se determinarán únicamente aquellos parámetros que se consideren más oportunos, dependiendo de la información que proporcionen o del problema que en ese momento se pueda presentar (Guillén et al., 2012).

Para la caracterización térmica se utilizan tres tipos de análisis: el *análisis térmico diferencial* (ATD) para determinar la descomposición térmica de los minerales, a una velocidad de calentamiento de $5 \text{ }^\circ\text{C}$ por minuto, bajo una atmósfera controlada con nitrógeno o en atmósfera oxidante; el *análisis térmico gravimétrico* (ATG), que permite determinar simultáneamente a la descomposición térmica, las pérdidas de peso asociadas a las transformaciones o reacciones químicas; el *análisis dilato métrico lineal* (DTL) para determinar los cambios dimensionales asociados a las transformaciones de los minerales presentes

durante el calentamiento; el *análisis por dilatometría* presenta eventos importantes de expansión y contracción térmica en el mineral, asociados al cambio energético ocurrido durante el calentamiento de la muestra.

Las arcillas presentan un excelente comportamiento a la cocción, algunas de las piezas adquirieron la tonalidad roja característica de las piezas de alfarería, una proporción de pérdida al fuego y valores de contracción, absorción y resistencia mecánicas adecuados para estos productos.

CONCLUSIÓN

El protocolo revisado permite obtener datos importantes para evaluar la factibilidad de uso de las arcillas, como potenciales materias primas dentro de composiciones de pastas para la elaboración artesanal/industrial de productos cerámicos. En lo específico se determinó para los minerales arcillosos de la Sierra de Ecuador que las arcillas presentan bastante homogeneidad en cuanto a su constitución a granel, excelente sensación al tacto, lo que evidencia el importante margen de trabajabilidad plástica que poseen las arcillas. Las pastas elaboradas alcanzaron el

nivel de consistencia de conformado adecuado, con una proporción de humedad de conformado del orden del 25 %. No se detectaron contenidos importantes de carbonatos, ni de materia orgánica en las arcillas, lo que favorece que no se produzca la aparición de defectos, como los grumos de cal o corazón negro. Por último, cabe destacar que las arcillas presentan un excelente comportamiento a la cocción y, en síntesis, esta evaluación anticipa a nivel de laboratorio el potencial de uso de estos minerales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Vicerrectorado de Investigación y Proyección Social de la Escuela Politécnica Nacional por el apoyo y financiamiento

prestado a través del proyecto PIS 16-13: "Optimización tecnológica de productos cerámicos industriales y/o artesanales del Ecuador".

LISTA DE REFERENCIAS

- Amorós, J. L. (1998). *Manual para el control de la calidad de materias primas arcillosas*. Instituto de Tecnología Cerámica. España.
- Espinosa de los Monteros J. (1979). Características y aplicación de materias primas para cerámica. *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr.*, 18(4), 243-249.
- Guillén J., Briviesca S. & Escudero R. (2012). Caracterización y evaluación de un depósito de caolín de “Los Azufres” Michoacán, México, para su uso industrial. *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr.*, 51(6), 329-336.
- Mitchell D. (1974). Comments on the quality control of clays. *Ber. Dt Keram.Ges.*, 51, 5-8.
- Murray H. (2000). Traditional and new applications for kaolins, smectite and palygorskite: A General Overview. *Applied Clay Sci.*, 17, 207-221.
- Nayak P. S. & Singh B. K. (2007). Instrumental characterization of clay by XRF, XRD and FTIR. *Bull. Mater. Sci.* 30(3), 235-238.
- Paetsch D. (1973). El control eficiente de materias primas. *Interceram*, 2, 110-112.
- Paetsch D. (1977). Sobre el control de las materias primas en cerámica. *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr.*, 17(3), 151-161.
- Poirier T., Baena J., Picardo C. & Hung X. (2014). Relevancia del factor materia prima en un proceso cerámico industrial: Un caso de estudio venezolano. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 29(3), 103-113.
- Santos J. D., Malagón P. Y. & Córdoba E. M. (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), 53-61.
- Torres J., Gutiérrez R., Castelló R., & Vizcayno C. (2011). Análisis comparativo de caolines de diferentes fuentes para la producción de metacaolín. *Rev. LatinAm. Metal. Mat.*, 31, 135-143.

Uribe R. (2015). Investigaciones de materias primas minerales no metálicas en el Ecuador. *Revista Politécnica*, 36(1), 34-44.

Vázquez F., Torres L., Garza L., Martínez A. & López W. (2009). Caracterización por XANES, análisis mineralógico y aplicación industrial de un depósito de caolín de México. *Materiales de Construcción*, 59(294), 113-121.