EVALUACIÓN DE MATERIALES PARA LA SUSTITUCIÓN DE ARCILLA EN PASTA SILÍCEA PARA AISLADORES CERÁMICOS CON ÉNFASIS EN EL DESEMPEÑO DE SECADO

Alejandro Rojas García

Informe de práctica empresarial para optar al título de Ingeniero de Materiales

Asesores:

Edward Ferney Restrepo Hoyos, Ph.D. en Ingeniería de Materiales

Juan José Bedoya Jiménez, Ingeniero I+D Sumicol Corona

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería de Materiales

Medellín, Antioquia, Colombia

2025

Cita	Rojas García [1]
Referencia Estilo IEEE (2020)	[1] Rojas García, "Evaluación de materiales para la sustitución de arcilla en pasta silícea para aisladores cerámicos con énfasis en el desempeño de secado", Trabajo de grado profesional, Ingeniería de Materiales, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2025.

creative commons BY NC SA

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
Vicerrectoría de Docencia

Sistema de Bibliotecas

Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: http://bibliotecadigital.udea.edu.co

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Agradecimientos

Quiero agradecer a la compañía SUMINISTROS DE COLOMBIA S.A.S por el valioso apoyo que recibí durante el semestre de industria en mi formación como Ingeniero de Materiales. Por abrirme sus puertas y permitirme conocer de cerca la realidad de la industria. Su disposición para compartir conocimientos y experiencias ha sido fundamental para complementar mi formación como Ingeniero y como persona.

A los Auxiliares de laboratorio de SUMINISTROS DE COLOMBIA S.A.S, por su paciencia y dedicación para guiarme en cada proceso de aprendizaje. Su apoyo constante ha sido esencial para el desarrollo de mis habilidades técnicas y para comprender los procesos industriales.

A mi maestro y asesor Edward Ferney Restrepo Hoyos, Ph.D. en Ingeniería de Materiales, por su dedicación y acompañamiento constante en mi formación como ingeniero de Materiales.

A mi asesor externo, el Ingeniero Juan José Bedoya Jiménez, Ingeniero I+D, por compartir su perspectiva desde el campo profesional. Sus aportes han enriquecido significativamente la compresión a los desafíos del sector industrial.

Por último, agradezco a mi familia por su gran apoyo durante toda mi formación profesional, donde siempre estuvieron motivándome para ser un gran profesional.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN 8

ABSTRACT 9

I. INTRODUCCIÓN 10

II. OBJETIVOS 11

A. Objetivo general 11

B. Objetivos específicos 11

III. MARCO TEÓRICO 12

A) Pastas cerámicas 12

1) Minerales arcillosos 12

2) Materias primas no arcillosas. 16

3) Secado de pastas cerámicas 18

4) Curvas de secado 19

5) Contracción. 21

6) Distribución de tamaño de partícula (DTP). 21

7) Indicé de azul de metileno (IAM) 21

B) Productos cerámicos. 22

1) *Aisladores cerámicos.* 22

C) Caracterización de las materias primas y evaluación de los productos cerámicos 23

1) Módulo de ruptura (MOR). 23

2) Indicé de deformación piroplástica (IDP). 24

IV. METODOLOGÍA 25

A) Revisión bibliográfica 25

B) Recepción de las materias primas. 25

C) Caracterización de las materias primas 25
D) Formulación de las pastas cerámicas. 26
E) Preparación de las pastas cerámicas. 27
1) Ensamble de las pastas cerámicas. 27
2) Medición de la viscosidad y de la densidad 28
F) Filtroprensado de la pasta cerámica 29
G) Amasado 29
H) Secado y cocción. 30
J) Módulo de rotura (MOR) 32
K) Índice de deformación piro plástica (IDP) 33
V. ANÁLISIS DE RESULTADOS 34
A) Filtro pensado de las pastas cerámicas 34
B) Curvas de secado. 35
C) Contracción 37
1) Contracción Húmedo-seco. 37
2) Contracción seco-quema 37
D) Caracterización físico-cerámica 39
1) Módulo de rotura en crudo (MOR crudo) 39
2) Módulo de rotura en quema (MOR quema). 41
E) Índice de deformación piro plástica (IDP). 43
F) Determinación de la zona de trabajo 45
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 47
1) Conclusiones 47
2) Recomendaciones 48
REFERENCIAS 49
ANEXOS 50
A) Poster 51

LISTA DE TABLAS

TABLA I. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE UN AISLADOR CERÁMICO. 23
TABLA II. FORMULACIONES DE LAS PASTAS CERÁMICAS. 27
TABLA III. DIMENSIONES DE LAS BARRAS CILÍNDRICAS PARA ENSAYOS FÍSICOS-CERÁMICOS. 30
TABLA IV. RESULTADOS DE CURVA DE SECADO POR EL METODO DE BIGOT. 36
TABLA V. CONTRACCIÓN HUMEDO-SECO. 37
TABLA VI. CONTRACCIÓN SECO-QUEMA 38
TABLA VII. RESULTADOS MOR CRUDO. 40
TABLA VIII. RESULTADOS DE MOR QUEMA. 42
TABLA IX. ÍNDICE DE DEFORMACIÓN PIRO PLÁSTICA (IDP). 44

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Estructura simplificada de la caolinita [3] 14
Fig. 2. Estructura cristalográfica de la illita [2] 14
Fig. 3. Celda elemental de la montmorillonita [2] 15
Fig. 4. Celda elemental del talco [2] 16
Fig. 5. Variación del rendimiento del secado en función del tiempo [6] 19
Fig. 6. Curvas de secado. a) Curva de Bigot. b) Diagrama de Sherwood [6] 20
Fig. 7. Representación esquemática de la participación de los aisladores [13] 22
Fig. 8. Ensayo de flexión 24
Fig. 9. Índice de deformación piro plástica 24
Fig. 10. Materias primas para pastas cerámicas. 25
Fig. 11. Diseño de mezclas simples para los materiales alternativos. 26
Fig. 12. Balanza de humedad 27
Fig. 13. Ensamble de las pastas cerámicas. 28
Fig. 14. Evaluación de la viscosidad de las pastas cerámicas. 28
Fig. 15. Filtro-prensado de las pastas cerámicas. 29
Fig. 16. Amasado de las pastas cerámicas. 30
Fig. 17. Muestras empleadas para curvas de secado. 31
Fig. 18. Curvas de filtro-pensado. 35
Fig. 19. Pérdida de humedad vs contracción para cada barra cilíndrica 35
Fig. 20. Diagrama de contorno de mezclas para curva de secado. 36
Fig. 21. Contracción seco-quema: a) Gráfico de traza de respuesta. b) Gráfico de contorno de la mezcla. 39
Fig. 22. Resistencia mecánica en crudo: a) Gráfico de traza de respuesta. b) Gráfico de contorno de mezcla. 41
Fig. 23. Resistencia mecánica en quema: a) Gráfico de traza de respuesta. b) Gráfico de contorno de mezcla. 43
Fig. 24. Índice de deformación piro plástica: a) Gráfico de traza de respuesta. b) Gráfico de contorno de la mezcla. 45
Fig. 25. Diagrama de contorno para determinar el área optima de trabajo 46

RESUMEN

En este documento se presentan los resultados del semestre de industria que se realizó durante la práctica académica en la empresa ELECTRO PORCELANA GAMMA S.A. Este permitió desarrollar una nueva formulación de la pasta empleada para la fabricación de aisladores cerámicos, reemplazando la arcilla A_1, comúnmente empleada para elaborar estos productos, debido a su agotamiento; por materiales alternativos; es decir por otras materias primas.

La influencia de la nueva arcilla en las pastas se evaluó a través de un diseño de experimentos de mezclas (DOE), empleando el software Minitab. Los resultados obtenidos fueron comparados con dos formulaciones de referencia, con el fin de verificar si las propiedades evaluadas de los DOE se encontraban dentro del rango esperado, y así, determinar la viabilidad técnica de las formulaciones.

Se determinó que la arcilla evaluada (material alternativo) aporta buena plasticidad a las pastas, mejorando la contracción y la humedad crítica de ellas, lo que a su vez mejoró su proceso de secado.

A partir del DOE 1 se logró aumentar la resistencia mecánica de la pasta cerámica, además su índice de piro plasticidad se encuentra dentro del índice de las pastas comparativas, cumpliendo así con los requerimientos establecidos por la empresa, lo que podría permitir que esta formulación se evalué para su aplicación a nivel industrial.

Palabras clave — pastas cerámicas, arcilla, aisladores cerámicos, secado.

ABSTRACT

This document presents the results of the industry semester conducted during the academic internship at the company ELECTRO PORCELANA GAMMA S.A. This experience allowed the development of a new formulation for the paste used in the manufacturing of ceramic insulators, replacing clay A1—commonly used for making these products—due to its depletion, with alternative materials; that is, with other raw materials.

The influence of the new clay on the pastes was evaluated through a mixture design of experiments (DOE), using Minitab software. The obtained results were compared with two reference formulations, in order to verify whether the evaluated properties of the DOE formulations fell within the expected range and thus determine the technical feasibility of the formulations.

It was determined that the evaluated clay (alternative material) provides good plasticity to the pastes, improving their shrinkage and critical moisture, which in turn enhanced the drying process.

From DOE 1, it was possible to increase the mechanical strength of the ceramic paste. Additionally, its pyroplasticity index is within the range of the comparative pastes, thereby fulfilling the requirements established by the company, which could allow this formulation to be considered for industrial-scale application.

Keywords *— Alternative materials, ceramic pastes, clay A1, insulators, drying.*

I. INTRODUCCIÓN

ELECTRO PORCELANA GAMMA S.A.S., es una compañía de CORONA, multinacional colombiana con más de 140 años de historia empresarial, dedicada a la manufactura y comercialización de productos para el hogar, la construcción, la agricultura y el sector de energía, entre otras industrias.

Entre los productos que fabrica la empresa para el sector de la energía se encuentran los aisladores cerámicos, donde la arcilla A_1 es uno de los componentes de la pasta empleada para elaborar estos productos. Sin embargo, su disponibilidad a corto plazo (aproximadamente 1 año) se ve comprometida, lo que podría detener la producción. Esta situación exige el estudio y el uso de materiales alternativos que puedan sustituir esta arcilla, manteniendo la calidad y el desempeño de los aisladores, y cumpliendo con los estándares establecidos por la empresa.

Durante el desarrollo del presente estudio, se analizó la arcilla A_2 la cual podría reemplazar a la arcilla A_1 en la formulación de pastas para aisladores cerámicos, manteniendo las propiedades fisicoquímicas, físico-cerámicas y mineralógicas requeridas, e incluso mejorar el desempeño de los productos, especialmente en la etapa de secado.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Evaluar materiales alternativos para la sustitución de la arcilla A_1 en pastas silíceas para aisladores cerámicos, con énfasis en el desempeño de secado.

B. Objetivos específicos

- Analizar materiales alternativos que puedan sustituir a la arcilla A_1 en la formulación de pastas silíceas para aisladores cerámicos, a partir de sus propiedades fisicoquímicas y mineralógicas.
- Desarrollar pastas silíceas para aisladores cerámicos utilizando los materiales alternativos evaluados.
- Evaluar el comportamiento de las piezas objeto de estudio mediante el empleo de curvas de secado.
- Determinar las propiedades fisicoquímicas de las pastas cerámicas formuladas.

III. MARCO TEÓRICO

A) *Pastas cerámicas*

Dentro del sector industrial de la cerámica convencional, es posible identificar formulaciones sencillas, constituidas únicamente por un tipo de arcilla, y también preparaciones más complejas, integradas por diversos componentes que son cuidadosamente medidos en una relación definida y combinadas de forma homogénea. Sin importar cuál de las dos alternativas se considere, la constitución resulta ser heterogénea, dado que se requiere la utilización de tres clases fundamentales de materiales primarios con distintos roles, estos son:

- Componentes plásticos: facilitan la labor de modelado, tal como sucede con las arcillas.
- Materiales inertes o desgrasantes: en estado crudo, contrarrestan la plasticidad excesiva, y durante el proceso de cocción actúan como una estructura de soporte o un entramado para mantener la forma; ejemplos de estos son el cuarzo y la chamota (arcilla que ha sido cocida y posteriormente triturada).
- Fundentes: se trata de los elementos con el punto de fusión más bajo, los cuales, al alcanzar la temperatura máxima del proceso, se ablandarán, y en su estado viscoso, serán absorbidos por los poros. Esto permite que las demás partículas puedan resistir el calentamiento y preservar su configuración. La fracción fundida, al enfriarse, genera una matriz de naturaleza vítrea que une los granos restantes y cierra la porosidad, un fenómeno conocido como gresificación, el cual varía según la clase de pasta cerámica. Algunos ejemplos incluyen los feldespatos o el óxido de hierro.

1) Minerales arcillosos.

La conformación estructural de los minerales arcillosos está compuesta por combinaciones de capas formadas por tetraedros de SiO_4 y octaedros de Al_2O_3. Entre los minerales arcillosos más comunes presentes en las arcillas utilizadas en cerámica se encuentran la caolinita, la illita, la clorita

y, en menor proporción, la montmorillonita. Estos minerales confieren diversas propiedades, entre las cuales destaca la plasticidad, motivo por el cual también se les conoce como la "fracción plástica" de las arcillas [1].

• Caolinita:

El componente fundamental está conformado por la combinación de una lámina tetraédrica, en la cual un átomo de silicio con cuatro cargas positivas se sitúa en el centro, rodeado por cuatro átomos de oxígeno (cada uno con dos cargas negativas) ubicados en los vértices. Esta se asocia con una lámina octaédrica, compuesta por seis grupos hidroxilo (OH^-), que poseen una carga negativa cada uno, dispuestos en todos los vértices de la estructura, mientras que en la posición central se encuentra un catión, usualmente trivalente, aunque en algunos casos puede ser bivalente. En la estructura caolinita, ambas láminas se enlazan a través del reemplazo de un grupo OH^- en cada octaedro, compartiendo un átomo de oxígeno procedente de los vértices de los tetraedros, el cual poseía una carga libre previamente.

Los yacimientos de caolín suelen tener un origen primario, es decir, se encuentran en el lugar donde originalmente se formaron las rocas madres, sin haber sido transportados. Por otro lado, los yacimientos secundarios han sido objeto de procesos de erosión, transporte y rede-posición en medios acuosos, típicamente lacustres. Estos procesos han permitido la concentración y clasificación de partículas más finas, aunque a su vez han provocado la incorporación de contaminantes de origen orgánico y vegetal, como raíces, hojas, ramas y elementos carbonosos.

Es importante diferenciar entre los depósitos de caolín, caracterizados por su baja plasticidad, y las arcillas caoliniticas, que siempre provienen de yacimientos secundarios. Estas últimas se destacan por su elevada plasticidad (comúnmente conocidas como Ball clays), gracias a una selección granulométrica natural y a la presencia de materiales orgánicos y carbonosos que funcionan como agentes plastificantes. Estos materiales, en ocasiones, oscurecen la arcilla en estado crudo, aunque recupera su blancura tras la cocción, cuando los contaminantes se subliman o se oxidan completamente.

Los caolines con menor grado de pureza son utilizados en la elaboración de materiales refractarios con contenido de alúmina, actuando como fundentes de este oxido. En ciertos casos, también pueden emplearse caolines no purificados, incluso aquellos con impurezas como el hierro, dependiendo del producto final [2]. En la **Fig. 1** se puede observar la estructura de la caolinita.

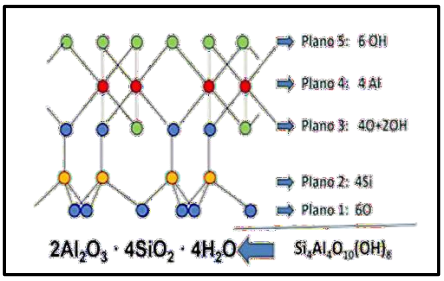


Fig. 1. Estructura simplificada de la caolinita [3].

• Illita:

La illita presenta una estructura similar a la de las micas. Su unidad estructural básica consta de dos capas tetraédricas que encierran una capa octaédrica, formando una estructura trioctaedrica (ver **Fig. 2**). Esta configuración es prácticamente idéntica a la de la montmorillonita, pero se diferencia en que algunos cationes de silicio en la illita son reemplazados por aluminio.

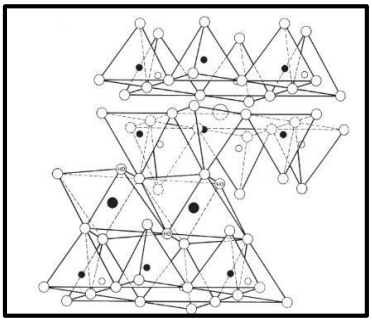


Fig. 2. Estructura cristalográfica de la illita [2].

Las distinciones estructurales entre la illita y la mica radican en una menor proporción de sustitución de silicio por aluminio en la illita, lo que conlleva a una menor cantidad de potasio incorporado. Adicionalmente la illita puede contener moléculas de agua intersticiales [2].

• Montmorillonita:

La estructura fundamental de los minerales de este grupo se compone de dos planos tetraédricos que envuelven un plano octaédrico (ver **Fig. 3**). Algunos miembros de la familia de la montmorillonita se forman a partir de la sustitución de silicio por aluminio en los tetraedros, así como por el reemplazo de magnesio y hierro bivalente por aluminio en los octaedros.

Las fuerzas que cohesionan los cristales de los minerales en este grupo son notablemente débiles. Esto se debe a la ausencia de enlaces de hidrogeno, y la única interacción presente son las fuerzas de Van der Waals, lo que facilita la inserción de moléculas de agua provocando una "dilatación de la estructura cristalina, que puede aumentar su volumen original hasta casi seis veces.

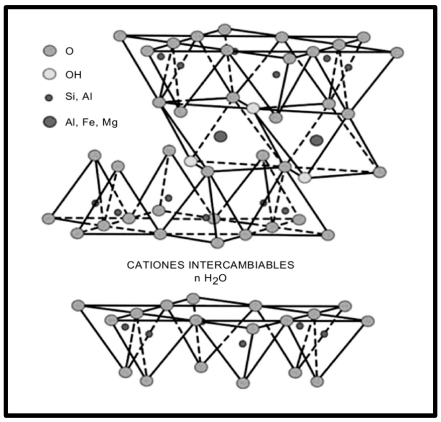


Fig. 3. Celda elemental de la montmorillonita [2].

Es importante destacar que la montmorillonita tiene un impacto negativo muy pronunciado en las propiedades reológicas de las barbotinas. Cuando la bentonita se hidrata, experimenta una hinchazón considerable y adquiere la consistencia de un gel coloidal, y el único uso cerámico de las montmorillonitas más puras es como aditivos plastificantes, donde su porcentaje de uso no excede el 5% [2].

• Talco:

Es un mineral con una estructura similar a la mica. Su "lámina" fundamental se forma por dos planos hexagonales de tetraedros de sílice que rodean un plano octaédrico de Mg^{2+} (ver **Fig.4**). Debido a esta estructura, el talco se considera un material que pertenece a los minerales arcillosos.

Las rocas talcosas a menudo contienen diversas impurezas que afectan significativamente sus propiedades, pero en términos generales el talco se compone aproximadamente de 50% de sílice, más del 30% de magnesio y un poco menos del 10% de alúmina.

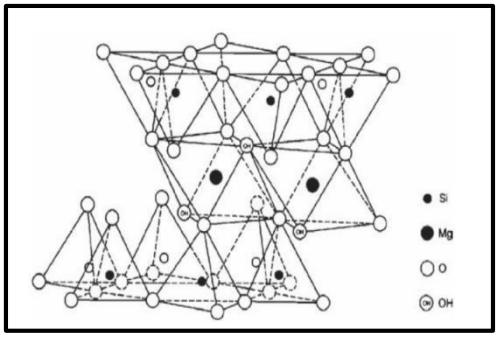


Fig. 4. Celda elemental del talco [2]

El talco se incorpora con funciones específicas en las formulaciones de diversos materiales cerámicos:

- Refractarios: en productos aluminosilicatos, el uso de talco (en proporciones que varían del 2% al 10%) incrementa la resistencia al choque térmico (aunque puede disminuir la refractariedad) y mejora la resistencia mecánica de las piezas crudas. El talco es casi indispensable en la fabricación de placas y elementos de soporte, ya que estos suelen estar expuestos a fuertes gradientes térmicos entre sus caras. El uso del talco está limitado por la posible formación de eutécticos, los cuales pueden reducir significativamente las características refractarias del material.
- Aislantes eléctricos: en este caso, el talco es una de la materia prima más usadas en pastas aluminosas de aisladores, dado que estos productos, después de la cocción, están compuestos de cordierita ($5SiO_2.2Al_2O_3.2MgO$) y clinoenstatita ($SiO_2 \cdot MgO$) [2].

2) Materias primas no arcillosas.

Para mejorar las propiedades de las arcillas o cuando no es posible trabajarlas solas, se incorporan materias primas no arcillosas en la composición de las piezas cerámicas. Estos materiales se utilizan principalmente para:

- Reducir la plasticidad de las arcillas, lo que a su vez disminuye el tiempo de secado y previene deformaciones o grietas causadas por una contracción excesiva.
- Mejorar o modificar las propiedades de los cuerpos cerámicos una vez cocidos.

Para lograr estos objetivos, se emplean varios materiales, destacando, principalmente:

• Sílice

Es el óxido más abundante en la naturaleza y un componente esencial en la cerámica, presente en todas las pastas, ya sea en su forma libre o como parte de otros minerales como la arcilla, feldespato y el talco. Se obtienen por lo general como polvo a partir de cuarzo, con un punto de fusión entre 1610°C y 1763°C, es un material refractario que eleva el punto de fusión de las piezas cerámicas.

Durante la cocción la sílice exhibe un comportamiento particular al sufrir inversiones a diferentes temperaturas, lo que provoca expansiones en la pasta y genera tensiones que pueden causar agrietamientos. Para evitar esto, es crucial realizar los procesos de calentamiento y enfrentamiento lentamente. Al calentarse en presencia de feldespato, la sílice se disuelve y funde a una temperatura mucho menor, formando fases vítreas. También reduce la plasticidad de las pastas, disminuyendo significativamente la contracción y la deformación durante el secado y la cocción [2].

• Feldespato

Es el fundente más importante en la cerámica. Se presenta principalmente como una mezcla de variedades sódicas y potásicas en distintas proporciones, y puede contener impurezas de hierro que los hacen más fundentes y le confieren un color característico en la cocción. El feldespato sódico es el más común y económico. Sus puntos de fusión varían, comenzando alrededor de 1080°C, hasta los 1500°C, formando fluidos complejos. Su poder fundente es más significativo a altas temperaturas, a bajas temperaturas, se refuerza con otros fundentes como el carbonato de calcio.

En las mezclas comunes de arcilla, feldespato y sílice, el feldespato se ablanda, se vuelve vítreo o incluso líquido, mientras que la arcilla y la sílice permanecen sólidos. El feldespato liquido cubre las partículas sólidas y la tensión superficial las une progresivamente, distribuyéndose a través de

los poros. El feldespato fundido también disuelve parte de los sólidos y reacciona químicamente, resultando en fases diferentes en el producto cocido en comparación con las materias primas iniciales [4].

• Chamota

Es una arcilla refractaria que se tritura en granos de diferentes tamaños después de una cocción intensa. Es inerte a las temperaturas de trabajo cerámico. Sus aplicaciones en la cerámica incluyen:

- Se añade a los cuerpos cerámicos para dar textura y proporcionar mayor "cuerpo" a piezas moldeadas y torneadas a mano.
- Reduce la contracción tanto en el secado como en la cocción.
- Aumenta la resistencia de la pieza durante la cocción [4].

3) Secado de pastas cerámicas.

En la fabricación de productos cerámicos, el secado es un paso crucial que implica la eliminación del agua presente en el material crudo o moldeado. Esta operación es fundamental dentro del proceso de producción. Aunque existen diversos métodos de secado, como la absorción, adsorción, filtración, centrifugación, evaporación, condensación y liofilización, la industria cerámica ha utilizado casi exclusivamente la evaporación hasta hace poco tiempo. Sin embargo, la vaporización está ganando terreno progresivamente.

El material cerámico por secar es típicamente una mezcla de compuestos inorgánicos que puede contener hasta un 50% de agua en peso. En esta mezcla, las partículas minerales están rodeadas por una red líquida dentro de canales capilares. Durante el secado, el agua debe moverse desde el interior de la pieza a través de estos capilares hasta la superficie para que pueda evaporarse. Para un secado efectivo y sin daños, es vital controlar dos factores: la velocidad de difusión del agua desde el interior hacia la superficie y la velocidad de evaporación. El éxito del proceso depende en gran medida de que la velocidad de evaporación no exceda la velocidad de difusión del agua, asegurando que el material no se dañe durante el secado [5].

La difusión del agua en la pasta cerámica está directamente relacionada con la temperatura, aumentando a medida que esta se eleva. No obstante, la composición de la pasta juega un papel crucial, dado que, a una mayor cantidad de materias primas plásticas, disminuye la velocidad de difusión. Esto se debe a que las pastas más plásticas presentan una mayor contracción, lo que restringe el paso del agua y reduce significativamente la difusión.

En 1987, Bourry propuso un modelo de ciclo de secado que consta de tres fases. La primera fase implica una reducción de volumen proporcional al agua evaporada, un periodo crítico que debe ejecutarse lentamente. Durante la segunda fase, se forman pequeños huecos y la pasta continúa contrayéndose hasta un punto crítico donde cesa la contracción, esto debido al contacto entre las partículas. Finalmente, la tercera fase permite acelerar el secado sin riesgo de fractura [6]. En la **Fig. 5**. Se ilustra la relación entre el tiempo de secado y el agua retenida.



Fig. 5. Variación del rendimiento del secado en función del tiempo [6].

4) Curvas de secado.

Para evaluar experimentalmente el proceso de secado, se emplean herramientas que recopilan datos como la humedad removida, la temperatura, la contracción y el tiempo de proceso, requiriendo solo la medición de cambios en peso y longitud. Entre estas, destacan las curvas de Bigot, que permiten medir simultáneamente la pérdida de peso y la contracción de elementos cerámicos. En ellas, la humedad a eliminar se representa en el eje “y” y la contracción en el eje “x”. otra herramienta comúnmente utilizada es el diagrama de Sherwood, que relaciona el tiempo de secado (eje “x”) con la pérdida de peso (eje “y”) [6]. En la **Fig. 6** se ilustra el comportamiento de ambas curvas.

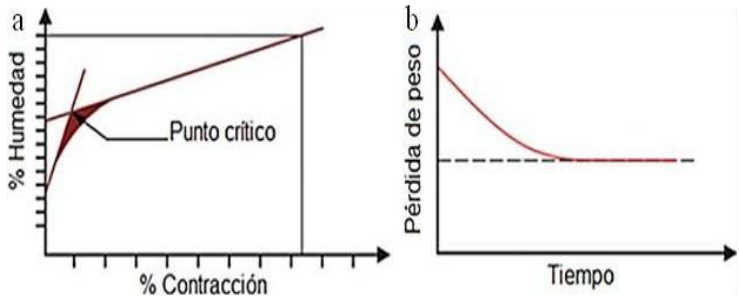


Fig. 6. Curvas de secado. a) Curva de Bigot. b) Diagrama de Sherwood [6].

Las curvas de secado muestran tres etapas:

● *Periodo de velocidad de secado constante:* en esta fase inicial, la superficie del material está saturada de humedad, y la velocidad de secado es máxima y constante, determinada principalmente por las condiciones externas como temperatura, humedad y velocidad del aire. La evaporación ocurre directamente en la superficie.

● *Punto crítico de humedad:* al alcanzar un contenido crítico de humedad, la película superficial de agua se reduce considerablemente, marcando el fin del periodo de velocidad constante.

● *Periodo de velocidad de secado decreciente*: en esta etapa, la velocidad de secado disminuye progresivamente, ya que el transporte de humedad desde el interior hacia la superficie se vuelve el factor limitante, controlado por gradientes de concentración y propiedades internas del material como la porosidad [7].

A medida que el secado progresa, la difusión del líquido se reduce y la transferencia de humedad se vuelve predominante por difusión de vapor. La correcta gestión de factores como la temperatura y la humedad es fundamental para controlar la tasa de secado y minimizar la aparición de defectos, como el agrietamiento, que pueden surgir debido a tensiones diferenciales durante la contracción del material [8].

La manipulación de aditivos como defloculantes también juega un papel fundamental al influir en la reología de la barbotina, afectando directamente la estabilidad y el comportamiento de la pasta durante el secado. Un control preciso de estos factores permite obtener un producto con las propiedades deseadas y minimizar las pérdidas en el proceso de producción [9].

5) Contracción.

Durante el secado y la cocción, las piezas experimentan una contracción que corresponde a la disminución de sus dimensiones. Este fenómeno se debe principalmente a la reducción del espacio poroso, así como a la pérdida de agua superficial y estructural presente en los minerales arcillosos. Evaluar este comportamiento es clave para establecer las dimensiones iniciales en estado húmedo, de modo que la pieza final cumpla con las medidas requeridas. La contracción se expresa generalmente en porcentaje [10].

6) Distribución de tamaño de partícula (DTP).

La distribución de tamaño de partícula (DTP) es un parámetro fundamental que determina el empaquetamiento de las suspensiones cerámicas, lo cual, a su vez, ejerce una influencia directa y significativa sobre el rendimiento y las propiedades reológicas de las pastas durante el proceso de fabricación. Específicamente, se ha observado que las arcillas y los caolines que no contienen partículas de tamaño excesivamente reducido tienden a favorecer un mayor cociente de formación de la fracción gruesa. Por otro lado, la incorporación de materiales no plásticos, como el cuarzo y el feldespato, en la composición de la pasta, cuando estos poseen un porcentaje de partículas finas, contribuyen positivamente a la velocidad de vertido y, simultáneamente, a la reducción de la densidad aparente del material [11].

7) Indicé de azul de metileno (IAM).

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es un factor crucial, definida como la suma de todos los cationes de cambio que un material puede adsorber a un pH específico. Esta propiedad se correlaciona con la capacidad higroscópica, la plasticidad y el porcentaje de finos de un material. Un elevado porcentaje de agua retenida en la pasta conduce a la formación de piezas excesivamente blandas o plásticas, lo que incrementa la probabilidad de aparición de grietas durante el proceso de secado. Adicionalmente, esta evaluación permite identificar la presencia de material orgánico, principalmente en las arcillas [11].

B) Productos cerámicos.

Son el resultado de la combinación de ingredientes que forman la pasta cerámica a partir de la cual se fabrican. Dada la vasta cantidad de posibles mezclas y la diversidad y heterogeneidad de las materias primas, especialmente las arcillas (agentes plásticos), la variedad de calidades en los productos cerámicos es prácticamente ilimitada.

Debido a su gran diversidad, los criterios para clasificar los productos cerámicos son variados. Algunas de las formas más comunes de clasificación incluyen:

- Por su temperatura de cocción: baja, media o alta.
- Por su densidad: porosos o densos
- Por su color: blancos o coloreados [12].

1) *Aisladores cerámicos.*

Un aislador es un componente diseñado para aislar eléctricamente conductores o equipos de la tierra o de otros elementos conductores, al mismo tiempo que proporciona un soporte ya sea rígido o flexible. En el mercado, ELECTROPORCELANA GAMMA S.A.S. se enfoca en el sector de trasmisión, transformación y distribución de energía eléctrica (ver **Fig. 7**), en la actualidad la empresa identifica una oportunidad de expansión en el área de la "generación" de energía, a través del desarrollo y fabricación de aisladores de mayor tamaño y capacidad [13].

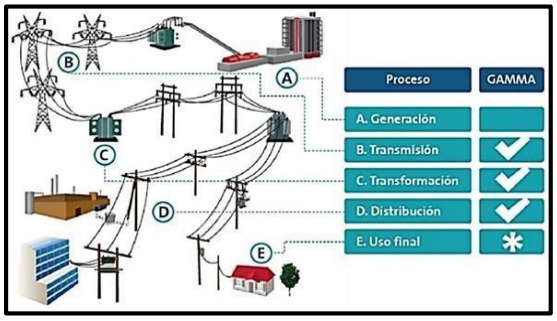


Fig. 7. Representación esquemática de la participación de los aisladores [13].

La composición o diseño de la pasta, y el procedimiento de fabricación de los aisladores se ajustan para que se desarrolle un alto contenido de mullita en la pasta cocida, con lo cual se obtienen

aisladores con mayor resistencia mecánica [14]. En la **TABLA I**. Se muestra la composición química típica de aislador cerámico.

TABLA I. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE UN AISLADOR CERÁMICO.

Material	% en peso
Cuarzo	<3
Mullita	17-21
Corindón	16-20
Amorfos	58-62

C) Caracterización de las materias primas y evaluación de los productos cerámicos

La caracterización de las materias primas como arcillas, feldespatos y calizas es fundamental para la industria cerámica, ya que permite identificar sus propiedades mineralógicas y químicas, así como su idoneidad para aplicaciones específicas. Mediante técnicas como difracción y fluorescencia de rayos X, análisis térmico y granulométrico, se pueden distinguir las fases minerales presentes y determinar la pureza de cada material. Esta información resulta esencial para optimizar la formulación de pastas cerámicas, controlar la calidad del producto final y ajustar los parámetros de los procesos de fabricación, como la cocción y el secado. Además, conocer la composición de las materias primas ayuda a reducir defectos en los productos cerámicos [15].

1) Módulo de ruptura (MOR).

La resistencia a la flexión de una pieza cerámica se evalúa mediante un ensayo que consiste en aplicar una carga hasta provocar su ruptura. Este procedimiento se realiza con un equipo denominado flexómetro (ver **Fig. 8**), el cual sostiene la muestra por sus extremos mientras se le aplica una fuerza central, registrando el valor requerido para fracturarla. A partir de esta prueba, también es posible determinar el módulo de ruptura (MOR), que es la magnitud obtenida de dividir la resistencia a la flexión, por el cuadrado del espesor de la muestra [10].



Fig. 8. Ensayo de flexión.

2) Indicé de deformación piroplástica (IDP).

El índice de deformación piro plástica (IDP) es un ensayo utilizado para cuantificar la deformación que sufre la pasta cerámica durante su proceso de cocción, permitiendo evaluar la susceptibilidad del material a la deformación que va a depender de la composición química de cada pasta cerámica. Las muestras a evaluar se colocan horizontalmente sobre soportes refractarios (ver **Fig. 9**.) de modo que puedan deformarse libremente durante el ciclo de cocción en el horno. Durante este proceso las barras experimentan una curvatura cuya magnitud depende de la composición química de la pasta, especialmente de los componentes que afectan la viscosidad a altas temperaturas. La deformación se mide mediante el ángulo de curvatura que adquiere cada barra después de la cocción, utilizando un calibrador, y se relaciona con el espesor de la barra [10].



Fig. 9. Índice de deformación piro plástica.

IV. METODOLOGÍA

A) Revisión bibliográfica.

Se realizó una revisión de la literatura científica y técnica en las bases de datos, revistas científicas, libros y normas técnicas, entre otras, sobre el diseño de pastas para aisladores cerámicos y su proceso de secado. Esto permitió el análisis de los resultados de las propiedades fisicoquímicas de las materias primas y de las muestras elaboradas, así como de los parámetros críticos del proceso de secado, entre otras características.

B) Recepción de las materias primas.

Los materiales alternativos (ver **Fig. 10**) utilizados para reemplazar la arcilla A_1 provienen de distintas minas de la Empresa, y otras corresponden a materias primas importadas, lo que implica posibles variaciones en sus propiedades. Estas se rotularon de la siguiente manera: arcilla, arena y feldespato.



Fig. 10. Materias primas para pastas cerámicas.

C) Caracterización de las materias primas

La caracterización de todas las materias primas se realizó mediante fluorescencia de rayos X (FRX), con el fin de determinar su composición química; el análisis de la distribución del tamaño de las partículas (DTP) se realizó por difracción laser, el análisis de las fases cristalinas mediante difracción de

rayos X (DRX) e índice de azul de metileno (IAM) según la norma ASTM C837, con el fin de determinar el área superficial específica de las arcillas.

D) Formulación de las pastas cerámicas.

Se formularon 7 pastas cerámicas, denominadas "DOE" (diseño de experimentos), quese muestran en la **TABLA II**. Con el fin de comparar los resultados obtenidos, fueron incluidas dos pastas comparativas o de referencia utilizadas comúnmente para fabricar aisladores. En la formulación de las pastas, se varió las cantidades de los materiales alternativos, es decir, la mezcla de una nueva arcilla (arcilla A_2), con la arena y el feldespato usualmente empleados, manteniendo constante la suma de ellos (% de participación en la mezcla) igual a 76,3% en peso. También, se mantuvo constante el porcentaje de los materiales comúnmente empleados en su elaboración (33,7% en peso).

Para determinar la participación de los materiales alternativos en el 76,3% en peso de la mezcla, se implementó un diseño de mezclas simplex utilizando el software Minitab. A partir de este diseño se presentan a través del diagrama ternario (ver **Fig. 11)**, las 7 formulaciones diseñadas.

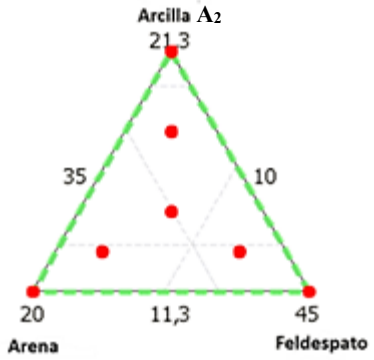


Fig. 11. Diseño de mezclas simples para los materiales alternativos.

.

Con fines de confidencialidad de la empresa ELECTRO PORCELANA GAMMA S.A.S, al ser esta información sensible y protegida, no se muestra la composición química de las pastas de referencia con las cuales fueron comparadas las pastas elaboradas, así como el nombre específico de algunas materias primas y los porcentajes en que se utilizaron.

TABLA II. FORMULACIONES DE LAS PASTAS CERÁMICAS.

Material	DOE 1	DOE 2	DOE 3	DOE 4	DOE 5	DOE 6	DOE 7
	% en peso						
A_2	14,6	11,3	13,0	21,3	11,3	13,0	18,0
Arena	13,3	20,0	11,7	10,0	10,0	16,7	11,7
Feldespato	38,4	35,0	41,6	35,0	45,0	36,6	36,6
*MC	33,7						

*MC: Materiales comúnmente empleados en la elaboración de las pastas.

E) Preparación de las pastas cerámicas.

Después de recibir las materias primas se determinó su porcentaje de humedad mediante la balanza de humedad, para ello se utilizaron 5 g de muestra [16] (ver **Fig. 12)**. Este procedimiento permite conocer la cantidad de agua necesaria para realizar el ensamble de cada pasta según la formula cerámica establecida por la empresa.



Fig. 12. Balanza de humedad.

.

1) Ensamble de las pastas cerámicas.

Luego de determinar la cantidad de agua necesaria para la suspensión, se adicionaron los materiales en el siguiente orden específico y con agitación constante: primero las arcillas en suspensión, luego la arcilla sólida, seguido del caolín, parte del agua (40%), arena, feldespato y por último el resto del agua, asegurando una incorporación gradual para evitar la formación de grumos y facilitar la dispersión.



Fig. 13. Ensamble de las pastas cerámicas.

2) Medición de la viscosidad y de la densidad

Para medir la viscosidad de la pasta cerámica se empleó un viscosímetro digital (ver **Fig. 14).** El equipo se configuró utilizando el husillo N°3 a una velocidad de 30 RPM. La prueba se realizó durante 6 s, asegurando previamente que la suspensión de la pasta estuviera completamente dispersada. Posteriormente, se registró el valor de viscosidad en unidades de centipoises (cP) y se retiró el husillo [17]. En caso de que la viscosidad obtenida no se encontrara dentro del rango de 1000 a 5000 cP, esta se ajustó añadiendo agua o adicionando sólidos para disminuir o incrementar la viscosidad, respectivamente.



Fig. 14. Evaluación de la viscosidad de las pastas cerámicas.

Una vez que la viscosidad de la suspensión se encontraba dentro del rango requerido, se determinó la densidad mediante el método del picnómetro cilíndrico [18]. La densidad debe situarse en 1400 ± 5 g/L. Si la densidad medida no se encontraba dentro de este intervalo, se realizaban los ajustes necesarios antes mencionados.

F) Filtroprensado de la pasta cerámica.

Con el objetivo de transformar las suspensiones de las pastas cerámicas en una rodaja sólida con una consistencia adecuada para el moldeo, y establecer el tiempo requerido para ello, se utilizó una filtroprensa. ver **Fig. 15**. Durante el proceso se determinó la pérdida de agua con el tiempo, registrando cada minuto la pérdida de masa de la suspensión. El procedimiento establece que la cantidad total de agua retirada se determina cuando, en tres mediciones consecutivas de un minuto cada una, la perdida de agua es inferior a 1 g/min. Es en este punto donde la suspensión ha perdido la cantidad de agua necesaria para formar una masa sólida, denominada “rodaja”. Los resultados obtenidos se representan mediante curvas de filtroprensado.



Fig. 15. Filtro-prensado de las pastas cerámicas.

G) Amasado

El proceso de amasado consiste en someter la rodaja previamente obtenida mediante filtro prensado, a una etapa de conformado mediante extrusión. Para ello, la rodaja se introduce en una maquina extrusora equipada con un husillo, el cual impulsa el material a través de una boquilla de diámetro determinado (ver **Fig. 16**). La homogeneidad de la pasta y el control de parámetros como la plasticidad y el contenido de humedad son fundamentales para asegurar la calidad y uniformidad de las barras, garantizando así la reproducibilidad de los ensayos posteriores.



Fig. 16. Amasado de las pastas cerámicas.

Este procedimiento permitió obtener barras cilíndricas, cuya longitud y diámetro se ajustaron según los requerimientos de caracterización físico-cerámica establecidos por la empresa, tal como se detalla en la Tabla III.

TABLA III. DIMENSIONES DE LAS BARRAS CILÍNDRICAS PARA ENSAYOS FÍSICOS-CERÁMICOS.

Ensayo físico-cerámico	Espesor de la barra (cm)	Longitud de la barra (cm)
MOR crudo	1,75	12,4
MOR quema	1,14	13,5
Contracción	1,75	12,4
IDP	1,14	14,5
Curvas de Bigot	1,75	14,5

H) Secado y cocción.

Luego de obtener las barras cilíndricas, estas fueron secadas y/o sometidas a un ciclo de cocción según el procedimiento y el ensayo a realizar, tal como se muestra a continuación:

- Curvas de secado: Para la evaluación del secado se utilizó el método de Bigot utilizando 3 barras para cada DOE, para esto, se realizaron sobre las barras dos líneas separadas 140 mm (ver **Fig. 17**). Durante este proceso, en cada uno de la toma de los datos, se determinó la distancia entre las líneas y el peso de las muestras (con el fin de determinar la contracción y la variación del peso, respectivamente), y se estableció la humedad de ellas.

El ciclo de secado empleado fue el siguiente: 8 h a temperatura ambiente (realizando mediciones cada 15 min por 2 h, luego cada 30 min también por 2 h y después cada 60 min durante 4 h). Posteriormente, se secaron a 60, 80 y 100°C por una hora, realizando una medición para cada una de estas temperaturas, luego de cada tratamiento térmico



Fig. 17. Muestras empleadas para curvas de secado.

- Contracción: Luego del proceso de secado, la contracción de las barras se determinó en dos etapas: en estado crudo y luego de la cocción o quema. Para la evaluación en estado crudo se utilizó la **Ecuación 1**. Mientras que, para la contracción en quema, las muestras fueron tratadas térmicamente a 1200°C por 12 h, su valor se determinó mediante **Ecuación 2.** Para ambas mediciones, se toma como referencia una longitud inicial de 100 mm, la cual se marca previamente durante el proceso de amasado.

$$\%C_S = \frac{L_H - L_S}{L_H} \times 100 \qquad \textbf{Ecuación (1)}$$

Donde:

$\%C_S$: contracción en seco.

L_H: longitud de la pieza en húmedo.

L_S: longitud de la pieza en seco.

$$\%C_Q = \frac{L_S - L_Q}{L_S} \times 100 \qquad \textbf{Ecuación (2)}$$

Donde:

$\%C_Q$: contracción en quema.

L_S: longitud de la pieza en

seco.

L_Q: longitud de la pieza en quema.

Para analizar el efecto de cada ingrediente en la contracción de la pasta se utilizó el software Minitab, a partir de los diagramas de traza de respuesta y de contorno de mezcla,

- MOR en crudo: Las muestras se secaron a temperatura ambiente durante 24 h, luego a 60°C y 80°C por una hora a cada una de estas temperaturas, y después 100°C durante 2 h. Esto con el fin de asegurar la eliminación adecuada de humedad y la homogeneidad de las muestras.
- MOR en quema e índice de deformación piro plástica: se realizó el mismo procedimiento de secado para la resistencia MOR en crudo. Posteriormente, las muestras fueron tratadas térmicamente a 1200°C por un tiempo de 12 horas.

J) Módulo de rotura (MOR)

El módulo de ruptura (MOR) se estableció mediante la **Ecuación 3**, tanto para las muestras en crudo como en quema, utilizando entre 11 y 16 probetas para cada DOE [10].

$$MOR = \frac{8 \times F}{\pi \times d^3} \qquad \textbf{Ecuación (3)}$$

En donde:
F= fuerza de ruptura [N].
L= distancia entre las barras de apoyo [mm].
D= diámetro del cuerpo de prueba [mm].

Con el objetivo de analizar la influencia de cada ingrediente en las pastas sobre el módulo de ruptura en crudo y quema, los resultados obtenidos fueron analizados mediante el software Minitab, empleando un diagrama ternario de contorno y un gráfico de trazas de respuesta.

K) Índice de deformación piro plástica (IDP)

El índice de deformación piro plástica (IDP) se determinó mediante la **Ecuación 4**, empleando 3 muestras para cada DOE.

$$IDP = \frac{D^2 \times S}{L^4} \times 10^6 \qquad \textbf{Ecuación (4)}$$

Donde:

D= espesor de la barra [mm].

S= curvatura [mm].

L= longitud de la barra [mm].

IDP= [cm^{-1}].

Los resultados fueron analizados mediante el software Minitab, a partir de un diagrama ternario de contorno y un gráfico de trazas de respuesta. Esto con el fin de determinar la influencia de cada ingrediente en la pasta sobre el IDP.

V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Debido a la importancia del presente trabajo para ELECTRO PORCELANA GAMMA S.A. y que el presente informe es confidencial, no se muestran los resultados obtenidos de la caracterización de la materia prima: así como los resultados de otros ensayos.

A) Filtro pensado de las pastas cerámicas

En la **Fig.18**. Se presentan los resultados de las curvas de filtro-pensado correspondientes a todos los DOE incluyendo las pastas comparativas (PG052 y PG035), las cuales son el patrón con el que se compara los DOE para el análisis. En esta se observa que durante los primeros 20 min del proceso todas las pastas muestran un aumento rápido en el porcentaje de agua retirada, lo que se atribuye a la baja resistencia inicial al flujo del agua y a la facilidad con la que esta es eliminada antes de la formación de una masa sólida. Los DOE 5, 6 y 7 se destacan por alcanzar los mayores porcentajes de agua retirada (80%) en menor tiempo de filtro-prensado (20 min), comportamiento que se asocia a una distribución granulométrica homogénea, tamaño de partícula más fino y menor factor de empaquetamiento. Por el contrario, los DOE 1 a 4 presentan tiempos de filtro-pensado más prolongados, debido a una distribución granulométrica heterogénea y mejor empaquetamiento de las partículas, lo que incrementa la resistencia al paso del agua y, por lo tanto, el tiempo necesario para que para su eliminación.

Las curvas de los DOE 1, 2 y 3 muestran un comportamiento similar al de la pasta comparativa PG 052, con un tiempo requerido para la formación de la rodaja inferior a 50 min. Mientras que para el DOE 4, el tiempo para formar la masa sólida fue de 52 min, lo que indica que estos DOE presentan curvas de filtro-pensado dentro de los estándares aceptables para el conformado de las rodajas.

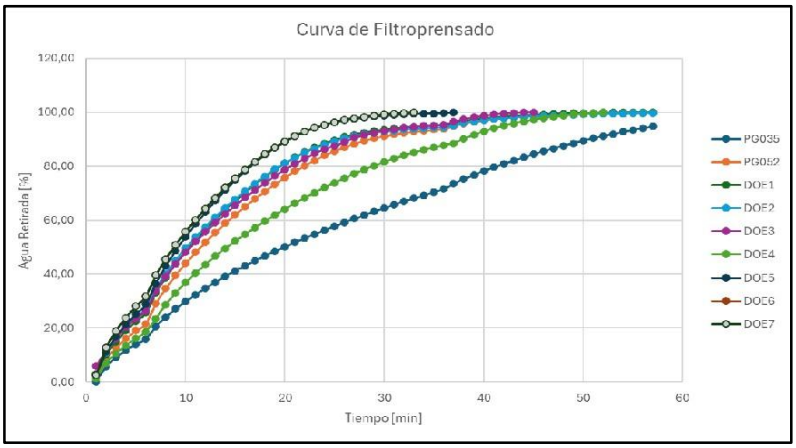


Fig. 18. Curvas de filtro-pensado.

B) Curvas de secado.

En la **Fig. 19**. se presentan las curvas de secado de todas las suspensiones. En ella se observa que todas presentan un comportamiento similar, con un cambio de pendiente en el punto crítico, que varía según la pasta evaluada, debido a la eliminación del agua libre o intersticial, lo que genera una alta contracción en la muestra. A partir de este punto la contracción tiende a estabilizarse y la velocidad del secado disminuye de forma gradual, ya que se requiere el transporte de agua desde el interior hasta la superficie y su posterior eliminación, proceso que además se ve obstaculizado por la contracción (acercamiento de las partículas) que experimenta la muestra [2].

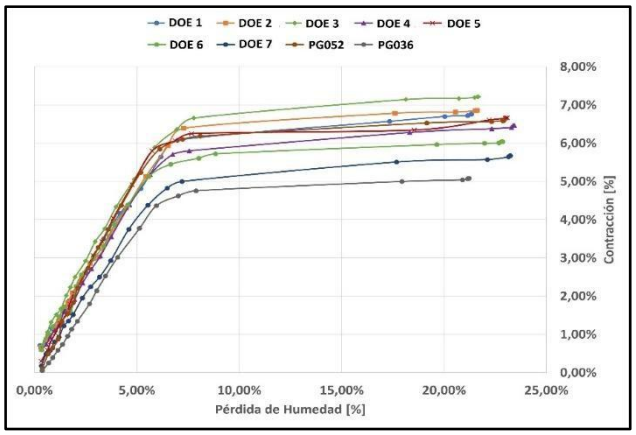


Fig. 19. Pérdida de humedad vs contracción para cada barra cilíndrica.

Por su parte, En la **TABLA IV** se presenta la pérdida de peso (pérdida de humedad en la cual se alcanza el punto crítico), la humedad crítica (punto desde el cual la contracción deja de ser

significativa) y el tiempo que transcurre hasta alcanzar la humedad crítica. Se observa que el rango de humedad crítica de las pastas comparativas se encuentra entre 15,59% y 17,81%. Los DOE 1, 2 y 4 se encuentran en este rango, mientras que para los demás es ligeramente superior, siendo el mayor valor igual a 18,89%. Según los requerimientos establecidos por la Empresa, se recomienda es que los valores de humedad critica de los DOE se encuentren, como mínimo, dentro de este rango, con el fin de mejorar el desempeño de secado de las pastas cerámicas mediante la incorporación de los nuevos materiales evaluados.

.

TABLA IV. RESULTADOS DE CURVA DE SECADO POR EL METODO DE BIGOT.

	PG035	PG052	DOE 1	DOE 2	DOE 3	DOE 4	DOE 5	DOE 6	DOE 7
Pérdida de peso crítico (%)	7,29	6,79	6,79	7,02	7,04	8	7,11	7,48	8,47
Humedad crítica (%)	15,29	17,81	17,72	17,34	18	17,07	18,4	18,4	18,79
Tiempo crítico (h)	8,24	6,72	7,09	5,93	6,42	6,24	6,69	6,69	8,08

En la **Fig. 20** se presenta la influencia de los materiales evaluados en las curvas de secado. Se observa que la mayor humedad crítica se localiza en la región con menor proporción de feldespato, lo que indica que este material es el que más influye en la humedad. Este comportamiento es consistente con los resultados observados en el DOE 7, el cual se encuentra en dicha zona y contiene una cantidad de feldespato inferior en comparación con los demás diseños experimentales. Además, esta es superior en comparación con las pastas de referencia, lo que mejora su proceso secado (a mayor humedad critica mejor es su desempeño durante el secado). El feldespato, al actuar como desgrasante en la pasta, permite más fácil la salida del agua, lo que se traduce en un aumento de la humedad crítica.

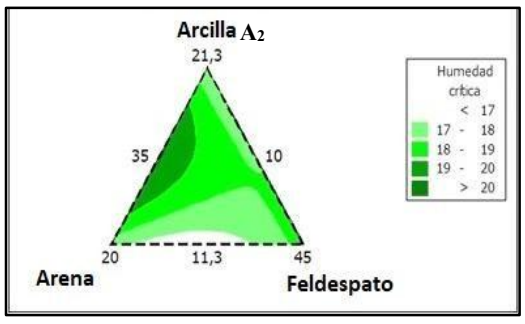


Fig. 20. Diagrama de contorno de mezclas para curva de secado.

C) Contracción

1) Contracción húmedo-seco.

En la **TABLA V** se muestran los resultados de la contracción en estado húmedo-seco, es decir, antes de que las barras cilíndricas pasen por el proceso de cocción. Los DOE 3, 6 y 7 presentan un comportamiento similar al de las pastas de referencia, ubicándose su contracción en el intervalo de estas pastas (6,1- 6,23%), debido a su composición química similar (% de arcillas) y distribución granulométrica. Mientras que, los DOE 1, 2, 4 y 5, presentan una contracción levemente mayor, lo que podría estar asociada a su mejor distribución granulometría y al contenido de arcillas en las pastas.

TABLA V. CONTRACCIÓN HUMEDO-SECO.

	PG035	PG052	DOE 1	DOE 2	DOE 3	DOE 4	DOE 5	DOE 6	DOE 7
Longitud en húmedo(mm)	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Longitud en quema (mm)	93,94	93,5	94,73	94,5	93,72	94,26	94,48	94,5	93,56
% Contracción	6,1	6,23	5,54	5,59	6,11	5,67	5,53	6,11	6,15

2) Contracción seco-quema

Los valores de contracción después del proceso de quema, se muestran en la **TABLA VI**. La mayoría de los diseños de experimentos (DOE) se encuentran dentro o muy próximos al rango de las muestras comparativas (7,56-9,40%). Sin embargo, los DOE 5 y 7 muestran los mayores porcentajes de contracción. Este comportamiento es consistente con los resultados de las curvas de filtro pensado, donde ambos diseños mostraron una mayor pérdida de agua en menor tiempo, lo que indica que son pastas con alto contenido de humedad. El mayor contenido de humedad facilita la extrusión de la pasta. Sin embargo, cuando esta agua es eliminada en el secado, genera mayores espacios entre las partículas, los cuales se reducen durante la quema debido al acercamiento de las partículas, lo que explica su mayor contracción.

El DOE 5 presenta la mayor contracción, lo que se atribuye al contenido de feldespato que actúa como fundente. Un exceso de fundente genera una mayor cantidad de fase líquida (vidriosa) durante la cocción, lo que facilita el acercamiento de las partículas y el relleno de poros, provocando así una mayor contracción. Además, una fase líquida demasiado fluida puede favorecer el colapso de la estructura porosa, incrementando aún más la contracción.

Por su parte, el DOE 4 es el presentó la menor contracción. Aunque este valor se encuentra dentro del rango aceptable según las pastas comparativas, una contracción baja puede ser desfavorable dependiendo de la aplicación, especialmente si la pasta debe ser moldeada, anclada o forma parte de un ensamble, como ocurre en los aisladores con herrajes, donde se requiere una contracción significativa para asegurar el ajuste. En este contexto, los materiales evaluados cumplen con los estándares de contracción establecido para pastas cerámicas, mostrando un comportamiento adecuado.

TABLA VI. CONTRACCIÓN SECO-QUEMA.

	PG035	PG052	DOE 1	DOE 2	DOE 3	DOE 4	DOE 5	DOE 6	DOE 7
Longitud en húmedo (mm)	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Longitud en quema (mm)	86,75	85,33	85,8	85,15	85,3	86	85,07	85,03	84,28
% Contracción	7,56	9,40	9,38	9,44	9,40	8,90	9,97	9,41	9,93

En la **Fig. 21**. Se presenta el diagrama de traza de respuesta (donde el termino FLDE se refiere al feldespato, y el eje x, es decir la desviación de la mezcla en proporción, se refiere a la diferencia entre la cantidad real de cada componente en una mezcla y la proporción deseada) y un diagrama de contorno de mezcla. El grafico de traza de respuesta muestra como la contracción disminuye al reducir la proporción de arcilla en la mezcla, lo que se atribuye a que es esta quien aporta plasticidad a la pasta y, durante la cocción, el agua contenida en ella se evapora, generando así este efecto. Por lo tanto, a menor contenido de arcilla, menor es la contracción; a medida que se incrementa la arcilla, también aumenta la contracción. La mayor contracción se observa en la zona verde, ubicada entre los vértices de arcilla y arena, y opuesta al vértice de feldespato. Esto indica que el feldespato es el componente que menos contribuye a la contracción de la pasta, mientras que una proporción intermedia entre arena y arcilla genera la contracción más alta.

Estos resultados son acordes con los resultados de la **TABLA VI**, donde el DOE 7 presentó el mayor porcentaje de contracción, siendo incluso superior con respecto a las pastas comparativas. Este diseño se ubica en la región verde del diagrama de contorno, **Fig. 21b**, confirmando la influencia combinada de arcilla y arena en el comportamiento de contracción de las pastas cerámicas.

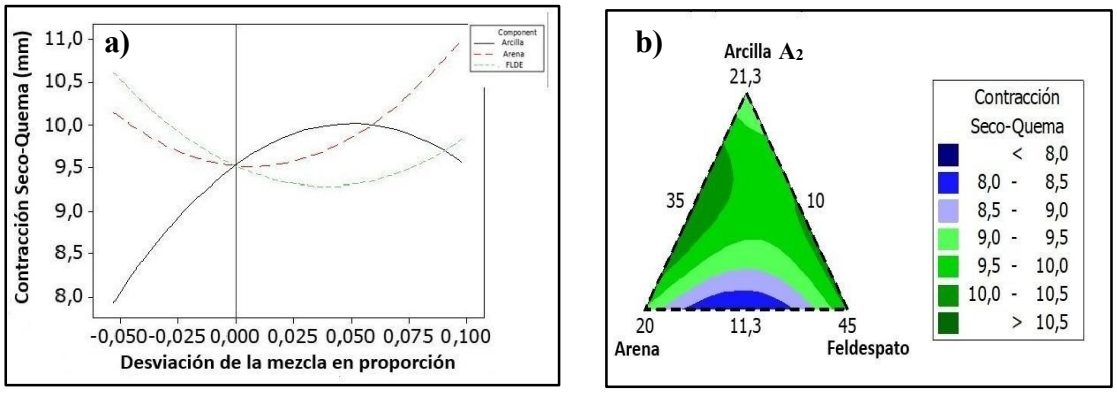


Fig. 21. Contracción seco-quema: a) Gráfico de traza de respuesta. b) Gráfico de contorno de la mezcla.

D) Caracterización físico-cerámica.

1) Módulo de rotura en crudo (MOR crudo).

Los resultados de MOR en crudo de todas las muestras se presentan en la **TABLA VII**, donde se observa que las dos pastas comparativas presentaron los resultados más altos. El DOE 1 mostró el módulo más elevado y cercano a estas pastas, mientras que los DOE 2, 3, 4 y 7 presentaron valores aceptables dentro de los estándares establecidos por las pastas comparativas (31,22 - 30,83 Kg/cm^2). Por su parte, los DOE 5 y 6 registraron los módulos más bajos. Estas diferencias se correlacionan con los resultados de las curvas de filtro-pensado (ver **Fig. 18**): los DOE 5 y 6 tuvieron los tiempos de filtro-pensado más cortos y la mayor pérdida de agua en menor tiempo. Esto indica que los DOE 5 y 6 presentan una compactación deficiente, atribuido a una distribución homogénea del tamaño de partícula, lo que genera un factor de empaquetamiento ineficiente y, en consecuencia, una baja fuerza de cohesión entre partículas, resultando en un módulo de rotura reducido. Por el contrario, los DOE con módulos de rotura más altos presentan una mejor compactación, debido a una distribución heterogénea del tamaño de

partícula, lo que favorece un empaquetamiento eficiente y una mayor cohesión, incrementando así la resistencia mecánica en crudo.

La menor resistencia del DOE 5 se explica por su composición química, que incluye el mayor porcentaje en peso de feldespato (45%), lo que disminuye la plasticidad de la pasta, ya que este material actúa como desgrasante, diluyendo la fase plástica de la arcilla y reduciendo la cohesión entre partículas, lo que afecta negativamente la resistencia mecánica en crudo, es decir que la pasta cerámica puede tener un módulo de rotura menor en crudo porque su estructura no está consolidada y es menos plástica, lo que la hace más débil.

TABLA VII. RESULTADOS MOR CRUDO.

MOR crudo (Kg/cm^2)	**PG035**	**PG052**	**DOE1**	**DOE2**	**DOE3**	**DOE4**	**DOE5**	**DOE6**	**DOE7**
Promedio	31,22 ±3,14	30,83 ±2,77	28,75 ±2,23	21,97 ±5,83	22,84 ±2,33	23,98 ±2,57	18,75 ±2,47	19,98 ±1,06	24,07 ±1,59

En la **Fig. 22a** se ilustra como la arena es el material que más influye en la resistencia mecánica en crudo. A medida que disminuye la cantidad de arena en la mezcla, el módulo de rotura en crudo aumenta significativamente. Por el contrario, tanto la arcilla como el feldespato (FLDE) pueden mejorar la resistencia mecánica en cantidades moderadas; sin embargo, un exceso de estos componentes provoca una disminución de la resistencia. Estos resultados se confirman en el diagrama de contorno, ver **Fig. 22b**, donde se observa que la mayor resistencia mecánica en crudo se alcanza con la menor cantidad de arena, reflejado en la zona verde. En cambio, un aumento en el contenido de arena, especialmente por encima del 20% en peso, reduce la resistencia mecánica, ya que la arena actúa como desgrasante. Al incrementarse su proporción, la pasta pierde plasticidad, lo que afecta negativamente su capacidad de compactación y, en consecuencia, su resistencia en crudo.

Por otro lado, la **Fig. 22b**, se observa como los colores del diagrama de contorno indican las zonas donde, al emplear determinadas proporciones de los materiales, se obtiene mayor o menor resistencia en crudo, siendo las zonas verdes las que representan las regiones con mayor resistencia, mientras que las áreas azules corresponden a las de menor resistencia.

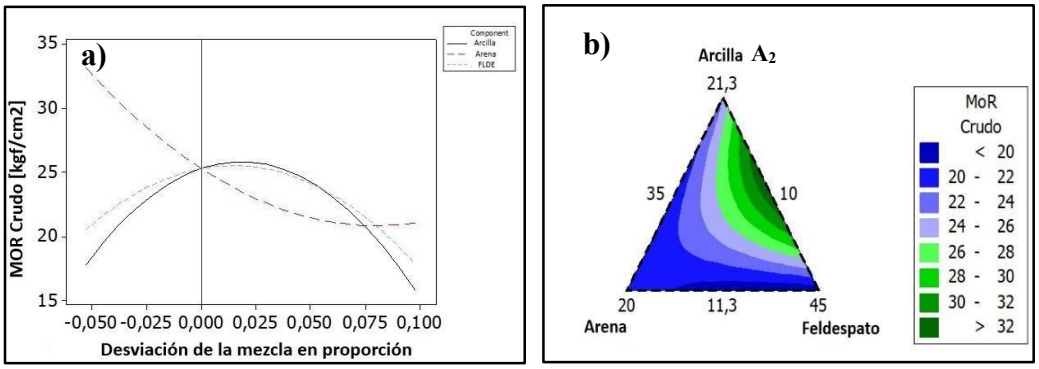


Fig. 22. Resistencia mecánica en crudo: a) Gráfico de traza de respuesta. b) Gráfico de contorno de mezcla.

Adicionalmente, en la **Fig. 22a** se observa como la disminución de arcilla reduce la resistencia mecánica en crudo, siendo la arcilla el componente que más afecta esta propiedad. Por lo tanto, el aumento de la resistencia mecánica está más influenciado por la presencia de arcilla que por feldespato en las pastas cerámicas.

En general, la **Fig.22** muestra que el DOE 1 presenta la mayor resistencia mecánica en crudo, debido a las proporciones empleadas de los ingredientes de la pasta (arcilla A_2, arena y feldespato), lo cual se corrobora con los resultados presentados en la **TABLA VII**. Además, en el diagrama de contorno, ver **Fig. 22b**, se observa como la zona de mayor resistencia se encuentra cercana al punto correspondiente al DOE 1.

2) Módulo de rotura en quema (MOR quema).

La **TABLA VIII** se presentan los resultados del módulo de rotura en quema. En general, todos los DOE mostraron una buena resistencia mecánica en comparación con las pastas de referencia y, por lo tanto, con los requerimientos de la Empresa. Sin embargo, el DOE 6 presentó la menor resistencia lo que se atribuye a que posiblemente no se formó la mullita durante la transformación de fases en el proceso de cocción. Además, es posible que se esté generando fases vítreas con características desfavorables, como una cristalización deficiente. Esto podría estar relacionado con la proporción de feldespato (36,6%),

que quizá no favorece una cristalización óptima para obtener una buena resistencia mecánica. Además, otro factor que contribuye a su baja resistencia es la granulometría de la arena. La proporción del 16,7% podría generar una granulometría desequilibrada (bajo factor de empaquetamiento), lo que genera mayor cantidad de poros debilitando así la estructura.

El DOE 6 no cumple con los requisitos mínimos de módulo de resistencia mecánica, esto indica que los materiales y las proporciones de materiales utilizados en él no fueron los adecuados. Además, presenta una rápida pérdida de agua, lo que confirma que no es una pasta suficientemente compacta.

TABLA VIII. RESULTADOS DE MOR QUEMA.

MOR quema (Kg/cm^2)	**PG035**	**PG052**	**DOE1**	**DOE2**	**DOE3**	**DOE4**	**DOE5**	**DOE6**	**DOE7**
Promedio	763,71 ±88,91	771,47 ±89,83	795,53 ±150,02	740,36 ±153,41	751,51 ±121,40	695,97 ±178,69	697,66 ±163,96	664,18 ±150,29	719,96 ±192,16

La alta variabilidad del MOR para todos los DOE observadas en la tabla anterior se explica por la presencia de defectos como la formación de grietas y burbujas, dado que la arcilla tiene más perdidas por ignición que se da durante el ciclo de quema. Por ejemplo, el DOE 4 y 7 tienen un porcentaje elevado de arcilla (21,3% y 18% respectivamente), lo que le confiere una alta plasticidad. Esta característica provoca una mayor formación de defectos internos, como burbujas durante el amasado y se refleja en una desviación estándar más alta en comparación con los demás DOE.

La Fig. 23 muestra la influencia que tiene individualmente cada material. Se observa en la **Fig. 23a** como a menor porcentaje de arena se obtiene una mayor resistencia mecánica. Asimismo, se observa que aumentar la proporción de feldespato en la pasta mejora la resistencia mecánica, pero un exceso de cantidad, mayor al 38,4%, la resistencia comienza a disminuir.

Este comportamiento coincide con los resultados mostrados en la **TABLA VIII**, donde se determina que la cantidad adecuada de feldespato es aproximadamente 38,4%. Este porcentaje corresponde al DOE 1, el cual presenta la mayor resistencia mecánica en comparación con los otros DOE, superando incluso la resistencia mecánica de las pastas comparativas. Además, se evidencia que cuando la proporción de arcilla supera el 15%, la resistencia mecánica disminuye significativamente.

En el diagrama de contorno, ver **Fig. 23b**, se aprecia como la zona con mayor módulo de resistencia en crudo corresponde a la región donde se utiliza la menor cantidad de arena. Además, en la parte inferior del triángulo, en la zona de color azul claro, se observa una resistencia mecánica intermedia.

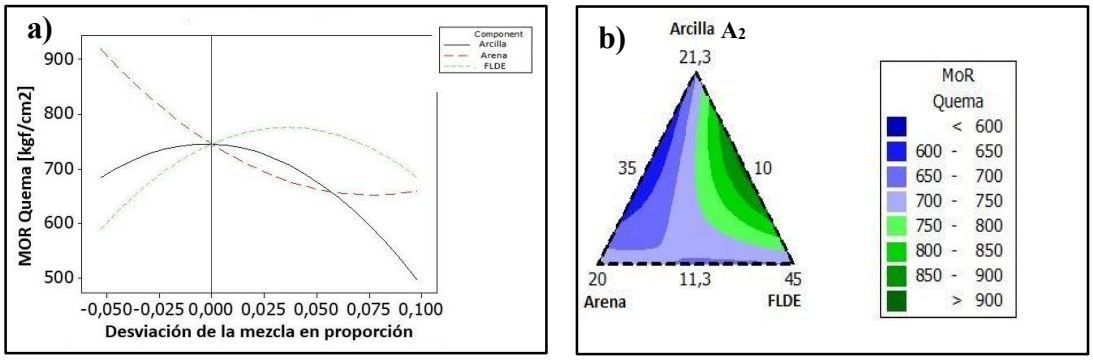


Fig. 23. Resistencia mecánica en quema: a) Gráfico de traza de respuesta. b) Gráfico de contorno de mezcla.

E) Índice de deformación piro plástica (IDP).

Los resultados del índice de deformación piro plástica (IDP) para todos los DOE, junto con las pastas comparativas, se presentan en la **TABLA IX**. Se observa que únicamente los DOE 1 y 3 se encuentran dentro del rango de las pastas comparativas. Por otro lado, los DOE 4 y 7 presentan los valores más bajos de IDP, mientras que los DOE 2, 5 y 6 presentan los valores más altos. En esta evaluación se busca que el índice de deformación piro plástica sea bajo, entre más bajo sea este índice más posibilidades de que la pasta cumpla los requerimientos establecidos.

El elevado índice de deformación piroplástica del DOE 5 se debe a su alto contenido de feldespato lo que favorece la formación de fase vítrea durante la cocción, lo que incrementa la deformación.

Por su parte, el alto IDP del DOE 6 podría atribuirse a una menor compactación de la pasta, como se evidencio en las propiedades de módulo de rotura en crudo y en quema, así como en las curvas de filtro pensado, donde esta pasta presentó una rápida perdida de agua, lo que contribuye a una mayor deformación piroplástica. En cuanto al DOE 2, su alto contenido de arena, posiblemente con una distribución granulométrica inadecuada y tamaños de grano elevados, favorecen la deformación de las muestras, lo que explica su alto IDP.

TABLA IX. ÍNDICE DE DEFORMACIÓN PIRO PLÁSTICA (IDP).

IDP	PG035	PG052	DOE1	DOE2	DOE3	DOE4	DOE5	DOE6	DOE7
Promedio	20,02 ±1,72	23,30 ±1,41	21,32 ±1,32	24,92 ±1,03	23,08 ±4,85	14,50 ±1,76	26,45 ±1,28	25,60 ±1,30	19,23 ±3,08

En la **Fig.24a** se observa que el índice de deformación piro plástica (IDP) disminuye a medida que aumenta la proporción de arcilla en la mezcla. Es importante señalar que, generalmente, una pasta cerámica con buena plasticidad suele presentar un mayor índice de deformación piro plástica.
Por otro lado, la arena favorece el aumento de la deformación piro plástica.

En la **Fig.24a y b** se observa que con pequeñas proporciones de arena el IDP es bajo, pero a medida que se incrementa su contenido, la deformación aumenta significativamente. Asimismo, el aumento en la cantidad de feldespato también eleva el índice de deformación, lo que es coherente con su función como fundente; un mayor contenido de feldespato promueve una mayor vitrificación, generando contracciones y cambios dimensionales más pronunciados.

En cuanto a los DOE evaluados, los diseños 1 y 3 cumplen con los requerimientos establecidos por la Empresa para la deformación piro plástica, ya que sus valores se encuentran dentro del rango de las pastas comparativas. Sin embargo, dado que no existe un valor absoluto específico para este índice, el análisis se centra únicamente en la influencia relativa de los materiales sobre esta propiedad, considerando el rango adecuado según la aplicación de la pasta cerámica.

La arena y la arcilla son los materiales que más afectan la deformación piro plástica Para obtener un comportamiento adecuado, es recomendable mantener proporciones moderadas de ambos componentes, aproximadamente entre 11% y 14% en peso, asegurando así un equilibrio adecuado en esta propiedad.

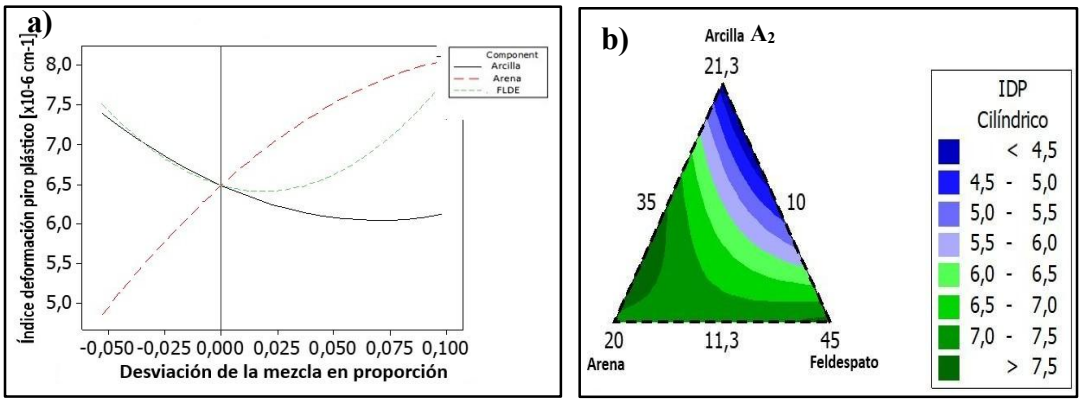


Fig. 24. Índice de deformación piro plástica: a) Gráfico de traza de respuesta. b) Gráfico de contorno de la mezcla.

F) Determinación de la zona de trabajo

En **la Fig. 25** se presenta un diagrama de contorno de mezcla, donde se muestra la zona de trabajo o zona adecuada para la formulación final seleccionada, donde se observa que, en la zona blanca, es donde la formulación es la indicada para mejorar las propiedades de la pasta cerámica. En esta zona se encuentran los rangos buscados de módulo de rotura en quema, contracción, e índice de deformación piroplástica (IDP). En esta figura se observa, que el material que más influye en la zona blanca es la arcilla, lo que indica que la arcilla es el material que debería estar en mayor cantidad para mejorar el módulo de rotura en quema, la contracción y el índice de deformación plástica.

Comparando los resultados de la **Fig. 25** (área óptima de trabajo) con los resultados que se muestran en la **Fig. 9** del diseño de mezclas para encontrar las formulaciones, se puede ver que ningún DOE se encuentra en la zona adecuada de trabajo, es decir que ninguna de las formulaciones usadas en los DOE seria adecuada para mejorar u obtener las estándares mínimos de las propiedades de módulo de rotura en quema, contracción e índice de deformación piro plástica y se debe de hacer una formulación de DOE que este en esta zona de trabajo óptimo para mejorar las propiedades de la pasta.

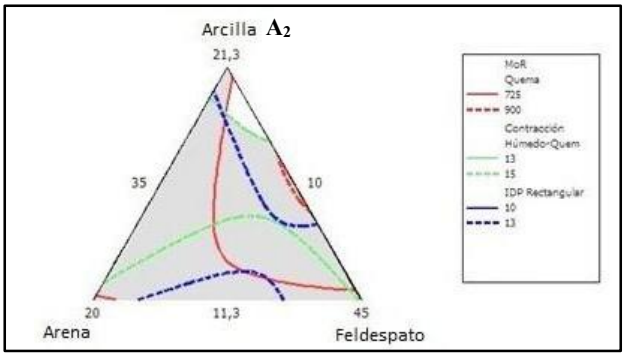


Fig. 25. Diagrama de contorno para determinar el área adecuada de trabajo.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1) Conclusiones

La arcilla evaluada aporta plasticidad a la pasta cerámica, como se evidenció en los resultados de contracción y en el índice de deformación piro plástica (IDP). A mayor porcentaje de arcilla, la deformación de la pasta disminuye r, obteniéndose valores del IDP para los DOE 1 y 3 dentro del rango de las pastas comparativas.

Por su parte, la arena, dependiendo de la formulación de la pasta, favorece la posible formación de mullita durante la cocción de las muestras, lo que aumenta significativamente la resistencia mecánica (MOR quema) de las muestras. Además, se encontró que el MOR en crudo aumenta con la reducción de arena y el aumento del contenido de arcilla, ya que esto mejora la cohesión de las partículas y, por lo tanto, la compactibilidad de las muestras. Así mismo, el uso excesivo de feldespato en las mezclas provoca una disminución del MOR en crudo, dado que este material actúa como desgrasante reduciendo la plasticidad. Además, este material es el que más influye en el desempeño de secado, una gran cantidad de feldespato disminuye la humedad critica de la pasta.

La formulación de la pasta DOE 1, mostró el mejor módulo de ruptura (MOR) en crudo, lo que se debe, en parte, a la cantidad de arena empleada en su formulación, lo que contribuyó a mejorar su resistencia mecánica. Mientras que, durante la cocción, esta pasta genera la posible formación de mullita, lo que se traduce en el mayor MOR en quema. En ambos casos, el DOE 1 cumple con los requisitos establecidos para su aplicación.

El DOE 1 mostró las mejores propiedades de resistencia mecánica en crudo y en quema, además su índice de piro plasticidad se encuentra dentro del rango de las pastas comparativas. Sin embargo, ninguna formulación de los DOE se encuentra dentro de la zona adecuada de trabajo, es decir que ninguno de ellos presenta la formulación correcta para mejorar todas las propiedades (módulo de rotura en crudo y en quema, contracción e índice de deformación piro plástica). No obstante, todos los DOE presentaron mejoras superiores al 1% en el desempeño de secado.

El DOE 1 mostró las mejores propiedades de resistencia mecánica en crudo y en quema, además su índice de piro plasticidad se encuentra dentro del rango de las pastas comparativas. Sin embargo, ninguna formulación de los DOE se encuentra dentro de la zona adecuada de trabajo, es decir que ninguno de ellos presenta la formulación correcta para mejorar todas las propiedades (módulo de rotura en crudo y en quema, contracción e índice de deformación piro plástica). No obstante, todos los DOE presentaron mejoras superiores al 1% en el desempeño de secado.

Los DOE 3, 5, 6 y 7 presentaron un aumento en la humedad crítica mayor al 1%, lo cual indica una mejora en el desempeño de secado de las pastas cerámicas. Se identificó que el feldespato es el material que más influye en el desempeño de secado, proporciones excesivas de este material disminuye la humedad critica de la pasta. Sin embargo, los DOE que mejoraron el secado de las pastas no cumplen con los estándares mínimos de índice de deformación piro plástica.

2) Recomendaciones

Para optimizar la formulación y el proceso de fabricación de pastas cerámicas, se recomienda controlar estrictamente la distribución granulométrica de las materias primas, especialmente de la arena, asegurando una adecuada compactación y evitando defectos. Es importante implementar procesos de molienda y tamizado más eficiente para lograr una granulometría fina y homogénea. Lo que mejora la fluidez y la compactación de la pasta. Además, se debe evitar el exceso de feldespato en la mezcla, ya que disminuye la plasticidad y la resistencia mecánica en crudo, su proporción debe mantenerse dentro de los límites que aseguren la formación de fase vítrea suficiente tras la quema, pero sin comprometer la trabajabilidad.

La calidad y procedencia de la arena también debe ser cuidadosamente seleccionada, optando por arenas con bajo contenido de residuo y contaminantes. El contenido de humedad y la homogeneidad de la pasta deben ajustarse para optimizar la compactación durante el prensado y evitar problemas de secado y formación de grietas. Se puede considerar la incorporación de aditivos plastificantes y ligantes, que mejoren la plasticidad y la resistencia en crudo.

REFERENCIAS

[1] J. Morales Güeto, TECNOLOGÍA DE LOS MATERIALES CERÁMICOS. Madrid: Diaz St., 2005.

[2] SACMI, Tecnología cerámica aplicada, Impiva., vol. I. 2004.

[3] R. Galindo. “Arcillas y pastas”. [En línea]. Disponible: http://www.rafagalindoceramica.com/

[4] E. del C. Vázquez Malagón, Materiales Cerámicos: Propiedades, Aplicaciones y Elaboración. México D.F., México: Centro de Investigaciones de Diseño Industrial, Facultad de Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México, 2005.

[5] D. A. Estrada y J. Espinosa de los Monteros, “El Secado De Los Productos Cerámicos,” Inst. Ceram. Vidr., vol. 21, no. 6, pp. 327-339, 1982.

[6] J. P. Cuervo Aguiar, “Control de inventarios en planta, mediante la evaluación del proceso de secado con énfasis en la pérdida de humedad en el molde y secado ambiente de las piezas, tazas y “one piece” de la compañía SENCO COLOMBIANA S.A.S”, trabajo de grado, Univ. Antioquia, Medellin, 2019.

[7] W. M. Carty, “Approach to Drying,” Introduction to Ceramic Processing, Alfred University, 2004.

[8] D. A. Brosnan y G. C. Robinson, Introduction to Drying of Ceramics: With Laboratory Exercises. Westerville, OH: The American Ceramic Society, 2003.

[9] D. C. Lenis Calderón, “Análisis y mejora en los controles de variables que influyen en el secado por atomización de pasta cerámica”, trabajo de grado, Univ. Pamplona, Pamplona, 2020.

[10] Área Técnica de Pastas GTC – Área Técnica Mesa Servida, "Pastas Cerámicas," Curso-ceramico-LC-2022.pdf, Octubre/Noviembre 2022.

[11] D. E. Muñoz Molina, Desarrollo de pasta de china vitrificada con materia prima nacional, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Química, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2021

[12] M. E. Mari, Los materiales cerámicos: aplicaciones estructurales, funcionales y artísticas. Buenos Aires: Librería y Editorial Alsina, 2011.

[13] M. P. Franco, D. Mazo, S. Ramírez, and Y. Baquero, "Planta Electro-Porcelana," GAMMA, Medellín, Colombia, 2024. [PowerPoint slides].

[14] P. A. Ospina Gómez, "Influencia de la Adición o Aumento en la Cantidad de Mullita en la Resistencia a la Flexión de una Pasta de Porcelana Eléctrica Comercial," Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2015.

[15] D. C. Alvarez-Rozo, J. Sánchez-Molina, F. A. Corpas-Iglesias, y J. F. Gelves, "Características de las materias primas usadas por las empresas del sector cerámico del área metropolitana de Cúcuta (Colombia)," Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, vol. 57, no. 4, pp. 247–256, 2018.

[16] Auxiliares Técnicos de Proceso - Laboratorio de Electroporcelana Gamma S.A.S., "SOP: Determinación de humedad en balanza digital," versión 1, documento interno, 26-dic-2022.

[17] Auxiliares Técnicos de Proceso - Laboratorio de Electroporcelana Gamma S.A.S., "SOP: Medición de la viscosidad en una suspensión de arcilla o pasta en laboratorio Gamma," versión 1, documento interno, 14-Jul-2016.

[18] Auxiliares Técnicos de Proceso - Laboratorio de Electroporcelana Gamma S.A.S., "SOP: Medición del peso por litro en una suspensión, laboratorio Gamma," versión 1, documento interno, 14-Jul-2016.

ANEXOS

A) Poster

Departamento de Ingeniería de Materiales

Evaluación de materiales para la sustitución de arcilla en pasta silícea para aisladores cerámicos con énfasis en el desempeño de secado

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
Facultad de Ingeniería

PRACTICANTE: Alejandro Rojas García
ASESORES: Edward Restrepo Hoyos, Juan Jose Bedoya Jimenez
PROGRAMA: Ingeniería de Materiales
Semestre de la práctica: 2025-1

Introducción

ELECTRO PORCELANA GAMMA S.A.S., es una compañía de CORONA, multinacional colombiana con más de 140 años de historia empresarial. Entre los productos que fabrica la empresa para el sector de la energía se encuentran los aisladores cerámicos, donde la arcilla A_1 es uno de los componentes de la pasta empleada para elaborar estos productos. Sin embargo, su disponibilidad a corto plazo se ve comprometida, lo que podría detener la producción. Esta situación exige el estudio y el uso de materiales alternativos que puedan sustituir esta arcilla.

El presente trabajo de investigación desarrollado en ELECTRO PORCELANA GAMMA S.A., permitió desarrollar una nueva pasta para la fabricación de aisladores cerámicos, reemplazando la arcilla A_1 (comúnmente empleados en su elaboración) por materiales alternativos. Durante el estudio se realizó énfasis en el proceso de secado de la pasta, logrando aumentar su humedad critica, lo que mejoró el secado de ellas.



Fig. 1. Aisladores cerámicos.

Metodología

Con el fin de reemplazar la arcilla A_1 empleada en la elaboración de aisladores cerámicos, se formularon 7 pastas cerámicas "DOE", utilizando materiales alternativos (arcilla A_2, arena y feldespato). Estas fueron comparadas con 2 pastas de referencia utilizadas comúnmente para su fabricación.

Tabla I. Formulaciones de las pastas cerámicas.

Material	DOE 1	DOE 2	DOE 3	DOE 4	DOE 5	DOE 6	DOE 7
	% en peso						
A_2	14,6	11,3	13,0	21,3	11,3	13,0	18,0
Arena	13,3	20,0	11,7	10,0	10,0	16,7	11,7
Feldespato	38,4	35,0	41,6	35,0	45,0	36,6	36,6
*MC	33,7						

*MC: Materiales comúnmente empleados en la formulación de las pastas.

Resultados

En la Fig. 2, se muestran las curvas de secado de las pastas formuladas y de referencia (PG052 y PG036). Estas muestran el punto critico (cambio de pendiente de la curva) de todas las pastas cerámicas, el cual indica donde la contracción se estabiliza y la velocidad de secado disminuye, lo que permite establecer las condiciones óptimas de secado.

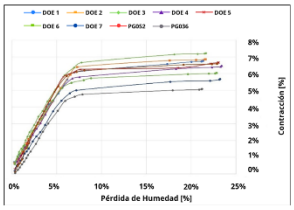


Fig. 2. Curvas de secado de las pastas.

La influencia de los materiales alternativos en el proceso de secado se enseña en la Fig. 3, donde se observa que a menor cantidad de arcilla, menor es la humedad critica de las pastas.

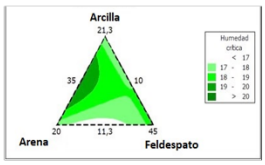


Fig. 3. Diagrama de contorno de mezclas para curvas de secado.

En la Fig. 4a, se observa que la arcilla es el material que más influye en el módulo de ruptura (MOR) en crudo. Este disminuye a menor proporción de arcilla en la mezcla.

Por su parte, en la Fig. 4b, se aprecia que el MOR quema, depende de la cantidad de arena y feldespato presente en la mezcla. Cantidades mayores al 39% en peso de feldespato disminuye el MOR quema, mientras que, a menor proporción de arena (< 13,3% en peso) este tiende a incrementar.

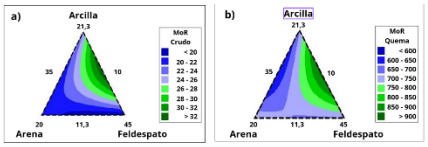


Fig. 4. Módulo de ruptura (MOR). a) Crudo. b) Quema.

En el diagrama de contorno, ver Fig. 5, se muestra la zona de trabajo de las pastas formuladas, donde se observa que la zona blanca es el área donde la formulación es adecuada para mejorar las propiedades de la pasta.

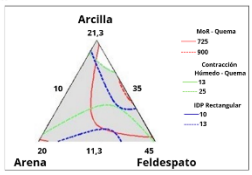


Fig. 5. Diagrama de contorno.

Objetivos

- Evaluar materiales alternativos para la sustitución de la arcilla A_1 en pastas silíceas para aisladores cerámicos, con énfasis en el desempeño de secado

Específicos

- Analizar materiales alternativos que puedan sustituir a la arcilla A_1 en la formulación de pastas silíceas para aisladores cerámicos, a partir de sus propiedades fisicoquímicas y mineralógicas
- Desarrollar pastas silíceas para aisladores cerámicos utilizando los materiales alternativos evaluados.
- Evaluar el comportamiento de las piezas objeto de estudio mediante el empleo de curvas de secado

Conclusiones

- Los DOE 3, 5, 6 y 7 presentaron un aumento en la humedad critica, lo cual indica una mejora en el desempeño de secado de las pastas cerámicas. Se determinó que el feldespato es el material que más influye en el proceso secado.
- La arcilla empleada aporta buena plasticidad y compactibilidad a la pasta, lo que aumenta el módulo de ruptura en crudo.
- El uso de feldespato en cantidades mayores al 39% en peso en las mezclas, provoca una disminución del módulo de ruptura en crudo, dado que este actúa como desgrasante reduciendo la plasticidad de la pasta.
- El DOE 1 mostró el mejor módulo de ruptura en quema, debido a la posible formación de mullita durante la cocción. Esta formulación cumple con los requisitos establecidos para su aplicación en aisladores cerámicos.

DATOS DE CONTACTO DEL AUTOR:
3136959210 +57 3136959210 Alejandro.rojasg@udea.edu.co https://www.linkedin.com/in/alejandro-rojas-