

EFFECTO DE LA DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA EN VARIABLES  
DE DESEMPEÑO DE UNA PASTA PARA PORCELANA ELÉCTRICA

JULIANA GONZÁLEZ VELÁSQUEZ  
DIANA XIMENA TORO ARISTIZÁBAL

UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PROCESOS  
MEDELLÍN  
2009

EFFECTO DE LA DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA EN VARIABLES  
DE DESEMPEÑO DE UNA PASTA PARA PORCELANA ELÉCTRICA

JULIANA GONZÁLEZ VELÁSQUEZ  
DIANA XIMENA TORO ARISTIZÁBAL

Trabajo de grado para optar al título de  
Ingeniero de Proceso

Asesor

Andrés Cadavid Rendón  
Ingeniero Ceramista

UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PROCESOS  
MEDELLÍN  
2009

NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

PRESIDENTE DEL JURADO

---

JURADO

---

JURADO

---

Medellín, 2009.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al ingeniero Andrés Cadavid, asesor del proyecto.

Al Ingeniero Juan Pedro Tascón, por su apoyo incondicional a lo largo del proyecto.

A la Universidad EAFIT, por brindarnos una educación de excelente calidad.

A Gamma, Aisladores CORONA, por facilitar el uso de sus instalaciones para la elaboración del proyecto.

## TABLA DE CONTENIDO

GLOSARIO.....	1
RESUMEN .....	2
1. INTRODUCCIÓN .....	3
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	4
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	6
1.4 MARCO REFERENCIAL .....	8
2. MATERIALES Y MÉTODOS .....	15
2.1 MATERIALES .....	15
2.2 METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTOS .....	17
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	26
3.1 EVALUACIÓN EN CRUDO.....	26
3.2 EVALUACIÓN DESPUÉS DE COCCIÓN.....	34
3.3 EVALUACIÓN DE INTERACCIONES (Gráficas de superficies).....	48
3.4 ANÁLISIS ECONÓMICO .....	50
4. CONCLUSIONES.....	56
4.    RECOMENDACIONES.....	58
BIBLIOGRAFÍA .....	59

## LISTA DE FIGURAS

Gráfica 1. Procesos involucrados en el proyecto .....	25
Gráfica 2. Distribución porcentual acumulada del tamaño de partículas.....	28
Gráfica 3. Histograma de la distribución de tamaño de partícula por intervalos	29
Gráfica 4. Resistencia mecánica en crudo.....	30
Gráfica 5. Contracción Húmedo-Seco.....	31
Gráfica 6. Prueba de plasticidad de Pfefferkorn .....	33
Gráfica 7. Efecto de los factores en el MOR quema .....	36
Gráfica 8. Gráfica de interacción de los factores para el MOR quema.....	38
Gráfica 9. Efecto de los factores en la deformación pirolástica.....	38
Gráfica 10. Gráfica de interacción de los factores para la deformación pirolástica .....	39
Gráfica 11. Efecto de los factores en la contracción seco-quema.....	41
Gráfica 12. Gráfica de interacción de los factores para la contracción seco-quema .....	41
Gráfica 13. Efecto de los factores en la contracción total.....	42
Gráfica 14. Gráfica de interacción de los factores para la contracción total .....	43
Gráfica 15. Efecto de los factores en la densidad aparente .....	44
Gráfica 16. Gráfica de interacción de los factores para la densidad aparente .	45
Gráfica 17. Interacción de los factores y las diferentes variables de respuesta	48

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resultados de pruebas en crudo.....	26
Tabla 2. Diseño de experimentos $2^2$ con puntos centro.....	35
Tabla 3. Resultados de la prueba de porosidad abierta .....	46
Tabla 4. Balance de pérdidas y ganancias.....	51
Tabla 5. Flujo de caja libre (FCF).....	53
Tabla 6. Valor económico agregado (VEA).....	54

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1: Fotos conos pirométricos .....	63
ANEXO 2: Análisis de distribución normal de las variables analizadas.....	64
ANEXO 3: Gráficas de Pareto para los Efectos de los Factores .....	66
Anexo 4: Foto del montaje para deformación piropiástica.....	68
ANEXO 5.Foto medición de deformación piropiástica.....	69

## GLOSARIO

**CERÁMICA:** Conjunto de materiales duros, frágiles y resistentes al calor, y a la corrosión, como el vidrio, la loza y la porcelana, fabricados por cocción de minerales no-metálicos a altas temperaturas. Los materiales cerámicos tienen gran estabilidad química y eléctrica que además son malos conductores térmicos y eléctricos. [1].

**DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA:** es una lista de valores o una función matemática que define las cantidades relativas de partículas, organizadas de acuerdo a su tamaño [2]. Para este proyecto se emplea el método de la sedimentimetría, el cual mide la distribución de tamaño de partícula por peso.

**PORCELANA ELÉCTRICA:** Es un producto cerámico sometido, durante la cocción, a unas temperaturas tales que permitan obtener un material vitrificado, con **cero porosidad abierta**, sin necesidad de recubrimientos para lograr su total impermeabilidad. Entre las porcelanas, la porcelana eléctrica es la de mas alto grado de vitrificación [3].

## RESUMEN

El objetivo de esta investigación consistió en evaluar el efecto de la distribución de tamaño de partícula (DTP) y la temperatura máxima de cocción en variables de desempeño cerámico de una pasta para porcelana eléctrica, con el propósito de entender las relaciones combinadas que existen entre dichas variables y obtener superficies de respuesta que faciliten cambios en el proceso de producción. Se trabajó un diseño de experimentos de dos factores con dos niveles y punto centro, siendo el primer factor el tiempo de molienda con niveles de cero y diez horas y el segundo factor la temperatura máxima de cocción con niveles de 1210 y 1250°C. Se encontró finalmente que una pasta mas fina, presenta mayor resistencia mecánica y requiere menos temperatura de cocción para alcanzar cero porosidad abierta, pero que esta tiene mayor contracción y mayor deformación piropiástica. Contrario a esto, una pasta más gruesa tiene menor contracción y menor deformación piropiástica, pero presenta una disminución en la resistencia mecánica y requiere mayor temperatura de cocción. Se encontró también que este proyecto abre las puertas a nuevos mercados que darían inicio a futuros proyectos, entre ellos el mercado de aisladores de gran tamaño, el cual generaría utilidades netas de COP \$85'000.000 en el tercer año de ejecución.

**Palabras claves:** Porcelana eléctrica, distribución de tamaño de partícula, desempeño cerámico.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El desempeño de un material cerámico (pasta) durante su procesamiento depende de características físicas como, Distribución de Tamaño de Partícula “DTP” y Área Superficial Específica “ASE”, químicas, y mineralógicas de sus componentes [4]. Estas características determinan propiedades palpables que inciden en cómo se procesa el material y el producto resultante. Dichas propiedades pueden medirse mediante un número de pruebas que varían según las exigencias del proceso y producto final de cada industria cerámica.

En el caso de la porcelana eléctrica, algunas de las propiedades más importantes son: deformación pirolástica, módulo de ruptura “MOR”, porosidad abierta, densidad aparente, contracción, y plasticidad. La plasticidad y la contracción determinan la sensibilidad que el material tendrá a fallar durante los procesos de formación y secado. La densidad, porosidad abierta, y MOR definen características mecánicas y eléctricas del producto [2].

En este trabajo se busca explicar las relaciones combinadas que existen entre variables de desempeño cerámico en la porcelana eléctrica, es decir, estudiar el desempeño y comportamiento de una pasta ante cambios en las características iniciales de la misma. Para esto se pretende variar únicamente la distribución de tamaño de partícula, dejando fijas las demás características de la pasta, para luego valorar su efecto sobre el comportamiento de la porcelana a escala de laboratorio.

Conocer el comportamiento de las diferentes variables al hacer una modificación en los parámetros iniciales de una pasta, facilita considerablemente cualquier cambio en el proceso de producción, bien sea para nuevos desarrollos, apertura de nuevos mercados, mejoras enfocadas u otros ajustes que puedan ser necesarios buscando unas condiciones finales específicas.

## **1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO**

### **1.2.1 Objetivo general**

Evaluar el efecto de modificar la distribución de tamaño de partícula de una formulación específica para porcelana eléctrica, en variables de desempeño cerámico; con el fin de entender las relaciones combinadas que existen entre

dichas variables y obtener superficies de respuesta que faciliten cambios en el proceso de producción.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Evaluar, mediante un diseño de experimentos, la forma en que la distribución de tamaño de partículas afecta variables de desempeño de una pasta a escala de laboratorio, tales como: contracciones, deformación pirolástica, plasticidad, densidad aparente, porosidad y resistencia mecánica.

- Evaluar la forma en que la distribución de tamaño de partícula obliga a variar la temperatura de cocción de la porcelana para lograr determinadas propiedades en quema.

- Analizar, mediante un diseño de experimentos factorial, obteniendo gráficas de superficie para cada variable respuesta, las relaciones combinadas existentes entre DTP y temperatura de cocción y variables de desempeño, con el fin de obtener superficies que indiquen combinaciones óptimas y faciliten cambios en el proceso productivo.

- Analizar, mediante técnicas de evaluación financiera de proyectos, los beneficios económicos que traerá el proyecto a la empresa para la cual se desarrolla la investigación haciendo énfasis en su búsqueda de nuevos mercados.

### **1.3 JUSTIFICACIÓN**

Este proyecto realizado en la ciudad de Medellín por dos alumnas de ingeniería de procesos de la universidad EAFIT, propone evaluar el efecto de modificar la distribución de tamaño de partícula (DTP) en el desempeño cerámico de una formulación específica para porcelana eléctrica.

Conociendo el comportamiento de las diferentes variables al hacer una modificación en los parámetros iniciales de la pasta, se facilitan considerablemente los cambios en el proceso de producción, básicamente en tres aspectos:

1. Aspecto Tecnológico: El diseño y elaboración de nuevos desarrollos y/o mejoras en los productos, se ven afectados por cambios que puedan ocurrir en la clasificación inicial de las materias primas o cambios en la temperatura de cocción de las pastas, así como en procesos específicos tales como el tamizado, la molienda y el filtro prensado, es decir, la producción de cualquier

2. Aspecto Ambiental: De acuerdo con Oda, la distribución de tamaño de partícula es de gran influencia en las contracciones durante el proceso de secado y de cocción, y éstas a su vez en la aparición de grietas [5]. El proceso de producción de porcelana eléctrica puede llevarse a cabo por dos métodos: Torneado en seco y torneado en húmedo. El primero es un proceso más eficiente, ya que genera un menor porcentaje de pérdidas por agrietamiento de las piezas durante secado, pero tiene un alto impacto ambiental por la cantidad de material particulado que produce. El segundo tiene un mayor porcentaje de rotura, pero por el hecho de ser en húmedo, genera un porcentaje de material particulado mucho menor que el primero. Por lo general para producir aisladores de porcelana de gran tamaño se usa el primer método por las condiciones ya explicadas. Si el cambio en la DTP tiende a disminuir grietas en el proceso, todo procesamiento para producir porcelana eléctrica, sin importar el tamaño ni la forma, podría hacerse por torneado en húmedo, lo que disminuiría notablemente la cantidad de material particulado y polvos generados por parte de los fabricantes de dicho producto.
3. Aspecto Socio-Económico: Una disminución en las contracciones disminuye el agrietamiento de la porcelana y por ende el porcentaje de rotura de la misma. Todos estos factores llevan a una disminución en los costos de producción, además de ayudar en el crecimiento de la empresa, ya que teniendo una pasta en óptimas condiciones, podrían producirse aisladores de mayor tamaño,

El proyecto aquí presentado se desarrollará a escala de laboratorio y obtendrá resultados de combinaciones óptimas de variables cerámicas modificando sólo la DTP, que pueden ser usadas para algunos fines productivos después de ser escalado.

#### **1.4 MARCO REFERENCIAL**

La principal función del aislamiento en los circuitos eléctricos es la separación física de conductores y la regulación o prevención del flujo de energía entre ellos. Los aisladores tienen la función de proveer soporte mecánico, disipar el calor, y proteger los conductores del ambiente. Cuando se usan materiales cerámicos para este fin se les llama aisladores cerámicos, entre estos se incluyen la mayoría de los vidrios, las porcelanas y los materiales compuestos de óxidos y nitruros [6].

##### **1.4.1 Porcelana eléctrica**

La mayor ventaja que tienen los materiales cerámicos como aisladores es su capacidad de operar a altas temperaturas sin que se genere una degradación peligrosa en sus propiedades químicas, mecánicas o dieléctricas. La porcelana

triaxial es la más comúnmente usada para aisladores y está compuesta de mezclas de feldespatos  $[(K, Na)_2O-3Al_2O_3-6SiO_2]$ , caolines  $(Al_2O_3-2SiO_2-2H_2O)$  y cuarzo  $(SiO_2)$  [6].

La composición de las materias primas para las porcelanas triaxiales es generalmente 40-60% de arcillas, 20-35% de feldespatos y de un 20-30% de cuarzo. Cada uno de estos materiales le da diferentes características a la porcelana cocida [7]. Las arcillas y caolines proporcionan la plasticidad y la resistencia en crudo de las piezas. Los feldespatos proveen la principal fase fundente (lo que disminuye la temperatura de maduración) y hacen parte de la estructura no porosa en la cual se desarrolla parte de la mulita. Un incremento en la fase vítrea y en el contenido alcalino tienden a disminuir tanto las propiedades eléctricas como la resistencia mecánica de la porcelana. El cuarzo suele ser la fracción con mayor tamaño de partícula, lo que disminuye el riesgo de grietas durante secado, y forma el cuerpo de la pieza, reduciendo la contracción y la deformación durante la cocción [7,8].

La clasificación de las materias primas de acuerdo con el tamaño de sus partículas es uno de los pasos más importantes en los procesos cerámicos. La distribución de los diferentes tamaños de partículas de las materias primas afecta todas las operaciones posteriores y determina, en alto grado, las propiedades del producto final. En algunas operaciones cerámicas toda la materia prima es separada en fracciones o grupos de tamaños de partículas y luego recombinada para dar la distribución buscada [9].

Existe una estrecha relación entre el tamaño de las partículas de la pasta o mezcla y la resistencia electromecánica de la porcelana. La resistencia de la porcelana tiende a aumentar con la disminución del tamaño de partícula. La razón de tal aumento, es que el uso de materiales más finos produce una microestructura más homogénea en la porcelana. Por otra parte, en el arte de producir porcelana, se sabe que entre más fino sea el tamaño de partícula de la pasta, más probable será la aparición de grietas durante los procesos de secado y cocción. En general, cuando el contenido de partículas con un diámetro menor a  $10\mu\text{m}$ , supera el 85% del peso de la pasta, las grietas tienden a ocurrir en los dos procesos [5].

#### **1.4.2 Distribución de tamaño de partícula (DTP)**

La DTP de un polvo, material granulado, o de una suspensión, es una lista de valores o una función matemática que define las cantidades relativas presentes, organizadas de acuerdo a su tamaño [2]. Las materias primas para la cerámica se encuentran en una gran variedad de densidades, tamaños y composiciones mineralógicas y químicas. Dependiendo de las especificaciones del producto terminado y de los requerimientos del proceso, se emplearán materias primas con características específicas. Muchas piezas cerámicas tienen su mayor tamaño de partícula menor a malla 200 ( $74\ \mu\text{m}$ ), y la distribución de tamaño de partículas completa deberá ser medida usando sedimentimetría, el principio de Coulter, rayos láser y/o correlación de fotones [2].

La técnica más usada para medir la DTP es la sedimentimetría, la cual no realiza un conteo real de las partículas, sino que mediante la medida directa de la masa total de partículas en un nivel dado en la celda, es fácilmente convertida a una distribución numérica. En los sedígrafos (equipo empleado para determinar la DTP por sedimentimetría), los valores más altos y los más pequeños de tamaños de partículas son poco confiables, esto es alrededor de  $74\mu\text{m}$  y  $0.2\mu\text{m}$ , por lo que estos datos deben ser descartados y debe trabajarse en un rango intermedio [2].

#### **1.4.3 Variables de desempeño cerámico relacionadas con la DTP**

Debido a que la DTP puede afectar las propiedades de la porcelana, debe hacerse un control estricto de ésta para cualquier proceso cerámico. Entre las variables que pueden verse afectadas están:

Contracción: Son los cambios dimensionales que se generan en los procesos de secado y cocción de la porcelana. Se da gracias a la difusión de espacios vacíos (o llenos de agua cuando la pieza está húmeda) y su posterior eliminación acercando las partículas del material. Los poros son una fuente de espacios vacíos y los límites de grano son sumideros de espacios vacíos. El microflujo que se da a lo largo de los límites de grano, elimina dichos espacios y facilita el acercamiento de los centros de las partículas provocando así la contracción de la pieza [10].

Deformación piropiástica: se define como la flexión máxima que puede sufrir una pieza de porcelana durante el proceso de cocción. La deformación piropiástica de los materiales sinterizados, como son el gres porcelánico o la porcelana, dependen de muchos factores. Los más importantes son el tipo, la cantidad, la viscosidad y la reactividad de las fases líquidas proporcionadas por los feldespatos [11].

Plasticidad: Puede ser definida como la habilidad de un material para permanecer deformado sin romperse. Históricamente la plasticidad ha sido difícil de caracterizar, sin embargo, el test de plasticidad de Pfefferkorn es usado para medir el porcentaje de humedad más adecuado para la formación de cuerpos de porcelana [9]. Según Pfefferkorn la plasticidad de una pasta está determinada por el grado de aplastamiento que sufre una probeta cilíndrica de determinadas dimensiones, con diferentes dosis de agua, mediante el golpe de un pistón de un peso fijo cayendo de una altura determinada. Así entonces, midiendo la altura de la probeta deformada después del ensayo y calculando el % de humedad de cada probeta, puede obtenerse una curva que muestra la relación entre la deformación y el contenido de humedad de la pasta [12].

Vitrificación medida como porosidad abierta: La sinterización es esencialmente una remoción de los poros existentes entre las partículas iniciales de una pasta cerámica (acompañado por una contracción), combinado con un crecimiento mutuo y un enlazamiento fuerte entre partículas adyacentes. Para que se lleve a

cabo se requieren dos elementos: un mecanismo para transporte de materia (difusión y un flujo viscoso) y una fuente de energía para activar y sostener dicho transporte (calor y gradientes de energía debido al contacto entre partículas) [13].

Densidad aparente: consiste en la división de la masa del sólido por el volumen aparente del mismo. El volumen aparente es el volumen real del sólido más el volumen de todos los poros cerrados que estén presentes, es decir, se le resta el volumen de los poros abiertos que pueden ser medido como el volumen de agua requerido para llenarlos[14].

Resistencia mecánica: Puede medirse como la resistencia a la flexión. Se define como el máximo estrés elástico en la ruptura de un material y es comúnmente conocida como módulo de ruptura o MOR. Esta puede ser medida con tres o cuatro puntos de flexión, dependiendo del equipo y para los materiales cerámicos estas dos medidas difieren significativamente [13].

#### **1.4.4 Antecedentes**

Existe una serie de investigaciones sobre el desarrollo de formulaciones de porcelana con mayor resistencia mecánica o que sean más simples de procesar, por ejemplo, buscando menores temperaturas de cocción [15]. Sin embargo, muy pocas publicaciones hablan de la variación del tamaño de partícula en las pastas. ODA, en 1988 en su patente establece que existe una relación entre la resistencia

de la porcelana y el tamaño de partícula de los materiales con que se ensambla. Cuando el tamaño de partícula es muy fino, se incrementa la resistencia electromecánica, pero existe el riesgo de generar grietas y este riesgo aumenta cuando la porcelana es utilizada para producir piezas de gran tamaño [5].

GAMMA, Aisladores CORONA, ha realizado una serie de ensayos buscando abrir nuevos mercados. Entre ellos cabe mencionar el de incrementar la resistencia electromecánica de la porcelana y el de fabricar aisladores de gran tamaño (mayores a 70cm de alto). En estos ensayos se ha evidenciado un gran impacto de la DTP en el desempeño cerámico, sin embargo, nunca se ha estudiado juiciosamente su efecto en las diferentes variables ni se ha identificado claramente su importancia.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1 MATERIALES**

Todos los materiales fueron suministrados por Sumicol S.A. Sólo a las arcillas se les dio un tratamiento previo de dispersión e hidrociclado en la planta de aisladores de CORONA. Los demás materiales fueron usados tal como los entrega Sumicol S.A.

#### **2.1.1 Materias primas:**

- Feldespato
- Arena
- Arcillas Buenavista, Sofía y María
- Caolín AVT

#### **2.1.2 Sustancias químicas:**

- Silicato de sodio
- Fucsina
- Kerosene

### 2.1.3 Equipos:

- Balanza digital marca Mettler Toledo, referencia wildcat
- Agitador mecánico marca Siemens, 0.9 HP, 1685 rpm
- Agitador mecánico marca Janke y Kunkel, referencia RW 20
- Tamices marca Tyler M80, M200 y M325.
- Molinos de bolas
- Picnómetro
- Viscosímetro Brookfield, modelo DV – II+
- Reómetro Brookfield programable modelo DV – III ultra
- Sedígrafo marca MICROMERITICS
- Equipo para prueba de flexión en tres puntos marca GABRIELLY (Italia, 1986).
- Pie de rey digital marca Digimatic
- Equipo para prueba de Pfefferkorn marca GAB-TEC
- Extrusora manual diseñada en GAMMA, Aisladores CORONA
- Soportes refractarios
- Horno eléctrico Naber-therm.
- Cámara de presión

Todos los equipos empleados se encuentran en el laboratorio cerámico de la empresa GAMMA, Aisladores CORONA.

## **2.2 METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTOS**

### **2.2.1 Revisión bibliográfica:**

Se hizo uso de la biblioteca interna de la Organización CORONA y su documentación histórica. Además se investigó el tema en artículos de bases de datos y entre los expertos en cerámica de la organización antes mencionada.

### **2.2.2 Consecución de materiales y ensamble de pastas:**

Inicialmente, se ensamblaron 18 Kg (de sólidos secos) de una pasta madre compuesta por:

- Arena malla 200
- Feldespato malla 200
- Caolín
- Arcillas dispersadas e hidrociclonadas corte 270

Los materiales fueron pesados según la formulación definida para el proyecto. La mezcla se agitó durante una hora a una velocidad de 1685 rpm para garantizar homogeneidad. Finalmente se tamizó por malla 80 para retirar contaminantes.

Esta pasta se dividió para evaluar tres distribuciones de tamaño de partícula (DTP) diferentes mediante tiempos de molienda de 0, 5 y 10 horas respectivamente, en molinos de bolas. El proceso de molienda fue realizado en el laboratorio colorificio de Sumicol S.A.

### **2.2.3 Preparación de muestras y métodos analíticos:**

Todos los procedimientos se realizaron por duplicado en el laboratorio cerámico de GAMMA, Aisladores CORONA ubicada en el municipio de Sabaneta, Antioquia.

#### **Evaluación en crudo:**

Posterior al proceso de molienda, se procedió a realizar mediciones a las tres suspensiones anteriormente mencionadas:

Peso/litro: se vierte la muestra bien agitada en un picnómetro calibrado hasta rebosar. Se tapa y se limpia el exterior para pesar la muestra y calcular así el peso específico (masa / volumen)

Viscosidad: Se mide en beakers de 500 ml, utilizando un viscosímetro Brookfield, modelo DV – II+.

Reología: Se mide empleando un reómetro Brookfield programable modelo DV – III ultra.

DTP: Se toman 6 gr de sólidos secos de la muestra, se afora hasta 100 ml en un erlenmeyer de 250 ml, se adiciona 1.5 ml de metafosfato de sodio 4% y una gota de Photo-flo 200 para disminuir la tensión superficial de la suspensión. Se agita

muy bien, hasta condiciones uniformes de la suspensión y se mide la DTP en un sedígrafo marca MICROMERITICS.

%Residuo sobre malla 325 y 200: Se miden 100 ml de la muestra y se hacen pasar por la malla requerida, lavando muy bien la probeta para que no quede material en ella. Luego se pasa agua sobre el tamiz para retirar todas las partículas inferiores al diámetro de poro de la malla, hasta que el agua salga translúcida. Finalmente se retira el material que queda sobre el tamiz poniéndolo en un plato para llevarlo a secar hasta peso constante. Con el peso seco del material retenido se calcula el porcentaje de residuo sobre la malla, así:

$$\%R = \frac{W_{residuo}}{(ppL - 1000) * 1.625} * 1000 \quad (1)$$

Donde  $W_{residuo}$  es el peso en gramos del material retenido sobre la malla,  $ppL$  es el peso por litro de la suspensión y 1.625 es una constante de las materias primas Colombianas que depende de la densidad de los sólidos.

Realizadas las mediciones en suspensión, las pastas se vertieron en moldes de yeso hasta obtener aproximadamente un 22% de humedad, la cual fue medida tomando 10 g del material y posteriormente secarlo hasta peso constante:

$$\%H = \frac{W_{humedo} - W_{seco}}{W_{humedo}} * 100 \quad (2)$$

Las pastas son luego desaireadas y extruidas manualmente en el laboratorio, formando barras y discos para las diferentes pruebas:

Módulo de ruptura a la flexión (MOR) en crudo: Se extruyeron 10 barras de cada pasta a probar, de aproximadamente 2.5 cm de diámetro y 15 cm de largo. Se dejaron al ambiente 24 horas y luego se secan en una estufa a 100°C. Posterior a esto, se midió la resistencia mecánica en un equipo para prueba de flexión en tres puntos marca GABRIELLY (Italia, 1986). Luego de la prueba, se midió el diámetro de cada barra en el área de falla para así calcular el módulo de ruptura (MOR) [16], según la ecuación:

$$\sigma = \frac{8PL}{\pi d^3} \quad (2)$$

Donde  $\sigma$  es el MOR, P es la carga máxima soportada, L es el espacio entre los puntos de apoyo, y d es el diámetro de la barra [11].

Contracción húmedo-seco: Se prepararon discos de diámetro estándar con el material en estado plástico, con el fin de medir los cambios dimensionales antes y después del secado. Para preparar los discos se empleó un aro metálico con dimensiones específicas, un baldosín y un fragmento de lona de filtro-prensa. Las mediciones dimensionales se realizaron empleando un pie de rey digital marca Digimatic [16].

Plasticidad: Se prepararon tres probetas de cada pasta con contenidos de humedad diferentes, empleando un molde cilíndrico de 33 mm de diámetro y 40 mm de altura. Se realiza la prueba de Pfefferkorn, se mide la altura de la probeta

aplastada después del ensayo y se calcula el % de humedad. Esto con el fin de encontrar una relación entre el contenido de agua y la deformación de la pasta [17]

### **Cocción:**

Los procesos de cocción se llevaron a cabo en un horno eléctrico programable. Como medida estimativa del grado de cocción se emplearon conos pirométricos, los cuales indican el avance de la quema por deformación.

### **Evaluación después de cocción:**

Con las pastas aún en estado plástico y desaireadas, se extruyeron barras que fueron luego sometidas a cocción con temperaturas máximas de 1210, 1230 y 1250°C, para evaluar las siguientes variables de desempeño:

Módulo de ruptura a la flexión (MOR) en quema: Se emplearon 10 barras cocidas de cada pasta a probar, de aproximadamente 1cm de diámetro y 15 cm de largo. Se midió la resistencia en un equipo para prueba de flexión en tres puntos marca GABRIELLY (Italia, 1986). Luego de la prueba en el equipo, se mide el diámetro de cada barra en el área de la falla para así calcular el Módulo de ruptura (MOR) [16].

Contracción en húmedo-quema: Los discos utilizados para la contracción húmedo-seco, se sometieron a cocción para medir los cambios dimensionales [16].

Deformación pirop lástica: Se tomaron seis barras de cada pasta, de aproximadamente 1cm de diámetro y 18 cm de largo, para someterlas a cocción ubicadas horizontalmente, sostenidas por un extremo en un adobe refractario perforado. En estas barras, el extremo libre tiende a caer por efecto de la gravedad cuando la fase vítrea (en estado líquido) logra una viscosidad suficientemente baja durante la cocción. Las probetas, luego de ser cocidas, se grafican sobre papel milimetrado con el fin de encontrar el ángulo de deformación (ver anexo 5) [16].

Densidad aparente: Fragmentos de las barras cocidas fueron pesados en una balanza digital. Luego estos mismos fragmentos se pesaron sumergidos en agua para así calcular la densidad aparente de las piezas siguiendo el principio de Arquímedes y utilizando agua como líquido para la inmersión de acuerdo a la ecuación [16]:

$$D = \frac{W}{W - W_{sumergido}} \quad (3)$$

Porosidad abierta: Pedazos de las barras cocidas se llevan a una cámara que contiene fucsina (líquido de alta penetrabilidad), la cual se tapa y se somete a

3000psi por 2 horas. Posteriormente se destapa la cámara y se fragmentan los trozos para verificar que la tinta no haya penetrado la porcelana [16].

#### **2.2.6 Análisis de resultados:**

Se siguió un diseño de experimentos factorial con dos factores y dos niveles con punto centro, construido en el software MINITAB versión 14. Para el proyecto se tuvo en cuenta este diseño de experimentos, específicamente por ahorro de materiales, ya que con diseños que tengan mas de diez corridas se podría incurrir en altos gastos de material, además el diseño tardaría mucho tiempo en llevarse a cabo. Por otra parte, un diseño dos por dos con punto centro permite realizar gráficas en tres dimensiones, en las cuales en los ejes X y Y estén los dos factores con sus respectivos niveles y en el eje Z se ubique la variable cerámica e evaluar.

Los factores evaluados son la DTP y la temperatura de cocción y los niveles son 0 y 10 horas de molienda y 1210 y 1250°C respectivamente. Los niveles de molienda se definieron de acuerdo a estudios previos realizados en la organización Corona, los cuales afirman que por encima de 12 horas de molienda la DTP no tiene cambios significativos. Los niveles de temperatura de cocción se escogieron a partir del punto centro, 1230°C, ya que esta es la temperatura a la que se trabaja en la empresa para la cual se realizó la investigación. Se realizaron cinco ensayos cada uno con su respectiva réplica, de acuerdo al diseño de experimentos seleccionado.

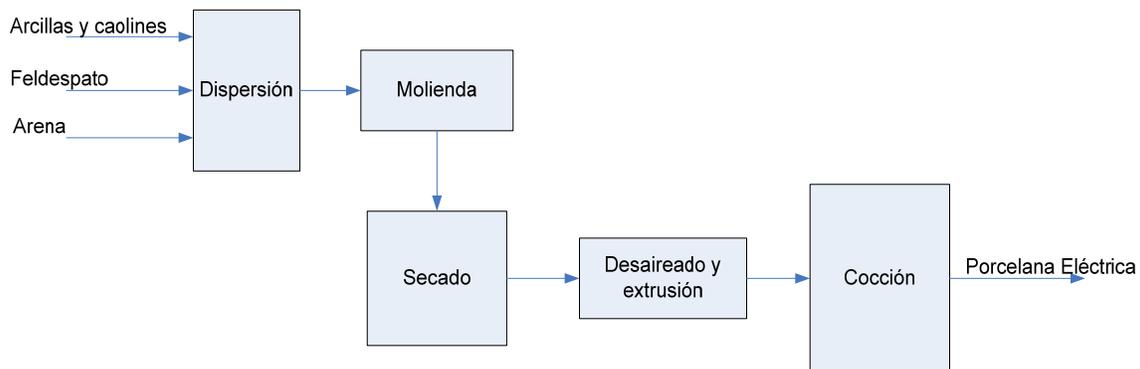
Para el análisis de resultados, se obtuvieron gráficas de análisis de impacto de los factores y de interacciones, y finalmente se graficaron superficies para las diferentes variables de respuesta, empleando el mismo software mencionado arriba.

### **2.2.7 Análisis Económico:**

Una vez obtenidos los resultados técnicos, se simuló el proyecto aplicado a la búsqueda de nuevos mercados. Para realizar este análisis se contó con información financiera y económica, la cual fue suministrada por la Organización y al mismo tiempo se hicieron algunos estimados, entre ellos, cantidades a producir y precio de los productos.

Este estudio económico fue realizado en un Software desarrollado por la organización CORONA, el cual arroja resultados de balances de perdidas y ganancias (P&G), flujo de caja libre (FCF) y valor económico agregado (VEA), de acuerdo a la información suministrada por el usuario.

### **2.2.8 Diagrama de Bloques**



Gráfica 1. Procesos involucrados en el proyecto

**La gráfica 1 muestra los principales procesos involucrados en el proyecto. Inicialmente se tienen las materias primas, las cuales son ensambladas y dispersadas. Posteriormente la pasta ya ensamblada pasa al proceso de molienda, el cual se realizó en molinos de bolas de Alumina, con capacidad para 2 Kg secos de sólidos. Una vez las tres pastas tienen la granulometría deseada, se procede a secarlas para retirar porcentaje de humedad y luego se pasa al proceso de formación, el cual consiste en extruir barras y placas cerámicas para usarlas en pruebas más adelante. Finalmente todas las probetas formadas en el paso anterior son llevadas a un horno con temperaturas definidas según en diseño de experimentos escogido, para obtener lo que denominamos porcelana eléctrica.**

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 EVALUACIÓN EN CRUDO

En la evaluación en crudo se realizan pruebas tanto a las suspensiones como a las probetas ya extruidas sin ser quemadas, como se explicó en la metodología. A continuación se presentan los resultados en la tabla 1, encontrados en la investigación.

Tabla 1. Resultados de pruebas en crudo.

<b>Propiedad</b>	<b>Pasta 0hr molienda</b>	<b>Pasta 5hr molienda</b>	<b>Pasta 10hr molienda</b>
Peso/Litro (g/L)	1510.6	1504.9	1507.4
Viscosidad (cP)	2990	3080	3120
d50	6.0%	5.1%	5.0%
% Residuo >75um (Malla 200)	1.7%	0.1%	0.06%
% Residuo >45um (Malla 325)	6.5%	1.8	0.8
Viscosidad plástica (mPa)	6.5	6.8	7.1
Esfuerzo de corte (dinas/cm <sup>2</sup> )	164.2	184.4	210.5
Humedad	21.1%	22.8%	21.8%

- Peso/litro: el peso/litro de cada muestra no se ve afectado por el tiempo de molienda. En la tabla 1, se puede ver que todos los valores son similares, esto

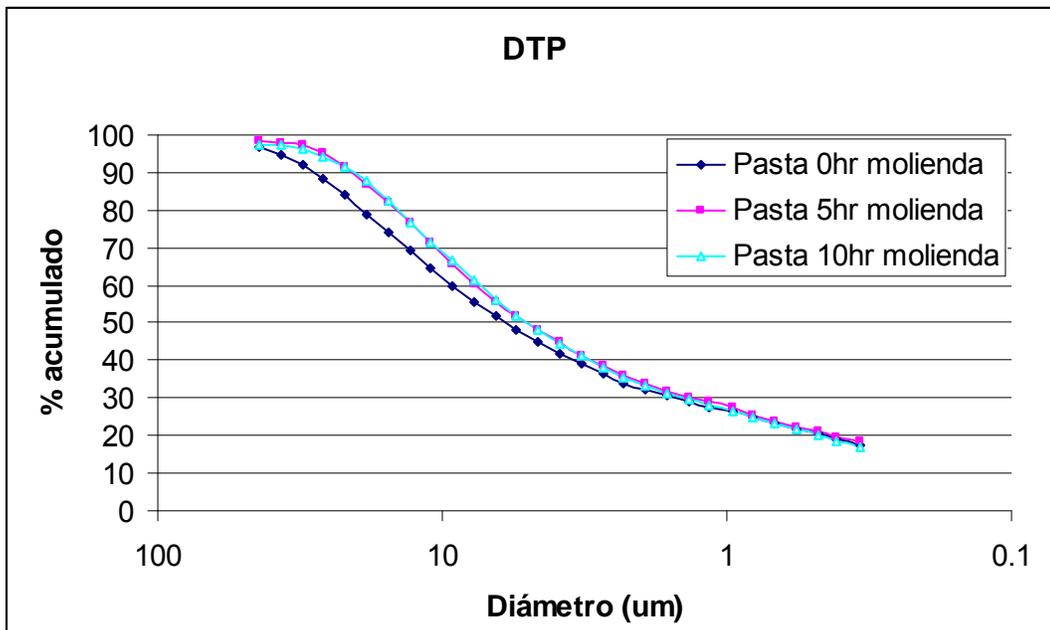
- Reología y viscosidad: De acuerdo con Dinger y Funk, 1994, las propiedades reológicas de una suspensión con alto contenido de sólidos dependen en gran medida de la distribución de tamaño de partículas. Los autores establecen que a un determinado contenido de sólidos, la DTP que proporcione la mayor eficiencia de empaquetamiento, debe también proporcionar la menor viscosidad [18]. De lo anterior, puede afirmarse entonces que la pasta sin molienda presenta un mejor empaquetamiento ya que ésta pasta arrojó los menores resultados de viscosidad, esfuerzo de corte ( $T_y$ ) y viscosidad plástica ( $n$ ), de acuerdo a lo observado en la tabla 1.

Para las medidas reológicas se probaron los modelos de Binham, Powerlay, IPCPaste, Herschel- Bulkley y Casson; encontrado que el modelo que arroja la mejor correlación (99.4) es este último

- %Residuo sobre malla 325 y 200: Este porcentaje de partículas retenidas sobre los tamices es un indicador de la granulometría de las pastas. Los resultados obtenidos muestran una diferencia importante entre la pasta sin molienda y las molidas. Sin embargo, como puede verse en la tabla 1, la diferencia entre las pastas de 5 y 10 horas de molienda no es significativa.

- DTP: un punto de comparación es el d50, parámetro que indica el diámetro por debajo del cual se encuentran el 50% de las partículas de la suspensión. En la tabla 1 se puede ver que el valor del d50 para la pasta sin molienda es aproximadamente una unidad mayor que el de la pasta de 5 y 10 horas y los valores de estas dos últimas son muy cercanos, lo que puede indicar que el efecto de la molienda es importante entre 0 y 5 horas, pero no es significativo después de 5 horas.

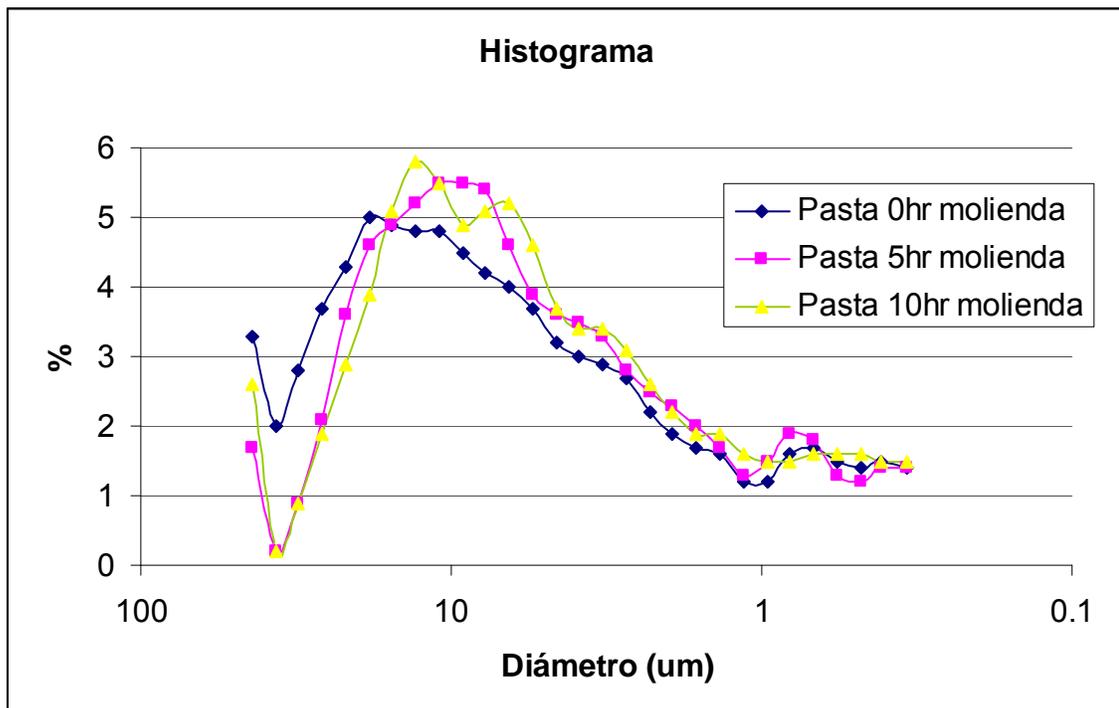
A continuación se muestra la distribución completa de los tamaños de partículas para cada una de las suspensiones.



Gráfica 2. Distribución porcentual acumulada del tamaño de partículas.

De la grafica 2 se puede ver que después de cinco horas de molienda el efecto de esta operación no es significativo, ya que la distribución de tamaño de partícula de las pastas de cinco y diez horas de molienda son muy similares.

Del mismo modo se puede apreciar que el efecto de las primeras horas de molienda es muy importante, ya que la curva de DTP para la pasta de 5 horas de molienda está por encima de la curva para la pasta sin molienda, lo que quiere decir que existe un mayor porcentaje de partículas finas para la de 5 horas. Las curvas presentan una diferencia de más de  $0.91 \mu\text{m}$  en el  $d_{50}$ , lo que indica que el diámetro por debajo del cual se encuentran el 50% de las partículas disminuyó en casi  $1 \mu\text{m}$  gracias al proceso de molienda.

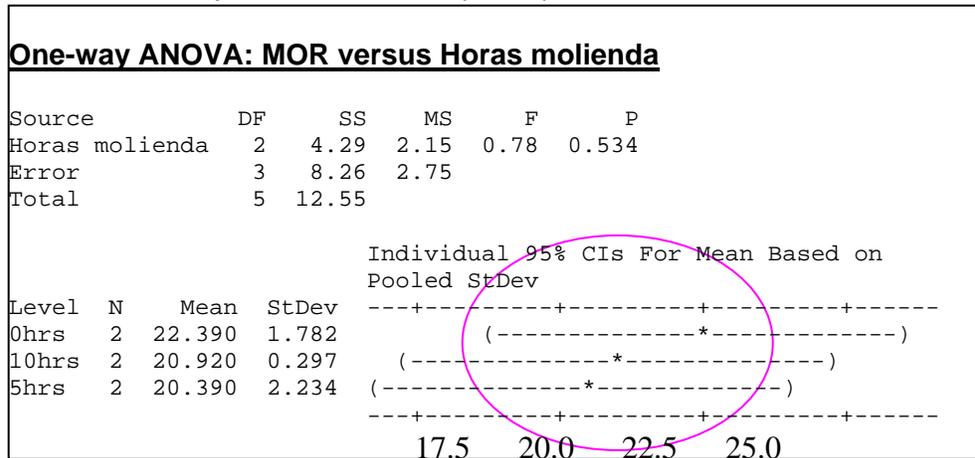


Gráfica 3. Histograma de la distribución de tamaño de partícula por intervalos

Además de confirmar lo anteriormente mencionado, la gráfica 3 muestra en forma clara el efecto de la molienda en el pico de  $10 \mu\text{m}$ , característico de las materias primas colombianas [12]. Las pastas con cinco y diez horas de molienda muestran

un porcentaje menor de partículas gruesas alrededor de 60  $\mu\text{m}$ , mientras que la pasta sin molienda, muestra el mayor porcentaje de partículas en este diámetro, con respecto a las otras pastas.

- Módulo de ruptura a la flexión (MOR) en crudo:



Gráfica 4. Resistencia mecánica en crudo.

Con el fin de establecer si las variaciones en esta variable respuesta son significativas se realizó una prueba ANOVA planteando las hipótesis de la siguiente forma:

$H_0$ : Mor para 0hrs = Mor para 5 hrs = Mor para 10 hrs

$H_a$ : Mor para 0hrs  $\neq$  Mor para 5 hrs  $\neq$  Mor para 10 hrs

Dado que el P value es mayor a 0.05, se rechaza la hipótesis alterna, y puede decirse que no existe una diferencia estadísticamente significativa para esta variable respuesta con las tres pastas evaluadas. La misma prueba arroja intervalos de confianza, los cuales, como se muestra en la gráfica 4, se

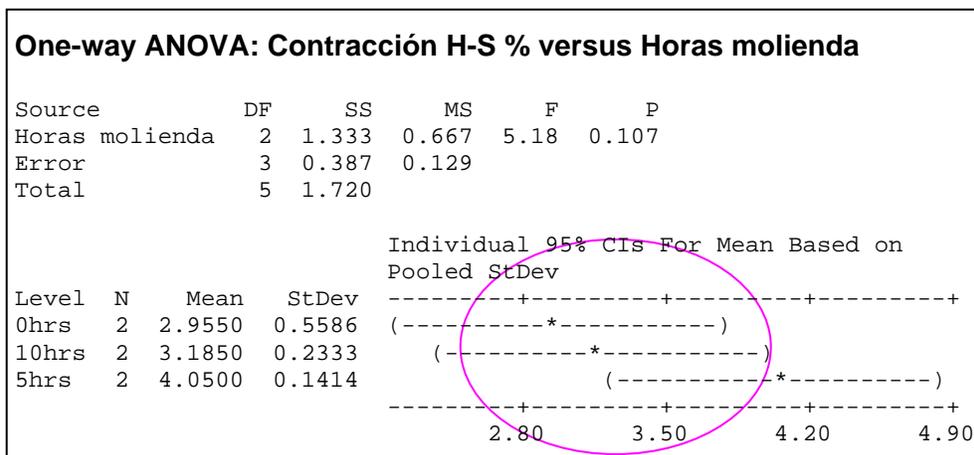
interceptan, es decir, la respuesta para estas tres pastas es que son estadísticamente iguales

Por otro lado, la similitud en los resultados obtenidos para los tres tiempos de molienda, muestra que la granulometría de la pasta no tiene gran influencia en la variable de desempeño MOR en crudo.

- Contracción húmedo-seco:

Ho: Hipótesis nula: Contr H-S % para 0hrs = Contr H-S % para 5 hrs = Contr H-S % para 10 hrs

Ha: Hipótesis alterna: Contr H-S % para 0hrs  $\neq$  Contr H-S % para 5 hrs  $\neq$  Contr H-S % para 10 hrs



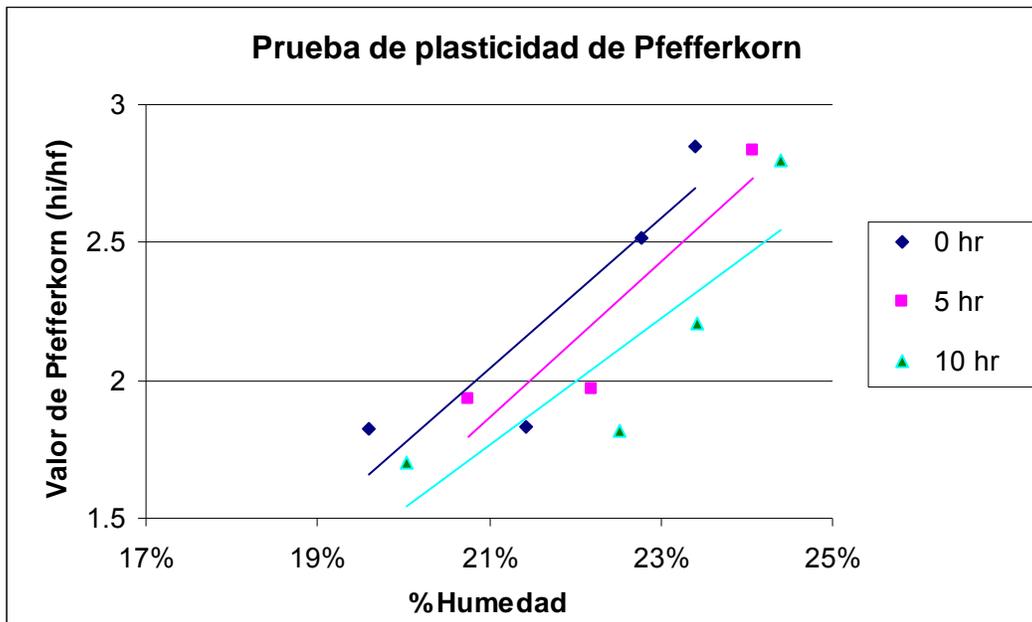
Gráfica 5. Contracción Húmedo-Seco.

En la gráfica 5 se observa que el valor P es mayor a 0.05, por lo que se concluye que las respuestas son estadísticamente iguales. Esto se muestra también en la intercepción de los intervalos de confianza.

Los datos obtenidos en esta prueba no representan un resultado confiable, ya que la contracción húmedo-seco depende directamente de la humedad inicial de cada una de las piezas formadas para hacer las mediciones. Si las piezas formadas a partir de cada una de las pastas no tienen la misma humedad inicial (ver tabla 1), entonces la variación que se da en las contracciones no representará un valor comparable. Por esta razón el hecho de que la pasta de cinco horas de molienda tenga un valor superior, no significa que contraiga más, ya que su humedad inicial era mayor. Como puede verse en la gráfica 5, contrario a esto las pastas de cero y 10 horas de molienda tienen un porcentaje de humedad inicial más cercano, por lo tanto son comparables y muestran, como era de esperarse según ODA, 1988, una menor contracción húmedo-seco para la pasta de cero horas de molienda. Sin embargo, la diferencia no es estadísticamente significativa lo cual se debe, probablemente, a la diferencia en los contenidos iniciales de agua.

- Plasticidad:

Teniendo en cuenta que existen diversas definiciones sobre lo que la plasticidad representa, y así mismo diferentes métodos para medirla, en este trabajo se empleó el modelo de Pfefferkorn, obteniendo las curvas presentadas en la Gráfica 5. En esta gráfica se puede observar la diferencia de plasticidad entre las tres pastas, siendo la más plástica la pasta de 10 horas de molienda según la interpretación de Pfefferkorn.



Grafica 6. Prueba de plasticidad de Pfefferkorn

De acuerdo con el método de Pfefferkorn, el valor de plasticidad es el porcentaje de agua para el cual la probeta experimenta un  $hi/hf$  de 2.5. Es decir, para las pastas de 0, 5 y 10 horas de molienda los valores de plasticidad aquí obtenidos son 22.73, 23.35 y 23.55% respectivamente. Según lo reportado por Beck, et al (1998) sobre la interpretación de éste método, las pastas con alto valor de plasticidad son las más adecuadas para formación en húmedo, por lo tanto, la pasta de 10 horas de molienda es más plástica. Esto es porque dichas pastas pueden fijar mas cantidad de agua, que las pastas con menor plasticidad, conservando su estabilidad [19].

Por otro lado, según lo observado en la gráfica 5, la pendiente de la linealización de la curva de 10 horas es menor, lo que significa que el contenido de humedad

tiene una menor influencia en la “deformabilidad” de la pasta, es decir, para esta pasta el rango de humedades adecuadas para su trabajo es más amplio que para la pasta sin molienda, por lo que puede decirse que una pasta más fina es más plástica.

Al mismo tiempo, la pasta de cinco horas de molienda presenta un comportamiento plástico inferior al de la pasta de diez horas de molienda, a pesar de no mostrar diferencias en la distribución de tamaño de partícula.

### **3.2 EVALUACIÓN DESPUÉS DE COCCIÓN**

El empleo de conos pirométricos como medida del grado de cocción alcanzado es bastante confiable ya que las reacciones involucradas en procesos cerámicos avanzan de la misma forma que los cambios observados en los conos. Empleando estos dispositivos se puede prever el progreso del proceso de quema pues los conos se ubican al lado de las piezas durante la cocción, por lo que pueden reportar el calor real que recibe la porcelana, y no la temperatura del ambiente como lo harían las termocuplas [20].

Las curvas empleadas en este trabajo fueron definidas en 1210, 1230 y 1250°C, lo que dio como valores en los conos pirométricos de 10-1, 11-1 y 12-1 (ver anexo 1). Estas medidas muestran que las diferencias en las curvas empleadas son suficientemente importantes como para provocar cambios en la porcelana.

Tabla 2. Diseño de experimentos 2<sup>2</sup> con puntos centro.

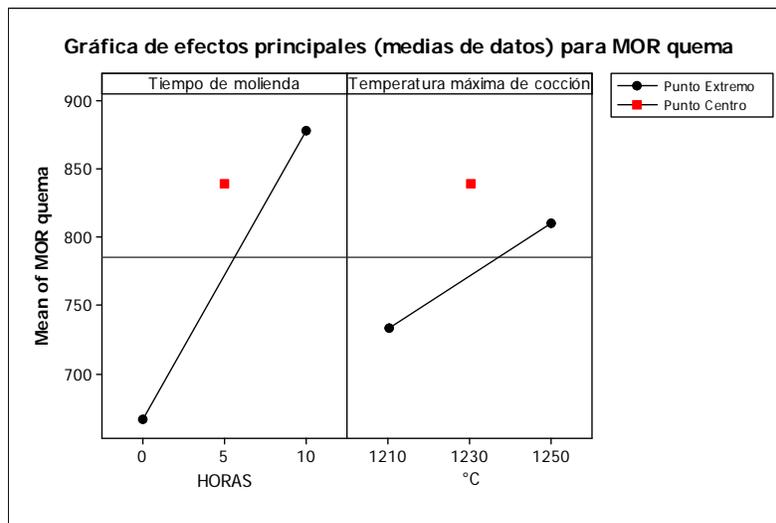
Corrida	Tiempo de molienda	Temp. máx (°C)	MOR Quema (Kg/cm2)	Deformación (°inclinación)	Contracción Total (%)	Contracción S-Q (%)	Densidad aparente	Porosidad
1	0	1210	563,19	25	10,94	8,98	2,3	Si
2	10	1210	872,49	29,67	11,34	9,39	2,34	No
3	0	1250	766,34	30,167	11,54	8,85	2,36	No
4	10	1250	861,76	31,25	12,54	9,13	2,37	No
5	0	1210	576,71	22,25	10,34	7,8	2,28	Si
6	10	1210	920,03	27,5	11,74	8,68	2,345	No
7	0	1250	757,23	27	11,74	8,3	2,36	No
8	10	1250	855,31	32,25	11,94	9,07	2,38	No
9	5	1230	869,4	32,167	12,94	9,17	2,35	No
10	5	1230	808,83	28,25	13,14	9,56	2,35	No

De acuerdo al diseño de experimentos planteado, se tabularon todos los datos obtenidos, Tabla 2, y se verificó la distribución normal para cada grupo de resultados, usando para esto la opción análisis de diseño factorial en el software MINITAB versión 14 (anexo 2). Al estudiar los efectos de los dos factores analizados en cada una de las variables respuesta, se obtuvo lo siguiente:

- Módulo de ruptura a la flexión (MOR) en quema:

La evaluación del efecto que tienen los factores sobre cada variable respuesta puede graficarse también como diagramas de Pareto (Anexo3). En la gráfica 7 puede verse el mayor impacto que tiene sobre la resistencia mecánica en quema el tiempo de molienda. Si bien ambos factores presentan una influencia en la

respuesta, la pendiente de la curva para el tiempo de molienda es mucho mayor, lo que indica un mayor efecto. Esto quiere decir que la pasta con 10 horas de molienda tiene una resistencia a la ruptura mayor que la que tiene la de cinco y cero horas, y que este factor es de gran influencia para dicha variable respuesta.



Gráfica 7. Efecto de los factores en el MOR quema

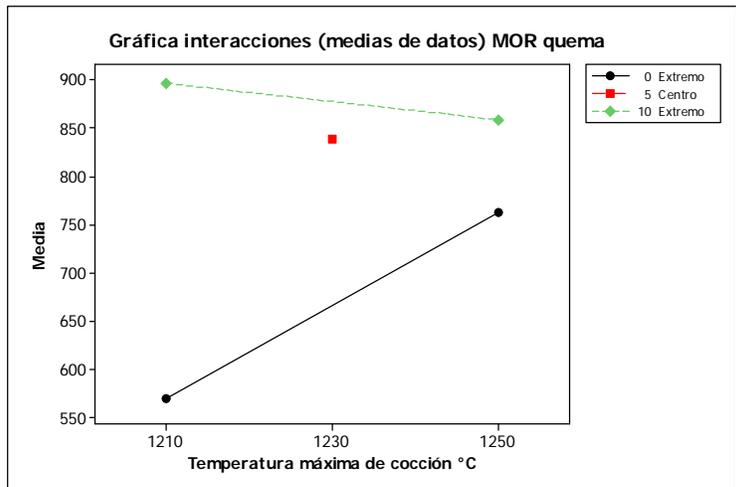
Estudios previos realizados en la Organización CORONA, han demostrado que una pasta cerámica con un tamaño de partículas mas pequeño, es decir, una pasta más fina, presenta una mayor resistencia a la ruptura. Esto se debe a una microestructura más homogénea, confirmando lo planteado por ODA, 1988 [5, 12].

La temperatura máxima de cocción también presenta un efecto sobre la resistencia mecánica, lo que se explica por la mayor y mejor vitrificación obtenida durante la cocción.

Según Ghorra, 1993, la velocidad de sinterización de la fase vítrea se ve fuertemente afectada por la temperatura. Para la mayoría de las formulaciones, un pequeño incremento en la temperatura resulta en un importante incremento en la fase vítrea presente. En algunos casos esto puede ser beneficioso para incrementar la densidad aparente, pero luego de alcanzar su máximo, esto puede ser perjudicial puesto que causa un excesivo crecimiento de grano (reduciendo la resistencia), produciendo una deformación en la pieza [21].

La vitrificación ocurre cuando la porosidad se hace cero. Si se prosigue con el calentamiento se incrementa la vitrificación, llegando a un punto máximo donde se genera un hinchamiento que produce porosidad nuevamente. Ese punto máximo es dañino para la porcelana, pero en este trabajo no se llegó a ese extremo, sino que se trabajó siempre en un rango adecuado para la formulación trabajada [22].

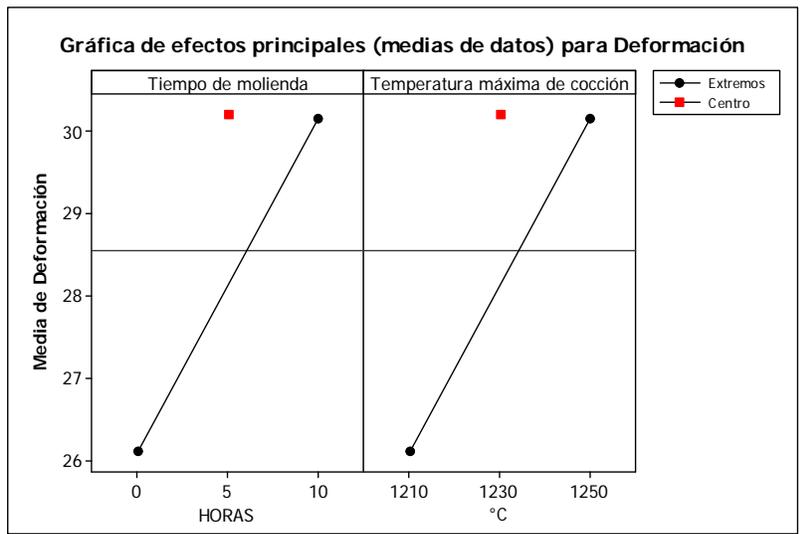
En la gráfica 8 nuevamente se aprecia la mayor influencia del tiempo de molienda y se puede encontrar además un punto óptimo para esta respuesta. Generalmente se busca una porcelana más resistente, es decir, el punto de 10 horas de molienda con temperatura máxima de cocción en 1210°C sería el punto óptimo, ya que este punto proporciona la mayor resistencia mecánica en quema. De los resultados se puede concluir que una pasta más fina al tener una microestructura más homogénea y un mejor acomodamiento de las partículas, desarrolla una mayor resistencia mecánica.



Gráfica 8. Gráfica de interacción de los factores para el MOR quema

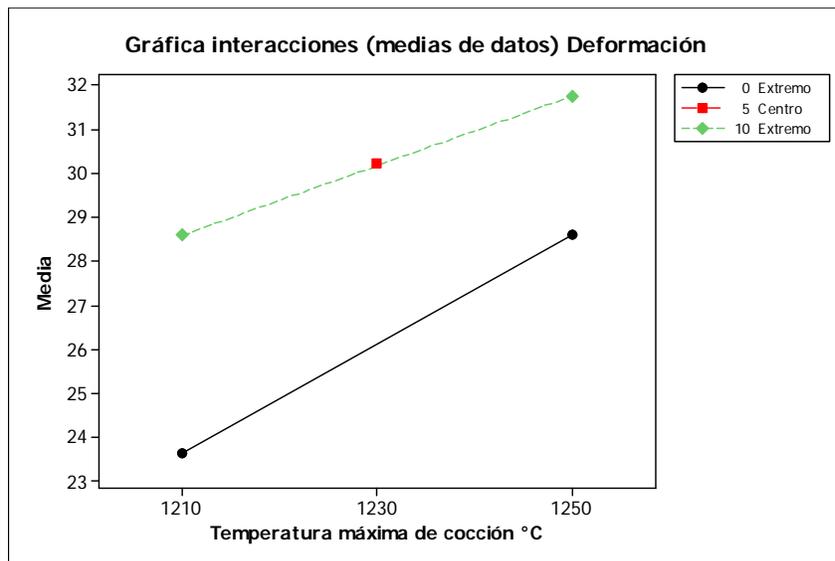
Esto confirma lo reportado por Oda en 1998, donde se afirma que cuando el tamaño de partícula es muy fino, se incrementa la resistencia electromecánica [5].

- Deformación pirolástica:



Gráfica 9. Efecto de los factores en la deformación pirolástica

Ambos factores son de gran influencia para esta variable respuesta, debido a que las graficas presentan la misma pendiente, como se observa en la gráfica 9. Esto ratifica lo reportado por Restrepo, 1992, donde se afirma que una distribución de tamaño de partícula más fina en un cuerpo cerámico genera una mayor deformación piropiástica, debido a que una pasta más fina supera más fácilmente las barreras termodinámicas permaneciendo más tiempo en fase líquida que una pasta más gruesa, por lo que presentará mayor deformación piropiástica. Por otro lado, la influencia de la temperatura de cocción complementa lo reportado por el mismo autor, el cual establece que a mayor cantidad de fase líquida durante la cocción, mayor es la deformación piropiástica [23].



Gráfica 10. Gráfica de interacción de los factores para la deformación piropiástica

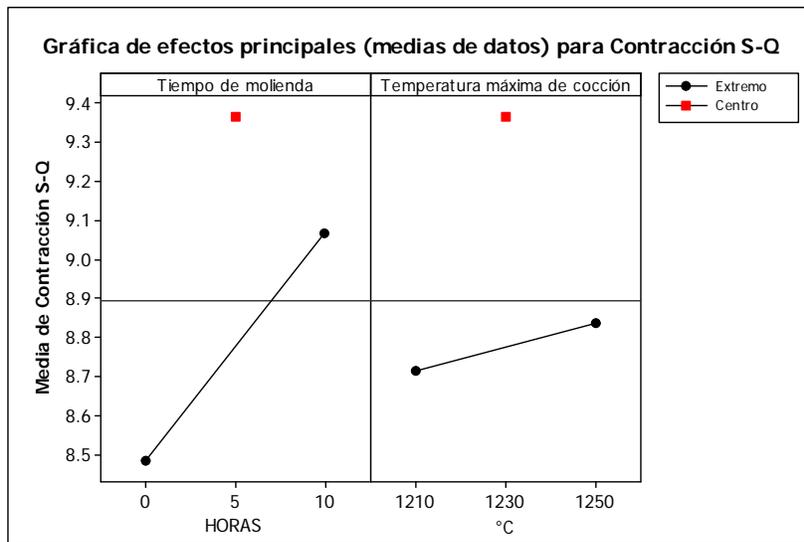
La deformación dio resultados un poco diferentes en los duplicados y pudo presentar diferencias para una misma pasta entre curva y curva, sin ser necesariamente por la temperatura máxima de cocción. Esto se debe, en gran

medida, a la posición que tengan las barras en el montaje (Ver Anexo 4), para cada curva se cuadran para que queden iguales, pero entre montaje y montaje hay diferencias de milímetros en la separación entre las barras y el soporte, lo que puede llevar a deformaciones muy diferentes. Sin embargo, los montajes se hicieron cuidando que no fueran muy diferentes y efectivamente, los resultados son bastante coherentes y la distribución normal de los datos no muestra desviaciones muy grandes.

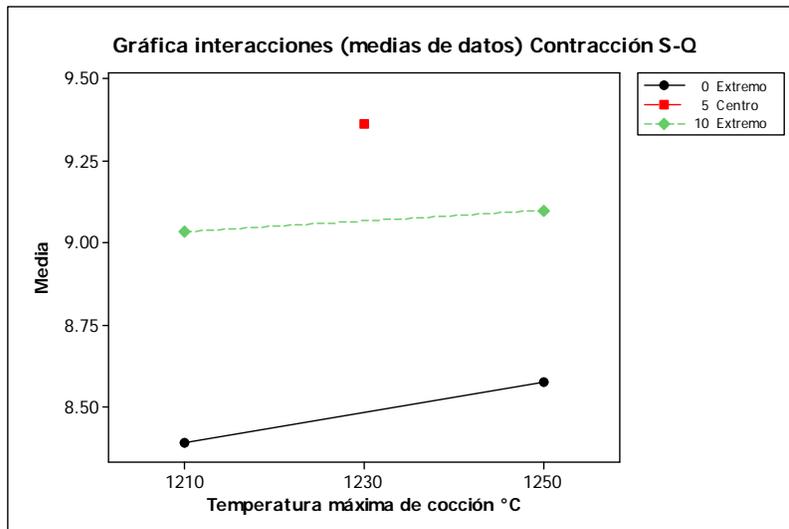
En la gráfica 10 se puede apreciar que existe una gran interacción de los factores evaluados con la variable respuesta. Es importante anotar que el punto centro se encuentra sobre la línea de 10 horas de molienda. Esto puede ser debido en parte a los errores cometidos en el montaje, sin embargo, anteriormente se mencionó, la granulometría de la pasta de 5 y 10 horas de molienda no presenta diferencias importantes, por lo que es racional que este punto esté sobre la línea punteada.

- Contracción en seco-quema:

La gráfica 11 muestra una mayor influencia del tiempo de molienda sobre esta variable respuesta. Esto se puede explicar dada la importancia de la granulometría de la pasta en el momento de llenar espacios vacíos y contraer [10]. Además, la temperatura máxima de cocción no influye de manera importante, puesto que una vez formadas las fases vítreas la pasta no continuará contrayendo, sin importar que la temperatura continúe subiendo. Esto confirma lo encontrado por Jones y Carty [7, 8].



Gráfica 11. Efecto de los factores en la contracción seco-quema



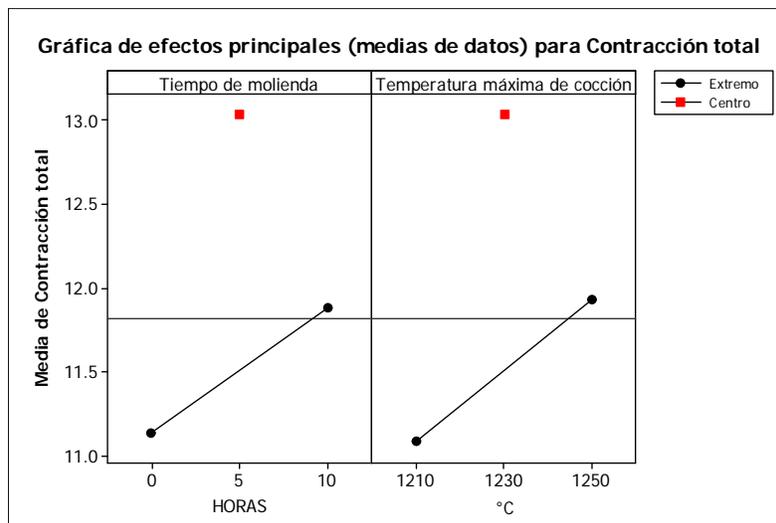
Gráfica 12. Gráfica de interacción de los factores para la contracción seco-quema

Los resultados obtenidos para esta variable son de gran importancia, y como ya se mencionó anteriormente, son mucho más confiables que la contracción húmedo-quema. El punto de menor contracción seco-quema se encontró para la pasta de 0

horas de molienda con temperatura máxima de cocción a 1210°C, como se observa en la gráfica 12.

Reed en 1995 [24], reportó en su libro que las contracciones ocurren en mayor proporción en materiales que contienen regiones con partículas más finas, las cuales son separadas por regiones porosas. Como se mencionó anteriormente, dichas regiones porosas o espacios vacíos, serán eliminados durante la sinterización por acercamiento de las partículas, lo que provoca la contracción [24].

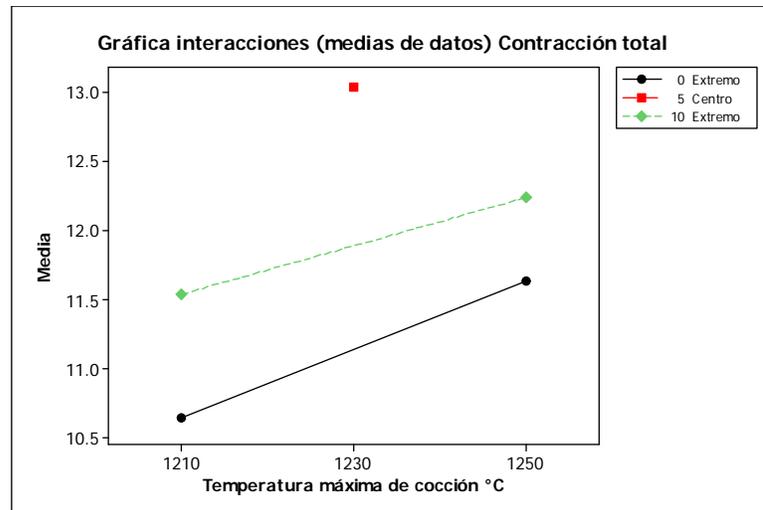
- Contracción total (húmedo-quema):



Gráfica 13. Efecto de los factores en la contracción total

Para esta variable respuesta, ambos factores presentan la misma influencia, siendo ésta muy baja. Por otra parte, el punto centro está muy desfasado. Esto se

debe al porcentaje de humedad inicial de las piezas, el cual, como se dijo anteriormente, debe ser muy similar para poder comparar los datos, y para este caso, no lo fue.



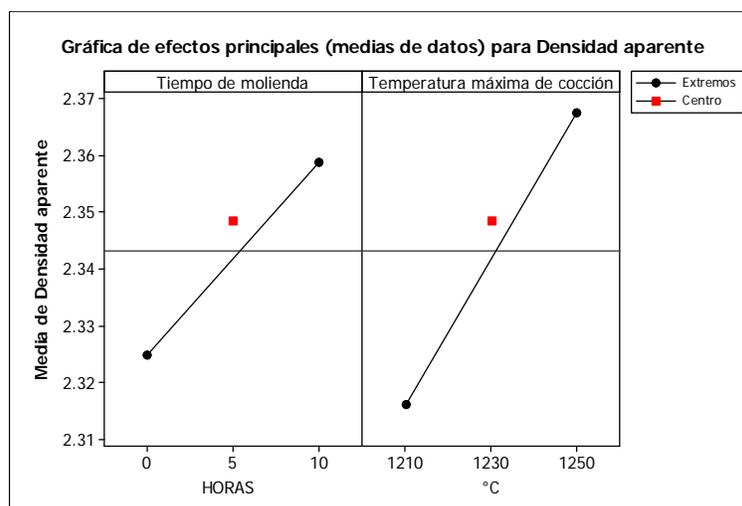
Gráfica 14. Gráfica de interacción de los factores para la contracción total

Nuevamente, si se busca menor contracción se plantea como el mejor resultado el de cero horas de molienda con 1210°, de acuerdo a los factores y niveles definidos en el diseño de experimentos. Sin embargo, se deben evaluar las demás variables en conjunto antes de determinar un óptimo, lo cual se evaluará mas adelante

- Densidad aparente:

En la gráfica 15, se observa que los dos factores tienen gran influencia en la variable respuesta, siendo más importante el efecto de la temperatura de cocción. Esto corresponde con lo reportado por Norris, et al, 1980 [22], que afirma que al someter la cerámica al proceso de cocción su porosidad disminuye al tiempo que

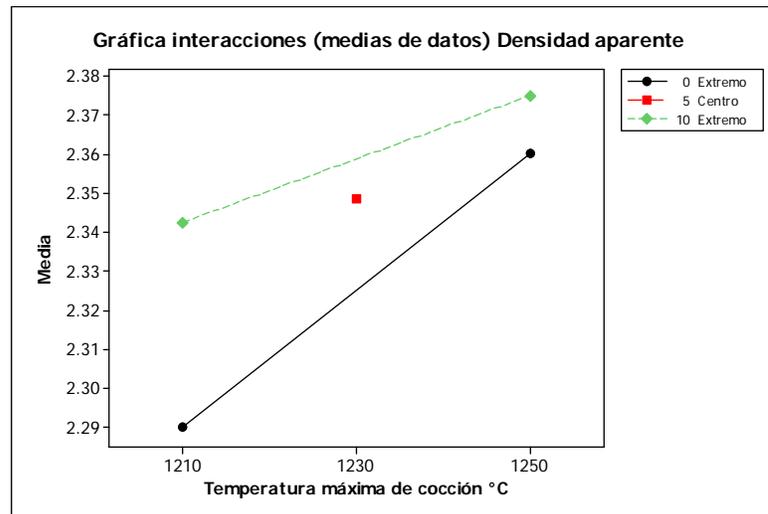
aumentan su densidad aparente y su contracción. La vitrificación ocurre cuando la porosidad se hace cero, en este punto se alcanza el valor mínimo, y al mismo tiempo, óptimo de densidad aparente. Si se prosigue con el calentamiento, la densidad aparente sigue aumentando, llega a un máximo y luego disminuye al aumentar la porosidad por causa del hinchamiento [22].



Gráfica 15. Efecto de los factores en la densidad aparente

La optimización de esta respuesta no busca necesariamente la mayor o la menor densidad aparente. Para la formulación empleada en este trabajo, la densidad aparente debe ser mayor o igual a 2.34 [12]. Si el valor de esta variable es mayor, se garantiza que la pieza no presentará porosidad, sin embargo, si este valor es mucho mayor que 2.34, quiere decir que la curva de cocción está “sobrestimada”, es decir en el proceso se está invirtiendo más energía de la necesaria, ya que en la temperatura a la cual el valor de densidad aparente es igual a 2,34, la porosidad se hace cero, siendo este el punto óptimo de trabajo para esta variable, ya que

incrementar la temperatura para alcanzar densidades por encima de este punto sería un desperdicio de energía y dinero.



Gráfica 16. Gráfica de interacción de los factores para la densidad aparente

El hecho de que en casi todas las variables analizadas se observe gran influencia de los factores analizados (Main effects plots) es una muestra de que los factores y niveles estipulados son bastante adecuados para la evaluación realizada. En caso de haber obtenido resultados contrarios en estas gráficas, sería necesario redefinir los factores y niveles.

- Porosidad abierta:

Dado que esta variable no es numérica, no fue posible analizarla en MINITAB. Sin embargo, la porosidad abierta tiene una estrecha relación con la densidad aparente, la cual ya fue analizada en detalle.

Estudiando los resultados obtenidos de porosidad abierta en la Tabla 3, se observa que para una densidad aparente menor o igual a 2.33, la porosidad es positiva; y si la densidad aparente presenta valores mayores o iguales a 2.34, la porosidad abierta es negativa.

Tabla 3. Resultados de la prueba de porosidad abierta

Tiempo de molienda	Temperatura máx. de cocción	Densidad aparente	Porosidad
<b>0</b>	<b>1210</b>	<b>2,3</b>	<b>Si</b>
10	1210	2,34	No
0	1250	2,36	No
10	1250	2,37	No
<b>0</b>	<b>1210</b>	<b>2,28</b>	<b>Si</b>
10	1210	2,345	No
0	1250	2,36	No
10	1250	2,38	No
5	1230	2,35	No
5	1230	2,35	No

La porosidad es un factor muy importante en la porcelana eléctrica, debido a que para mantener el aislamiento se debe garantizar cero absorción de agua, lo que se alcanza mediante la impermeabilidad del esmalte y la cero porosidad de la porcelana como tal [3]. Existe porosidad abierta y porosidad cerrada. La cerrada, la cual proviene de los poros intergranulares, es la responsable de las propiedades del comportamiento térmico [1]. La abierta que se compone de poros

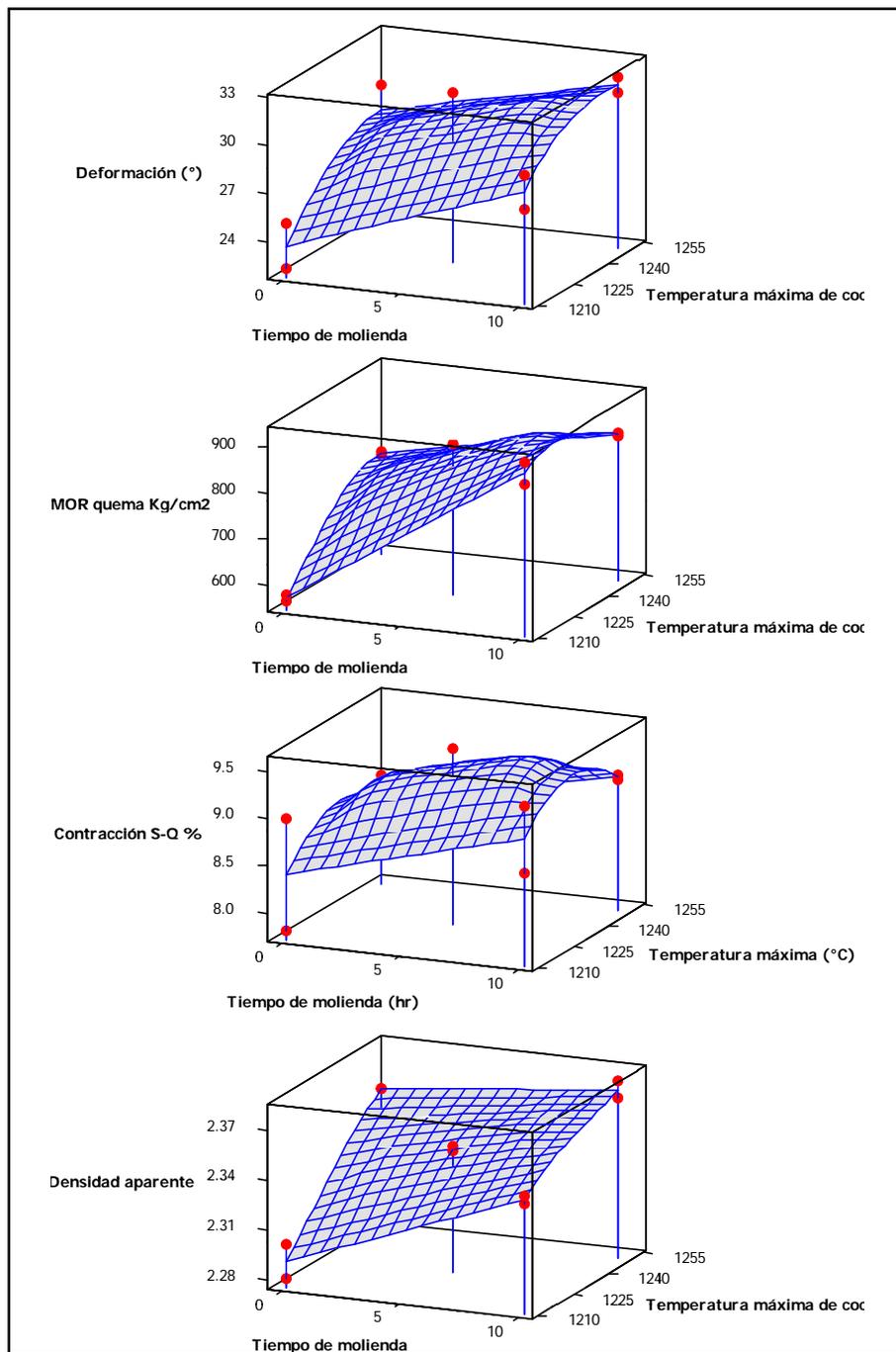
intercomunicados entre ellos y con el exterior [25], es la más crítica en los aisladores, puesto que la corriente eléctrica encuentra en el aire un medio conductor por el cual propagarse, generando grietas y finalmente una falla irreparable en la pieza.

Si una pieza es porosa, quiere decir que no desarrolló adecuadamente las fases vítreas, es decir, la temperatura de cocción no fue suficiente para la completa sinterización de las materias primas.

La fucsina es una tinta orgánica de naturaleza lipídica, que se emplea para verificar la porosidad de la porcelana debido a su alta penetrabilidad. Este colorante tiene la capacidad de pasar a través de cualquier conexión de poros existente, por lo que al sumergir fragmentos de porcelana y someterlos a una determinada presión, puede determinarse si existe o no porosidad abierta. De este modo, al partir las piezas sometidas al tratamiento, no debe haber presencia del colorante en el interior.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el trabajo realizado, una pasta más gruesa requiere más temperatura de cocción. Esto se debe a que a mayor área superficial específica, el material en quema supera más fácil las barreras termodinámicas para generar fases vítreas. Cuando el material es más grueso, este no alcanza a formar las fases por no poder superar la barrera termodinámica [26].

### 3.3 EVALUACIÓN DE INTERACCIONES (Gráficas de superficies)



Gráfica 17. Interacción de los factores y las diferentes variables de respuesta

Dadas las especificaciones del producto final, se podría entonces analizar qué punto ofrece las mejores condiciones, teniendo en cuenta todas las variables respuesta.

Por ejemplo, si se requiere una pasta de bajas contracciones, puede pensarse en una pasta gruesa como es la de 0 horas de molienda. Al analizar esta pasta en la gráfica 17, puede verse que además tiene baja deformación pirolástica pero presentará una resistencia mecánica baja y si se somete a un ciclo de cocción muy bajo va a mostrar porosidad (según el valor de densidad aparente). Así entonces pueden evaluarse distintas alternativas con estos modelos, sin necesidad de probarlos físicamente y así desperdiciar material, tiempo y dinero en ensayos.

Se utilizó el simulador ofrecido por el software MINITAB, en el que puede obtenerse un valor exacto para cada variable moviendo aleatoriamente los datos de entrada de los factores en cualquier valor entre los niveles evaluados.

Los resultados mostrados en la gráfica 17, fueron definidos como funciones  $y=f(x)$ , para así simular diferentes escenarios en los que se varían los dos factores aquí estudiados con sus diferentes niveles, buscando alcanzar valores óptimos de algunas variables según lo que se desee, y logrando prever el comportamiento de

las demás variables al tener en cuenta las relaciones combinadas que existen entre ellas.

Los valores óptimos dependerán de las características del procesamiento de la pasta cerámica o bien del producto final. Es decir, para un tipo de aislador podría ser fundamental tener alta resistencia mecánica mientras que para otros no, dependiendo principalmente del tipo de geometría, del lugar donde se vaya a utilizar y del uso que se le vaya a dar.

### **3.4 ANÁLISIS ECONÓMICO**

El proyecto aquí presentado tiene un alto contenido técnico. Sin embargo, el fin último de esta investigación debe representar beneficios económicos para la empresa.

Con los resultados aquí obtenidos podrían desarrollarse diferentes proyectos para la apertura de diversos mercados. A continuación se presenta un análisis económico de uno de los mercados más representativos en el campo de la porcelana eléctrica, el cual abarca aisladores desde 70 hasta 170 centímetros de alto. Actualmente este mercado tiene ventas mundiales alrededor de US \$200 millones al año [27]

El estado de pérdidas y ganancias busca determinar la utilidad que produce una empresa o un proyecto en particular [18]. Teniendo en cuenta que el estado de pérdidas y ganancias se realiza a partir del tercer trimestre del año 2009, en la tabla 4 se puede apreciar la utilidad que genera el proyecto en un periodo de tres años consecutivos, realizando ventas por COP (pesos Colombianos) \$ 450'000.000 aproximadamente, es decir el 1% del mercado mundial, generando una utilidad neta de COP \$ 85'000.000 para el año 2011.

Tabla 4. Balance de pérdidas y ganancias.

<i>Pasta para Bujes Grandes</i>			
			0
<b>Ganancias &amp; Pérdidas</b>	<b>Año 2009</b>	<b>Año 2010</b>	<b>Año 2011</b>
<b>Total Ingresos</b>	<b>168,000,000</b>	<b>388,080,000</b>	<b>448,232,400</b>
Costo de Ventas	108,000,000	249,480,000	288,149,400
<b>Margen Bruto</b>	<b>60,000,000</b>	<b>138,600,000</b>	<b>160,083,000</b>
Gastos Fijos	3,360,000	7,761,600	8,964,648
Gastos Variables	5,040,000	11,642,400	13,446,972
Gastos Operacionales	8,400,000	19,404,000	22,411,620
<b>EBITDA</b>	<b>51,600,000</b>	<b>119,196,000</b>	<b>137,671,380</b>
Depreciación	6,000,000	12,000,000	12,000,000
<b>EBIT</b>	<b>45,600,000</b>	<b>107,196,000</b>	<b>125,671,380</b>
Impuestos	15,048,000	35,374,680	41,471,555
<b>Utilidad Neta</b>	<b>30,552,000</b>	<b>71,821,320</b>	<b>84,199,825</b>
<b>Indices</b>	<b>Año 2009</b>	<b>Año 2010</b>	<b>Año 2011</b>
Margen Bruto	36%	36%	36%
Margen EBITDA	31%	31%	31%
Margen Neto	18%	19%	19%
SG&A / Ventas	5%	5%	5%

En términos rentables y bajo el supuesto de que sólo es necesario invertir COP \$120'000.000 (100 en maquinaria para ensamble y 20 en soportes para transporte), ya que la empresa posee las instalaciones, el conocimiento técnico, el personal y la maquinaria necesaria para la fabricación y comercialización de aisladores eléctricos, y bajo el supuesto que la empresa produzca 250 piezas trimestralmente para este mercado, con un incremento del 10% anual; para el año 2011 se obtendría una utilidad neta de COP \$85'000.000 con un margen bruto del

36% y un EBITDA (earnings before interest taxes, depreciation and amortization), por sus siglas en inglés, del 31% como puede verse en la tabla 4, lo que indica que este proyecto traerá beneficios económicos para la empresa, ya que un negocio que tenga un margen bruto mayor al 25% se considera económicamente viable. Así mismo, un proyecto que genere un EBITDA mayor del 20% garantiza la liquidez suficiente para cumplir con las obligaciones del negocio [28].

Tabla 5. Flujo de caja libre (FCF)

<i>Pasta para Bujes Grandes</i>			0.0%		
Flujo de Caja		Año 2009	Año 2010	Año 2011	Año 0
<b>NOPAT</b>		<b>30,552,000</b>	<b>71,821,320</b>	<b>84,199,825</b>	<b>(12,000,000)</b>
(+) Depreciación		6,000,000	12,000,000	12,000,000	12,000,000
(-) Cambios en Capital de Trabajo		35,907,945	47,039,408	12,856,840	-95,804,193
Caja operacional		3,360,000	4,401,600	1,203,048	-8,964,648
Cuentas por Cobrar		41,424,658	54,266,301	14,832,099	-110,523,058
Inventarios		8,876,712	11,628,493	3,178,307	-23,683,512
Cuentas por Pagar		-17,753,425	-23,256,986	-6,356,614	47,367,025
<b>Flujo de Caja Libre antes de CAPEX</b>		<b>644,055</b>	<b>36,781,912</b>	<b>83,342,985</b>	<b>95,804,193</b>
(-) CAPEX (al inicio del período)		120,000,000	-	-	-
<b>Flujo de Caja Libre</b>		<b>-119,355,945</b>	<b>36,781,912</b>	<b>83,342,985</b>	<b>95,804,193</b>

La inversión debe ser recuperada progresivamente durante la vida del proyecto. La parte de la inversión que se recupera en un año (Depreciación más la ganancias correspondiente a ese año), constituye el flujo de efectivo que genera el proyecto hacia la empresa ese año [29].

El flujo de caja determina la capacidad de pago de la compañía para soportar o cubrir la operación, para atender la deuda y para pago de dividendos. Con el flujo

de caja libre se busca que como mínimo alcance a cubrir los gastos financieros en los que se incurrió. Según la tabla 5, este proyecto en el 2009 generaría necesidades de recursos, con un flujo de caja libre negativo, es decir no habría liquidez. En el segundo y tercer año, este proyecto generaría COP \$.36'781.912 y COP \$83'342.985, respectivamente, lo que representa liquidez suficiente para atender las necesidades mencionadas anteriormente.

Tabla 6. Valor económico agregado (VEA)

*Pasta para Bujes Grandes*

0

<b>VEA</b>	<b>Año 2009</b>	<b>Año 2010</b>	<b>Año 2011</b>
EBIT	45,600,000	107,196,000	125,671,380
Impuestos	15,048,000	35,374,680	41,471,555
<b>NOPAT</b>	<b>30,552,000</b>	<b>71,821,320</b>	<b>84,199,825</b>
Capital Invertido	120,000,000	149,907,945	184,947,353
Capital de Trabajo		35,907,945	82,947,353
Activos Fijos	120,000,000	114,000,000	102,000,000
WACC	5.2%	10.7%	10.7%
Cargo x Capital	6,256,881	16,040,150	19,789,367
<b>VEA</b>	<b>24,295,119</b>	<b>55,781,170</b>	<b>64,410,458</b>
<b>VALORACION</b>			
<b>Valor Proyecto</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>1,093,398,506</b>

El VEA representa la generación de valor del proyecto. Este proyecto representa para la empresa un mayor valor por COP \$ 24'295.119 en los dos primeros trimestres de ejecución en el año 2009 como puede observarse en la tabla 6, lo que representa la viabilidad de este proyecto para la empresa y más aun cuando se analiza los valores de los dos siguientes años los cuales tienen un aumento significativo, generando así más valor agregado a la compañía.



#### **4. CONCLUSIONES**

El diseño de experimentos de dos factores con dos niveles y punto centro, permitió entender no sólo el efecto de cada uno de los factores en las variables de desempeño cerámico, sino también las relaciones combinadas que existen entre ellas. El estudio realizado demostró entonces que tanto la distribución de tamaño de partícula como la temperatura de cocción influyen en el desempeño cerámico, siendo más importante el efecto de la primera, lo cual confirma lo reportado previamente en la literatura.

Los resultados obtenidos muestran que las cinco primeras horas de molienda tienen el efecto más importante sobre la DTP y el porcentaje de residuo de la pasta; después de cinco horas de molienda estos parámetros no muestran un cambio significativo.

El trabajo aquí presentado demostró que los cambios en la granulometría de la pasta no muestra diferencias estadísticamente significativas en la resistencia mecánica en crudo. Se encontró también que una pasta más fina, presenta mayor plasticidad, mayor viscosidad, mayor resistencia mecánica en quema y requiere menos temperatura de cocción para alcanzar cero porosidad abierta, pero esta

tiene mayor contracción y mayor deformación pirolástica. Contrario a esto, una pasta más gruesa tiene contracción y menor deformación pirolástica, pero presenta una disminución en la plasticidad, en la resistencia mecánica y requiere mayor temperatura de cocción.

Dependiendo de los requerimientos funcionales del producto final, se debe buscar un punto óptimo de trabajo de la pasta, en el cual se logre la mejor combinación entre las variables de desempeño cerámico sin incurrir en gastos innecesarios, tales como curvas de cocción sobreestimadas o tiempos de molienda inefectivos, para asegurar la idoneidad del proceso y el producto.

Este trabajo permitirá ahorros de recursos materiales y humanos en la ejecución de futuros proyectos de desarrollo de pastas cerámicas, al facilitar la búsqueda de un punto óptimo de trabajo. Estos proyectos pueden estar enfocados a la apertura de nuevos mercados, por ejemplo la fabricación de aisladores de gran tamaño, el cual luego de un análisis económico, se encontró que si representa un proyecto económicamente viable , el cual para el tercer año y con bajos volúmenes de producción, generaría utilidades netas por aproximadamente COP \$ 92'000.000

#### **4. RECOMENDACIONES**

Evaluar tiempos de molienda entre 1 y 4 horas, para determinar en mayor detalle el cambio gradual de las variables de desempeño cerámico.

Realizar nuevamente el estudio evaluando materias primas importadas para analizar el cambio en las variables de desempeño cerámico.

Para un próximo estudio deben trabajarse las probetas de contracción partiendo de porcentajes de humedad muy similares, de tal forma que sea posible comparar contracciones desde el estado plástico.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ELIAS, X. Optimización de los procesos cerámicos industriales. Primera parte. Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín, 2001. p. 5-6.
2. FUNK, JE; DINGER, DR. Predictive process control of crowded particulate suspensions. Kluwer academic publishers, USA, 1994. p. 641, 646
3. CANO, A. Porcelana eléctrica y su característica de cero porosidad. GAMMA, Boletín técnico N°2 de 2005.
4. HENKES, VE; ONODA, GY; CARTY WM. Science of whitewares. The American Ceramics Society, Ohio, 1996. p. 105
5. ODA, I. High Strength feldspathic porcelain. Patente #: 4717695. USA. 1988.
6. BUCHANAN, RC; GOODMAN, G; *et al.* Ceramic Materials for Electronics, processing, properties and applications. Marcel Dekker Inc. Segunda edición, New York, 1991, p. 1-18.
7. JONES, JT; BERARD, MF. Ceramics: Industrial Processing and Testing. Iowa State University Press, Ames, 1972, p. 14-20.
8. CARTY, WM; SENAPATI, U. Porcelain raw materials, processing, phase evolution and mechanical behaviour. *J. Am. Ceram. Soc.*, 81 [1] 3-20 (1998).
9. MUÑOZ, A. Operaciones de procesamiento cerámico. Ceramic Age magazine, Vol 78, N° 10, 1962, p. 29.

10. REED, JS. Principles of ceramics processing. John Wiley and sons, Inc. Segunda edición, New York, 1995. p. 597.
11. [en línea]. ALBALAT, J. Aplicación del flexímetro óptico para el estudio de las deformaciones de los materiales cerámicos. [www.serviquimia.org](http://www.serviquimia.org). Citado en: 21/01/2009
12. Centro de documentación de la organización corona, 20/01/2009
13. RICHERSON, DW. Modern ceramic engineering. Marcel Dekker, Inc. Segunda edición. New York, 1992. p. 519.
14. LEE, WE; RAINFORTH, WM. Ceramic microstructures. Chapman and Hall. Primera edición, Great Britain, 1994. p. 73
15. KINSMAN, K; et al. High Strength feldspathic porcelain and method therefore. Patente #: 5461015. USA. 1995
16. CADAVID, A. Manipulating plasticity through control of colloidal interactions. Tesis de maestría en ciencias en ingeniería cerámica. New York, 2004. p.1,4.
17. Richtlinien und Vorschläge zur Untersuchung tonkeramischer Rohstoffe und Massen: Wasserbindenvermögen, Plastizität. Genehmigung der Deutschen Keramischen Gesellschaft. 1981.
18. [en línea] VELEZ, I. Mas reflexiones sobre el valor económico agregado VEA: una Mirada a un análisis práctico. Universidad Javeriana. [www.javeriana.edu.co](http://www.javeriana.edu.co). Bogotá, 1998. Citado en: 25-03-09.
19. BECK, H.P. KRAUSE, W. WAGNER, H. Avoiding quality losses through the addition of Ca-Hydroxid in recycling fo ceramic bodies for skiving. Genehmigung der Deutschen Keramischen Gesellschaft, vol 75, No. 1/2. 1998.

20. FRONK, D; SCHORR, J. Use of pyrometric products in quality products to evaluate maturation temperature during firing. Ceram. Eng. Sci. Proc. Vol 14. N° 1-2. Westerville, OH. 1993. pag 224-235.
21. GHORRA, G. Theory of fast firing. Ceram. Eng. Sci. Proc. Vol 14. N° 1-2. Hazmieh, Líbano. 1993. pag 77-115.
22. NORRIS, A; TALOR, D; THORPE, I. Curvas de intervalo: un método experimental para el estudio de pastas de cerámica vitrificada. Trans. and Jour. Brit. Ceram. Soc. 1980.
23. RESTREPO, J. The development of a glass-bonded mullite phase and its effects in the pyroplastic deformation of a triaxial porcelain. Tesis de maestría en ingeniería cerámica. Clemson University. 1992.
24. REED, JS. Principles of ceramics processing. John Wiley and sons, Inc. Segunda edición, New York, 1995. p. 605.
25. ELIAS, X. Optimización de los procesos cerámicos industriales. Tercera parte. Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín, 2001. p. 48-49.
26. Entrevista con el Magister en cerámica Carlos Arismendi. Asesor técnico corporativo. Organización CORONA. 20-03-09
27. Entrevista con el Ingeniero Juan Pedro Tascón. Subgerente de mercadeo. Gamma, Aisladores CORONA. 25-03-09
28. Entrevista con Carolina Restrepo Ramírez. Planeadora financiera. Gamma, Aisladores CORONA. 30-03-09

29. [En línea] ACHONG, E. Un método para hallar la rentabilidad de proyecto no-simples de inversión. Revista Economía. N° 2. Universidad de los Andes, [www.iies.faces.ula.ve](http://www.iies.faces.ula.ve). Bogotá, 1988. p. 9-29. Citado en: 28-03-09

## ANEXO 1: Fotos conos pirométricos



Conos 10-1. Resultado Curva 1: 1210°C.

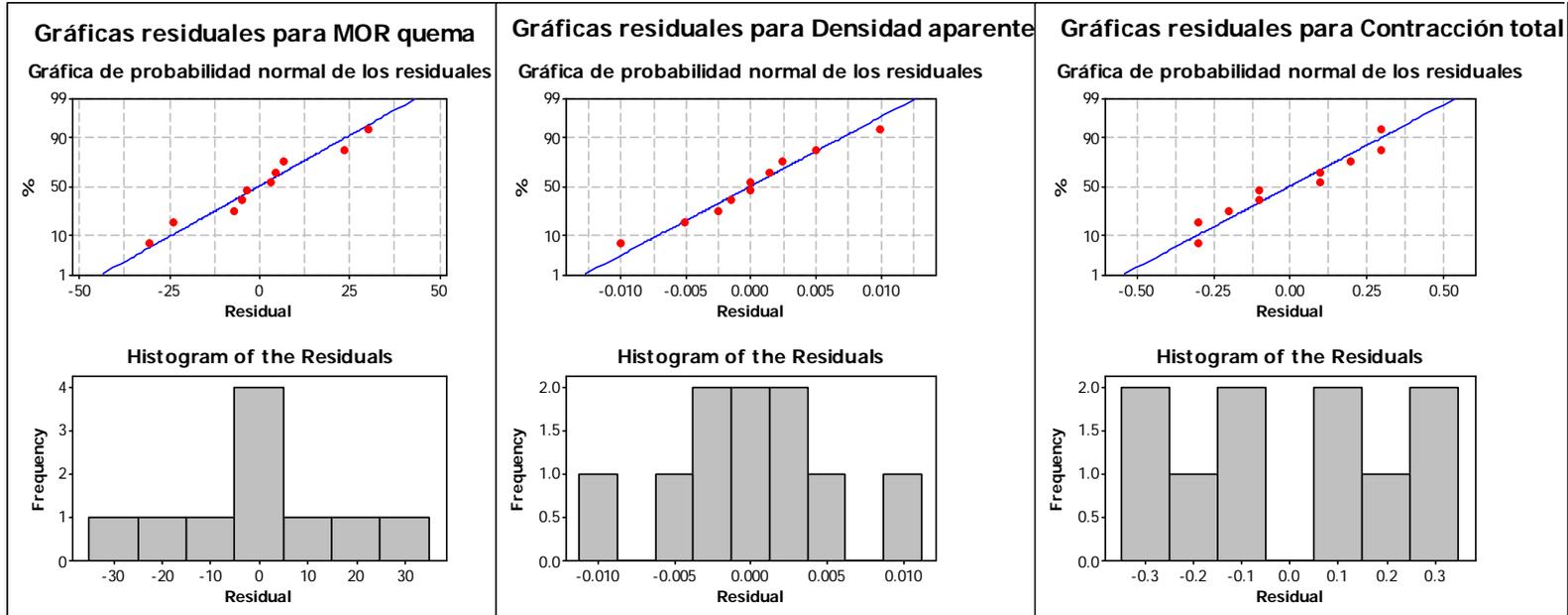


Conos 11-1. Resultado Curva 2: 1230°C.



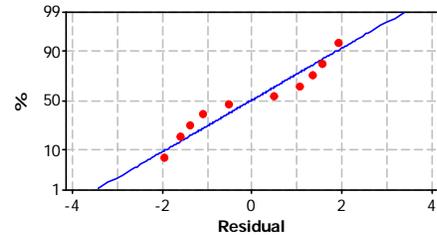
Conos 12-1. Resultado Curva 3: 1250°C.

## ANEXO 2: Análisis de distribución normal de las variables analizadas

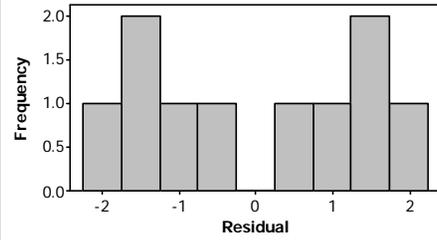


### Gráficas residuales para Deformación

Gráfica de probabilidad normal de los residuales

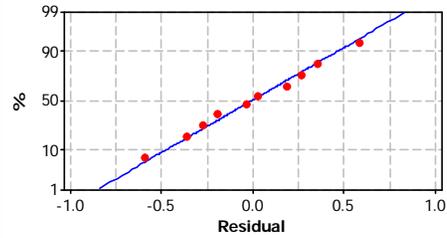


Histogram of the Residuals

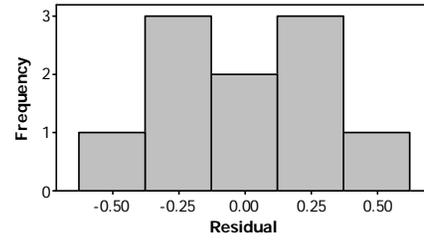


### Gráficas residuales para Contracción S-Q

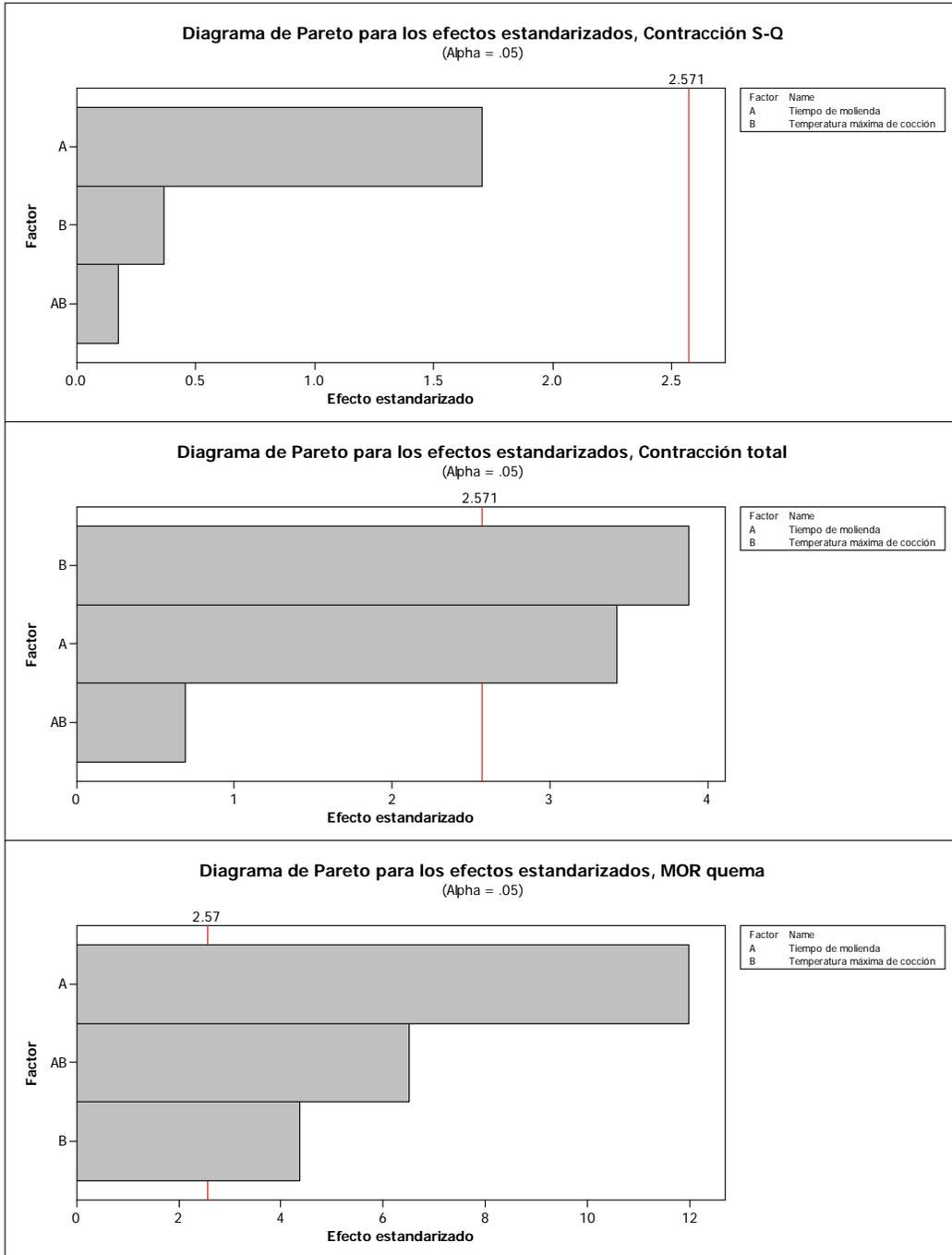
Gráfica de probabilidad normal de los residuales

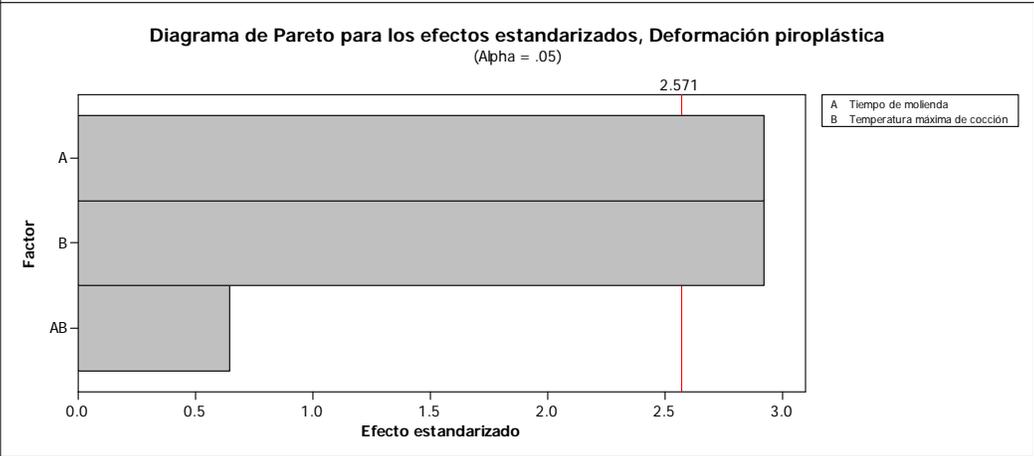
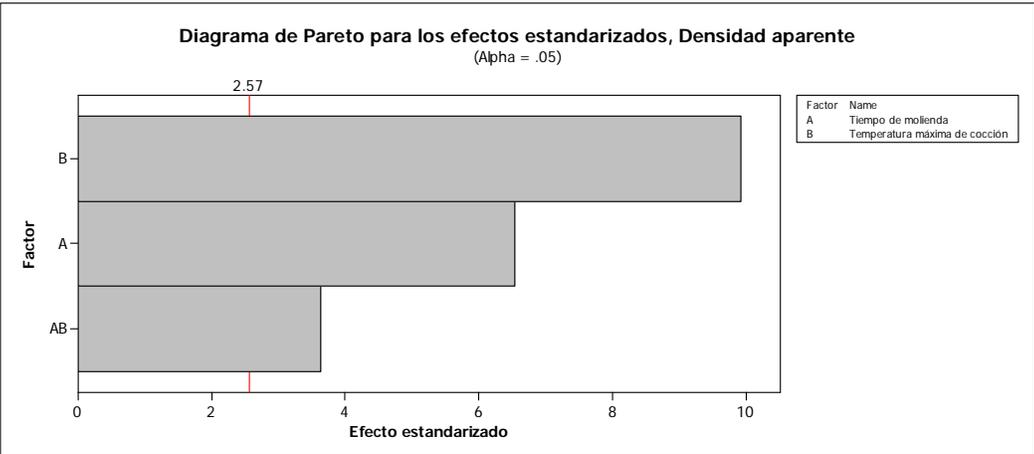


Histogram of the Residuals

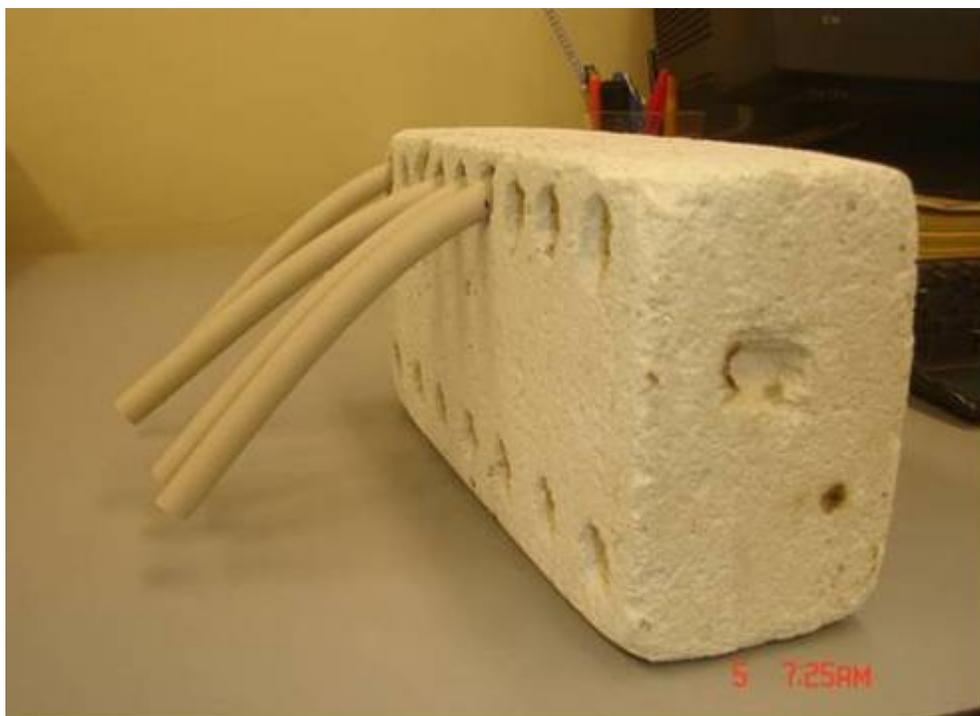


### ANEXO 3: Gráficas de Pareto para los Efectos de los Factores



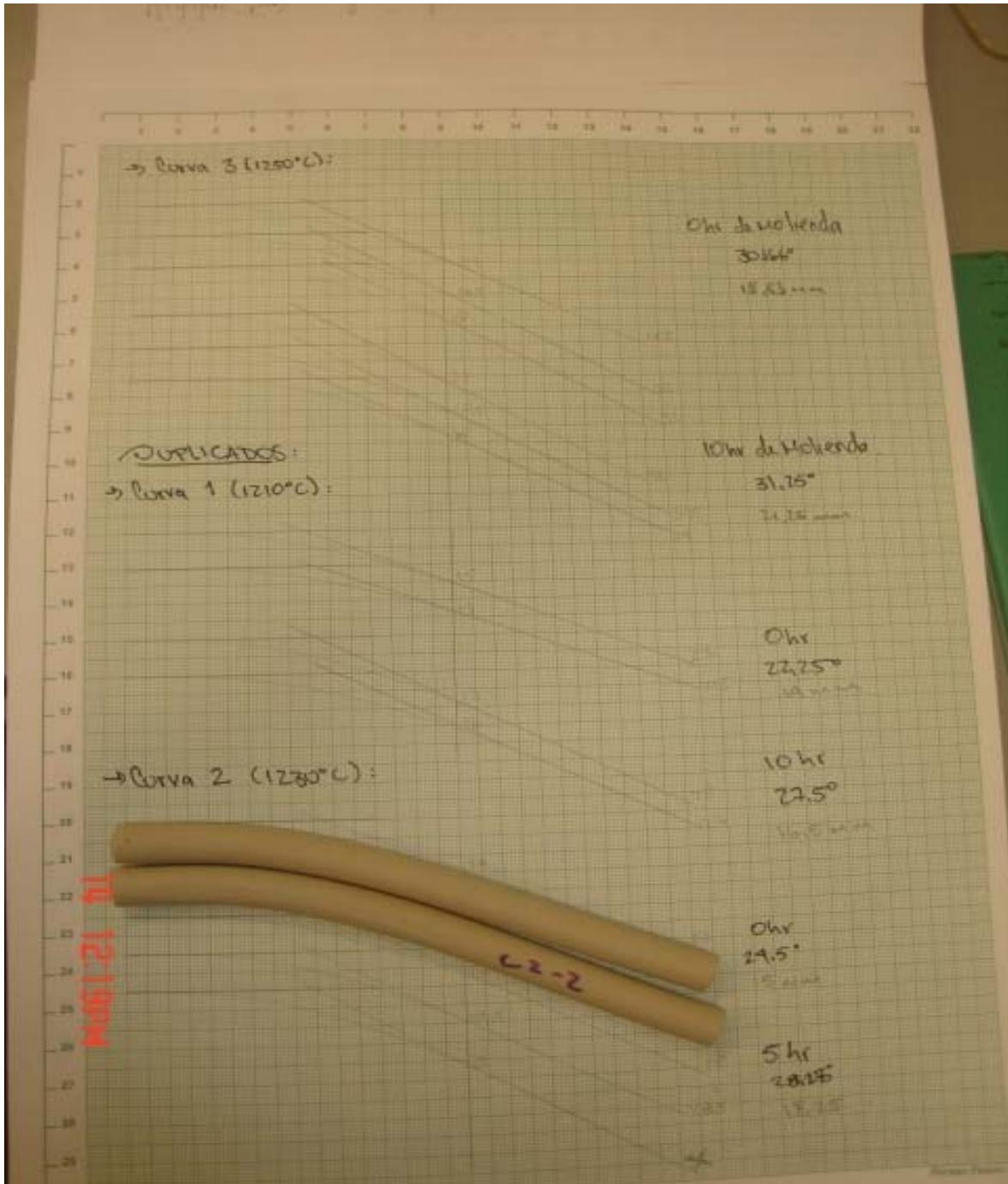


**Anexo 4: Foto del montaje para deformación pirolástica**



Soporte refractario con barras después de quema

## ANEXO 5. Foto medición de deformación pirolástica.



Medición de grado de deformación pirolástica en papel milimetrado.