

CARACTERIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE PASTA TIPO PORCELANA PARA LA
EMPRESA CERÁMICAS RENACER DE EL CARMEN DE VIBORAL

JUAN PABLO OCAMPO BOTERO

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA
MEDELLÍN

2016

CARACTERIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE PASTA TIPO PORCELANA PARA LA
EMPRESA CERÁMICAS RENACER DE EL CARMEN DE VIBORAL

JUAN PABLO OCAMPO BOTERO

Trabajo de grado para optar por el título de
MAGÍSTER EN CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA

Director

Ph.D. DIEGO ALEJANDRO MUÑOZ DURANGO

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA
MEDELLÍN

2016

25 de noviembre de 2016

Juan Pablo Ocampo Botero

“Declaro que esta tesis (o trabajo de grado) no ha sido presentada para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o cualquier otra universidad” Art 82 Régimen Discente de Formación Avanzada.

Firma

Juan Pablo Ocampo

CONTENIDO

CONTENIDO	4
LISTA DE TABLAS	6
LISTA DE FIGURAS	8
RESUMEN	9
INTRODUCCIÓN.....	11
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
2. JUSTIFICACIÓN	15
3. OBJETIVOS	17
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	17
4. MARCO REFERENCIAL.....	18
4.1. ESTADO DEL ARTE, FORMULACIÓN DE ARCILLAS TIPO PORCELANA .	18
4.2. LA CERÁMICA.....	25
4.3. CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS Y DE MEZCLAS DE PASTAS CERÁMICAS	29
4.4. DISEÑO DE EXPERIMENTOS PARA MEZCLAS DE COMPONENTES.....	34
5. DISEÑO METODOLÓGICO	37
5.1. CARACTERIZACIÓN DE CAOLINES Y ARCILLAS	37

5.2.	PREPARACIÓN DE LA PASTA. MEZCLAS DE CAOLINES, ARCILLAS, FELDESPATOS Y CUARZOS	37
5.3.	CARACTERIZACIÓN DE LAS PRUEBAS DE CAOLINES-ARCILLAS Y MEZCLAS DE CAOLINES, ARCILLAS, FELDESPATOS Y CUARZOS	38
6.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	43
6.1.	CARACTERIZACIÓN DE CAOLINES Y ARCILLAS	43
6.2.	CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS DE CAOLINES-ARCILLAS Y MEZCLAS DE CAOLINES, ARCILLAS, FELDESPATOS, CUARZOS.....	47
6.3.	MODELADO DE LAS RESPUESTAS DE INTERÉS	54
7.	CONCLUSIONES.....	57
7.1.	CONSECUCIÓN DE OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	57
7.2.	CONSECUCIÓN DE OBJETIVO GENERAL.....	60
7.3.	DIFICULTADES ENCONTRADAS EN EL DESARROLLO DEL PROYECTO	61
	BIBLIOGRAFÍA	62
	ANEXOS	68

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resultados de propiedades de porcelana Inga & Saetama (2009).....	18
Tabla 2. Resultados análisis químico Bernal, et al (2003)	21
Tabla 3. Resultados composición mineralógica Bernal, et al (2003)	22
Tabla 4. Resultados composición mineralógica de las arcillas (análisis orientado) Bernal, et al (2003)	22
Tabla 5. Caracterización de caolines y/o arcillas plásticas y no plásticas	45
Tabla 6. Formulación de mezclas para pastas	48
Tabla 7. Caracterización de mezclas de caolines, arcillas, feldspatos y cuarzos.....	49
Tabla 8. Modelado de las respuestas de interés en función de los componentes de mezcla.	55
Tabla 9. Caracterización muestras Caolín blanco Oiba.....	68
Tabla 10. Caracterización muestras Caolín gris Oiba	69
Tabla 11. Caracterización muestras Arcilla Arcabuco	70
Tabla 12. Caracterización muestras Caolín Unión	71
Tabla 13. Caracterización muestras Caolín JM.....	72
Tabla 14. Caracterización muestras Arcilla Amalia.....	73
Tabla 15. Caracterización muestras Mezcla 1	74
Tabla 16. Caracterización muestras Mezcla 2	75
Tabla 17. Caracterización muestras Mezcla 3	76
Tabla 18. Caracterización muestras Mezcla 4.....	77
Tabla 19. Caracterización muestras Mezcla 5	78
Tabla 20. Caracterización muestras Mezcla 6.....	79

Tabla 21. Fracciones utilizadas para encontrar un modelo de primer y segundo orden con mezclas y caracterizaciones completas	80
--	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fases resumidas del proceso cerámico.....	26
Figura 2. Región experimental de un diseño de mezclas con cuatro componentes.....	35
Figura 3. Región experimental de un diseño de mezclas de cuatro componentes: caolín y/o arcilla plástica, caolín y/o arcilla no plástica, feldespato y cuarzo	38
Figura 4. Preparación de mezclas de arcillas, caolines, feldespato, cuarzo y otros aditivos	39
Figura 5. Ilustración prueba de absorción	40
Figura 6. Ilustración de muestras prueba de contracción al secado.....	40
Figura 7. Ilustración de prueba de contracción a la quema	41
Figura 8. Ilustración de prueba de pérdidas por ignición	41
Figura 9. Ilustración de prueba de determinación de color a la quema	42

RESUMEN

El presente trabajo muestra la caracterización y formulación de una pasta tipo porcelana para la empresa Cerámicas Renacer de El Carmen de Viboral. Para lograr el objetivo se realizó primero una búsqueda bibliográfica de las posibles fuentes de arcillas y de caolines cerca del lugar de puesta en marcha del proyecto, y que fueran de fácil consecución, económicas y de buena calidad. Luego el trabajo se centró en caracterizar cada uno de estos caolines y arcillas por separado, efectuando pruebas de plasticidad, prueba de cambio de color en quema, prueba de contracción en secado y quemado, prueba de pérdidas por ignición y prueba de absorción.

Después de caracterizar estos caolines y arcillas, se analizaron formulaciones preliminares con la ayuda del diseño de experimentos en mezclas que aporta la teoría, para luego, empezar a realizar mezclas de componentes de una pasta (caolines, arcillas, feldspatos, cuarzos y otros aditivos) y efectuar las mismas pruebas que se realizaron en la caracterización de caolines y arcillas.

Se obtuvieron seis mezclas como posibles formulaciones para pasta tipo porcelana. La mezcla fue la formulación que más se acercó a una pasta tipo porcelana, alcanzando los siguientes parámetros, porcentaje de absorción (0.2 %); porcentaje de pérdidas por ignición (11.9%); porcentaje de contracción a la quema (9.9%); porcentaje de contracción al secado (2.7%) y una pasta de muy buena plasticidad.

El color luego de la quema de la mezcla 4 no fue el óptimo por lo que se plantearon las mezclas 5 y 6. Los resultados de la caracterización de las mezclas 5 y 6 mostraron una leve mejoría para el color después de la quema, pero los resultados en la prueba de absorción,

3.5% para la mezcla 5 y 1.9 % para la mezcla 6, no fueron los satisfactorios para una cerámica porcelana que tenga una buena durabilidad. Las mezclas 5 y 6 podrían ser utilizadas para fabricar cerámica tipo loza.

INTRODUCCIÓN

El municipio de El Carmen de Viboral se encuentra ubicado en la subregión del oriente antioqueño, limita por oriente con los municipios de Cocorná y El Santuario, por el occidente con los municipios de La Ceja, Abejorral y La Unión, por el norte con los municipios de Marinilla y Rionegro y por el sur con el municipio de Sonsón. Es un municipio que basa su economía en la ganadería, la agricultura, la floricultura, comercio y en la industria de la cerámica artesanal. La cerámica es uno de los productos más valiosos con los que cuenta el municipio, de este, se desprenden innovaciones técnicas, tecnológicas y estéticas.

Según Cerámicas Renacer (2014), El Carmen de Viboral es un municipio artesano reconocido en Colombia por su elaboración de cerámica a mano. En este se trabaja la decoración de loza desde hace más de 100 años. Las últimas décadas del siglo XX fueron un tiempo de decaimiento para la producción de la cerámica y el sustento de muchas familias carmelitanas que vivían de esta labor. Varios inconvenientes dieron lugar al debilitamiento del proceso ceramista carmelitano:

- Problemas de aparición de productos terminados alternativos de mayor calidad y más baratos elaborados en polietileno, poliuretano o polipropileno.
- Uso de materias primas inadecuadas para la industria ceramista por no contar con técnicas para realizar un control adecuado de las combinaciones óptimas de arcillas provenientes de distintas vetas.
- Problemas de inflación al presentarse escasez de arcilla en el Carmen de Viboral teniendo que buscarla en Llano Grande o en La Unión, lo que conllevó al aumento del precio.

En medio de esta crisis, se dio el cierre de algunas fábricas, pero también el nacimiento de otras, como la empresa Cerámicas Renacer (Cerámicas Renacer, 2014).

La empresa Cerámicas Renacer, empresa reconocida y emblemática del municipio El Carmen de Viboral, es una empresa que difunde los valores de la cerámica decorada a mano, resalta la tradición ceramista en el municipio y compite con el mercado de productos ofertados, locales e internacionales. Los consumidores en la compra de vajillas tienen diversas opciones de qué materiales van a tener en sus casas. Hay dos tipos comunes de vajillas, la de porcelana y la de loza. La loza no es tan fuerte como la porcelana, ni tan resistente o tan duradera. Cerámicas Renacer quiere fabricar vajillas tipo porcelana que sean blancas, rígidas y duraderas, con la cual se puedan atraer nuevos clientes, abriendo la posibilidad de incursionar en el mercado de los restaurantes y hoteles que necesitan vajillas de buena calidad y resistentes.

Cerámicas Renacer, quiere desarrollar entonces, su propia pasta para fabricar cerámica loza y cerámica porcelana, para lo cual, está explorando materiales para realizarla, y, en lo posible, que sean de buena calidad, económicos y que estos materiales se encuentren cerca de la región. Por tal razón, el objetivo general del presente trabajo es formular de forma óptima una pasta tipo porcelana para la empresa Cerámicas Renacer de El Carmen de Viboral.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Según Trujillo (2012), en el municipio de El Carmen de Viboral la cerámica es uno de los productos más valiosos con los que cuenta el municipio, de este, se desprenden innovaciones técnicas, tecnológicas y estéticas. Según Ramírez (2010), el 91.1 % de la producción de cerámica de El Carmen de Viboral corresponde a tazas, pocillos y platos, el 8.9 % restante corresponde a ceniceros, floreros, vajillas decoradas a mano, artículos eléctricos aisladores, copas y vasos para licores.

La empresa Cerámicas Renacer, ubicada en el municipio de El Carmen de Viboral, desarrolla nuevos productos que buscan satisfacer las necesidades de los clientes generando cada día cerámicas decoradas de mejor calidad y de alto valor simbólico. Para seguirse consolidando a nivel local, nacional e internacional, la empresa necesita buscar nuevas alternativas de materias primas para la fabricación de cerámica y más especialmente, el desarrollo de una pasta tipo porcelana.

Actualmente la empresa solo cuenta con un proveedor que le vende la pasta lista para los diferentes procesos de fabricación de cerámica tipo loza; lo que ha ocasionado que la producción de cerámicas a mano se haya tenido que suspender, hasta por varias semanas, debido a que el proveedor no les facilitó la materia prima para la producción. En otras circunstancias, algunos clientes han mostrado el descontento de las piezas debido a la poca durabilidad en el tiempo de las cerámicas que adquieren en la empresa, manifestando que les ha faltado resistencia. Es por esto, que se quieren explorar nuevas alternativas de consecución

de materias primas para fabricar cerámica tipo loza y tipo porcelana que sea de mejor resistencia mecánica.

Se requiere entonces caracterizar y formular mezclas de materiales para desarrollo de pasta cerámica, con la cual se puedan tener alternativas para la fabricación de loza y más específicamente porcelana que por el momento no se realiza en la empresa.

Por lo tanto, para llevar a cabo el desarrollo de la pasta cerámica, se debe hacer una búsqueda bibliográfica de las posibles fuentes de arcillas y en especial de caolines cerca del lugar de puesta en marcha del proyecto, y que sean de fácil consecución, económicas y de buena calidad. “La arcilla comunica plasticidad y cohesión, pero empeora el color blanco de la porcelana. Por eso merecen especial atención las masas porcelánicas preparadas sólo con caolín sin arcilla plástica. La porcelana elaborada con estas masas destaca por su gran blancura” (Avgustinik, 1983).

Luego de haber efectuado este análisis bibliográfico y obtener formulaciones preliminares, se tiene que centrar en caracterizar cada uno de estos caolines y arcillas. Efectuar pruebas de plasticidad, prueba de cambio de color en quema, prueba de contracción en secado y quemado, prueba de pérdidas por ignición, prueba de absorción y prueba de resistencia mecánica. Después de caracterizar estos caolines y arcillas, se podrá empezar a realizar mezclas con la ayuda de la teoría del diseño de experimentos, de componentes de una pasta, (caolines, arcillas, feldespatos, cuarzos y otros aditivos) y efectuar las mismas pruebas que en la caracterización, hasta llegar a la pasta tipo porcelana que se desea, blanca y duradera.

2. JUSTIFICACIÓN

En la fabricación de una cerámica decorada a mano se deben tener en cuenta muchos aspectos para la realización de una pieza. Moldear la pieza por colado o torneado, establecer el óptimo tiempo de secado, arreglar las piezas defectuosas, establecer la temperatura óptima de quema de bizcocho, efectuar la decoración, esmaltar las piezas, efectuar la segunda quema de piezas y efectuar el análisis de calidad de las piezas terminadas. Todos estos aspectos están sujetos a la clase de material que se va a utilizar para moldear la pieza por colado o torneado. Según Galán & Aparicio (2006), el material de la pasta con que se va a realizar la pieza condiciona la calidad de la pieza terminada y las condiciones de trabajo de todas las etapas. Entonces, para fabricar una pieza, se debe hacer un estudio y análisis de cada uno de los materiales para resolver la siguiente pregunta, ¿cuáles son las mezclas óptimas de caolines, arcillas, feldspatos, cuarzos y otros aditivos con las cuales se pueda fabricar una pieza cerámica con propiedades de porcelana y que se pueda decorar a mano?

Actualmente, Cerámicas Renacer tiene dentro de sus proyecciones, el no depender de otras empresas que les facilite la pasta cerámica para las diferentes piezas que se realizan en la planta. Para lo cual es importante empezar a realizar estudios de posibles fuentes de materias primas, caracterizar esas materias primas, y estudiar las posibles mezclas que conduzcan a una cerámica duradera y de buena calidad. Con este trabajo se analizan las posibles fuentes de caolines y arcillas que pueden ser utilizadas por la empresa. Se presenta un análisis de la caracterización de pruebas principales de estas arcillas y/o caolines, como

también quedan establecidas algunas mezclas de caolines, arcillas, feldespatos y cuarzos con los que se puedan fabricar cerámicas en la empresa.

La empresa Cerámicas Renacer piensa a futuro en implementar su propia fabricación de pasta cerámica para las diferentes líneas que maneja la empresa. Con este previo análisis de caracterización y estudio de posibles mezclas para fabricar cerámica, se estaría contribuyendo no solo al desarrollo de una pasta cerámica, sino también a la generación de empleos a futuro, puesto que se necesitaría de un mayor número de personas para llevar a cabo este proceso de preparación de pasta para cerámica tipo porcelana.

Con la fabricación de porcelana, la empresa Cerámicas Renacer puede incursionar en el mercado de los restaurantes y clientes especiales generando más beneficios para la empresa. Trabajar, caracterizar y formular pasta para cerámica le devolvería aún más la tradición al municipio de El Carmen de Viboral que se ha perdido en los últimos años.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Formular de forma óptima una pasta tipo porcelana para la empresa Cerámicas Renacer de El Carmen de Viboral.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las posibles fuentes de materias primas.
- Ejecutar las diferentes pruebas características para caolines y arcillas identificados.
- Planificar la experimentación adecuada para la optimización de la pasta.
- Ejecutar las diferentes pruebas características de mezclas de componentes de pasta.
- Modelar las diferentes pruebas en función de las proporciones de los componentes de pasta.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1. ESTADO DEL ARTE, FORMULACIÓN DE ARCILLAS TIPO PORCELANA

Inga & Saetama (2009) desarrollaron una formulación química para la producción de porcelana en el laboratorio. Las materias primas que utilizaron fueron suministradas por la planta de cerámica CERART, ubicada en la ciudad de Loja, Quito, Ecuador. Obtuvieron 10 formulaciones de diferentes mezclas de arcillas para someterlas a diferentes pruebas y obtener la mejor formulación. La mejor mezcla de componentes fue en la que el porcentaje de caolín era del 66.7%, 8.33 % de feldespato, 8.33 % de cuarzo, 4.17% de talco y 12.15% de óxido de zinc. Adicionalmente se obtuvo una temperatura máxima de quema óptima de 1300 °C. Los resultados de algunas propiedades a esta temperatura se muestran en la Tabla 1. Para llegar a las formulaciones se analizaron las diferentes etapas de preparación de arcillas, caracterización, adecuación, molienda e hicieron énfasis en la última etapa, purificación.

Tabla 1

Resultados de propiedades de porcelana Inga & Saetama (2009).

PRUEBA	Resistencia Mecánica (Kgf/cm²)	Contracción total (%)	Densidad real (g/cm³)	Espacio poroso (%)	Absorción (%)
VALOR	1135.92	17.40	3.34	0.75	0.23

Ríos (2009) estudió diferentes materias primas colombianas de arcillas para la fabricación de materiales cerámicos de muy buena resistencia mecánica (gres porcelánico).

En el análisis de las materias primas utilizó diferentes técnicas para encontrar cuantitativamente los componentes de cada tipo de arcilla de las diferentes zonas de extracción, caracterización mineralogía por refracción de rayos X, caracterización química a partir de fluorescencia de rayos X, análisis térmico DTA-TG (Differential Thermal Analysis-Thermogravimetric), análisis dilatométrico, análisis microestructural por microscopía electrónica de barrido, análisis de tamaño de partícula y medición de coordenadas colorimétricas por espectrofotometría. Fueron 22 tipos de arcillas seleccionadas para los análisis, provenientes de cuatro departamentos diferentes, Antioquia, Santander, Boyacá y Tolima. Ríos (2009) logró desarrollar un gres porcelánico con arcillas colombianas de buena calidad en cuanto a baja porosidad y una buena densificación. Los resultados del estudio mostraron que la absorción de agua es menor al 1% y las temperaturas de calcinación varían entre los 1165°C y los 1220°C. Los porcentajes de la pasta fueron 40-50% de feldespato potásico, 40-45% de arcillas illítico-caoliníticas y 5-10% de cuarzo.

De igual forma, Dal Bó et al. (2016), estudiaron cómo mejorar las propiedades mecánicas a los materiales de gres porcelánico. Utilizaron un polvo de material cerámico, constituido por arcillas, feldespato sódico y materiales inertes para estudiar el incremento en las propiedades mecánicas a través de un proceso denominado templado químico. El polvo porcelánico fue prensado a 21 MPa, formando probetas de 70 x 30 x 6 mm, y llevando a un horno a 1200 °C durante 18 min. Luego de esto, las probetas se sumergieron en un baño de nitrato de plata, con el objetivo de realizar el templado químico. El tratamiento químico se llevó a cabo utilizando un planteamiento factorial, variando el tiempo de tratamiento (1, 5.5 y 10 h) y la temperatura de tratamiento (360, 420 y 480 °C). Los resultados mostraron un

aumento en la resistencia en la rotura del material de aproximadamente del 74% y una reducción del espesor del material en aproximadamente un 15 %. Concluyeron que con la reducción de espesor, se puede lograr bajar los costos en la utilización de energía, disminuir la extracción de minerales y economizar materias primas; también, que el proceso de templado químico, puede ser aplicable en baldosas cerámicas.

Ramírez (2012) trabajó 18 tipos de arcillas para determinar las características finales cocidas a diferentes temperaturas 1050°C, 1100 °C y 1150 °C. Para el análisis de las fases presentes en las muestras después de haberse calcinado a las temperaturas anteriores utilizó la caracterización química por medio de fluorescencia de rayos X, caracterización mineralógica por difracción de rayos X y análisis térmico diferencial. Las fases presentes en cada una de las muestras fueron la fase amorfa, mullita, cuarzo, hematita, cristobalita, enstatita, y anortita. En el estudio se concluyó que las fases amorfa y mullita ayudan a aumentar la resistencia mecánica hasta un valor menor del 65%. Las cantidades altas de cuarzo disminuyen la resistencia mecánica, por lo tanto, los valores de la fase de cuarzo deben estar entre 20% y el 30%. La fase anortita ayuda a darle estabilidad a las piezas y los compuestos de magnesio ayudan a acelerar el proceso de sinterización.

Santos et al. (2009) estudiaron la posibilidad de desarrollar pastas cerámicas para la fabricación de ladrillos y tejas. Caracterizaron tres arcillas conocidas en la vereda Guayabal (municipio de Barichara, Santander) como Cascajo, Roja y Amarilla. Las arcillas analizadas fueron descritas mineralógica, plástica, granulométrica y térmicamente. Las pastas fueron preparadas utilizando las arcillas puras o mezclándolas entre ellas, realizando los diferentes procesos como mezclado, conformado, secado y cocción. Los resultados del estudio

arrojaron que la arcilla roja es la mejor elección para la fabricación de tejas. La combinación de arcilla Cascajo, 55%, y arcilla Amarilla, 45%, se puede utilizar para ladrillos de construcción. La arcilla amarilla por sí sola no tiene buenas propiedades para la fabricación de pastas cerámicas, pero al mezclarse con la arcilla Cascajo podría destinarse para la obtención de cerámicos de construcción.

Bernal et al. (2003) trabajaron la relación entre la composición química y mineralógica de las arcillas, con su comportamiento cerámico. El comportamiento mineralógico es determinante para predecir cómo se comporta la arcilla en los procesos de fabricación de piezas cerámicas. A través del método de difracción de rayos X y del análisis químico, desarrollaron un método de análisis próximo, que consiste en relacionar los resultados analíticos con sus propiedades, permitiendo una composición mineralógica aproximada cuantitativa. Para el análisis de los componentes, tomaron una muestra de la Sabana de Bogotá y determinaron el análisis químico y la composición mineralógica de las arcillas, como se muestra en las Tablas 2, 3 y 4. Los resultados calculados se encuentran dentro de los rangos de la composición mineralógica determinada por difracción de rayos X. Concluyeron que este cálculo cuantitativo aproximado se puede implementar en los laboratorios de arcillas, para tener un estimado de la composición y poder estudiar mejor su comportamiento tecnológico en las etapas de fabricación cerámica.

Tabla 2

Resultados análisis químico Bernal, et al. (2003)

Muestra	%SiO₂	%Fe₂O₃	%Al₂O₃	%CaO	%MgO	%Na₂O	%K₂O	%TiO₂
Sabana	72.19	5.01	12.23	0.09	0.48	0.55	0.85	0.83

Tabla 3*Resultados composición mineralógica Bernal, et al. (2003)*

	Minerales de arcilla					Silicatos			Sulfatos	Óxidos		Otros
Referencia	Esmectita	Caolinita	Halloysita	Illita	Clorita	Cuarzo	Feldspatos	Piroxenos	Yeso	Hematita	Anatasa	Materia Orgánica
Sabana	3-10	20-30	0	3-10	<3	40-50	1	0	<1	<5	<3	0

Tabla 4*Resultados composición mineralógica de las arcillas (análisis orientado) Bernal, et al. (2003)*

	Arcillas simples				Interestratificados		
Referencia	Esmectita	Caolinita	Illita	Clorita	Illita/Esmectita	Clorita/Esmectita	Illita/Clorita
%	16.40	59.10	11.80	0.09	0.48	0.55	0.85

En la fabricación de baldosas, producto cerámico muy utilizado en la industria colombiana, en muchos casos se presentan problemas debido a las condiciones de descarga de la barbotina (suspensión de sólidos en agua, productos de la molienda en húmedo) y a las propiedades del polvo atomizado, producto que cuenta con una humedad residual y una distribución establecida para el proceso (se realiza en un equipo de secado, conocido como atomizador). Méndez & Hernández (2007) trabajaron una posible optimización para el proceso de secado y molienda por pulverización en la empresa Cerámicas Italia S.A. Evaluaron las variables de proceso que afectan las propiedades de la barbotina, y en el

proceso de secado por pulverización, estudiaron las variables del equipo, la influencia de la humedad residual y la granulometría del polvo obtenido. Obtuvieron y concluyeron que se pueden reducir los costos hasta 2,5 pesos/kg de pasta atomizada al recalcular el factor de rechazo. Las mejores propiedades fisicocerámicas para el proceso ocurren para un tamaño granulométrico comprendido entre los 200 y 600 μm . El control de materias primas reduce el número de acondicionamientos de la barbotina y el número de moliendas se reduce en un 4% aumentando la carga de sólidos secos en un 11%, manteniendo la calidad de la barbotina.

En muchos casos de investigaciones científicas, uno de los objetivos principales, es poder establecer relaciones entre las variables experimentales y otras obtenidas por medio de modelos matemáticos. En el caso de la cerámica, es posible encontrar ecuaciones matemáticas que pronostiquen las diferentes pruebas características de estas y poder optimizar de una forma más adecuada las fracciones de componentes. Caballero & Grossmann (2007) hicieron una revisión del estado del arte en optimización. Los problemas de optimización se clasifican en los que involucran variables continuas y en los que intervienen variables continuas y discretas (o solamente discretas). Exploraron las técnicas de optimización más importantes como programación lineal, programación no lineal, programación lineal mixta (MLP), programación no lineal con variables enteras y continuas (MINLP), programación disyuntiva generalizada (GDP), optimización global, métodos de optimización sin derivadas y sistemas de modelado.

El estudio de materiales cerámicas avanzados en la actualidad, se ha venido desarrollando de manera significativa, debido a diversas aplicaciones que se han encontrado, como en la industria aeronáutica. Frades et al. (2016) encontraron unos parámetros óptimos

en cuanto a temperatura y tiempo para la sinterización reactiva (obtención de mullita a través de alúmina y sílice) de cerámica estructural. Luego de haber efectuado la caracterización química por difracción de rayos X (DRX) de las materias primas, se realizó la sinterización a dos temperaturas, 1585 °C y 1590 °C, para luego determinar dos propiedades físicas, la absorción de agua y la resistencia a la flexión. Mediante un diseño experimental, con una matriz de experimentos de 2^2 (experimento 1 1585 °C 1 h, experimento 2 1590 °C 1 h, experimento 3 1585 °C 2 h, experimento 4 1590 °C 2 h), se logró un óptimo de 1600 °C y un tiempo de retención de 3 h para un valor mínimo de porosidad de 20 %. De igual forma, se logró un óptimo de 1600 °C y un tiempo de retención de 1.5 h para un valor máximo de flexión de 100 MPa. Se evidenció la formación de mullita por sinterización reactiva.

Para el desarrollo de cualquier cerámica porcelana siempre están presentes tres componentes principales, caolín y/o arcilla, feldespato y cuarzo. Basados en estos estudios previos de mezclas de componentes para fabricar diferentes tipos de cerámica, se evaluarán unas mezclas preliminares, teniendo en cuenta las conclusiones de cada uno de los autores anteriores, que ayuden a ir garantizando las propiedades requeridas, cerámica de buena plasticidad, blanca y de buena resistencia mecánica.

Con el aporte del presente trabajo, se estaría contribuyendo al desarrollo de la cerámica loza y porcelana que se decora a mano en diferentes regiones del país, y más específicamente, para el oriente antioqueño. Se dejan las bases de las posibles fuentes de materias primas, sus valores en las pruebas más características, algunas posibles mezclas para el desarrollo de una cerámica de buena resistencia mecánica y se dejan establecidos modelos matemáticos preliminares de la prueba de absorción, prueba de contracción a la quema y

prueba de pérdidas por ignición en función de la composición de las mezclas para estudios posteriores.

4.2. LA CERÁMICA

La cerámica es el arte de fabricar todo tipo de objetos, lozas y porcelanas, como vajillas, ladrillos, tejas, baldosas, utensilios de cocina y recipientes, a través de diferentes arcillas. Las arcillas son moldeadas en húmedo para darles la forma y mediante calentamiento se endurecen para adquirir las propiedades de durabilidad requeridas.

Según Gómez (1991), las arcillas son un grupo de rocas finamente divididas, compuestas por minerales cristalinos. Las arcillas están constituidas por minerales arcillosos y minerales no arcillosos. Los minerales arcillosos están constituidos por silicatos hidratados de hierro, magnesio y aluminio. Los minerales no arcillosos, como el cuarzo y el feldespato, normalmente constituyen impurezas y tienen composición variable.

Como ya se dijo, una pasta para cerámica, básicamente está conformada por tres compuestos diferentes: arcilla y/o caolín, feldespato y cuarzo. El cuarzo es la forma cristalina de la sílice, es el componente principal de las arenas y el encargado de darle la resistencia a la pasta. La arcilla y/o caolín le da a la pasta las principales propiedades como plasticidad, textura, color en quema y durabilidad. Las arcillas y los caolines proporcionan la base de la industria cerámica y son la materia prima principal para la elaboración de diferentes tipos de cerámicas. El feldespato hace unir el cuarzo con la arcilla y/o caolín en una pasta cerámica. Los feldespatos son silicoaluminatos de potasio y/o sodio y es considerado el fundente más importante en la cerámica.

“Los cambios que tienen lugar durante los procesos de secado y cocción, y también las características de la pieza final, están determinados por las proporciones de estos tres constituyentes: arcilla, cuarzo y fundente. Una porcelana típica puede contener aproximadamente 50% de arcilla, 25% de cuarzo y 25% de feldespato” (Callister, 1995).

La diferencia entre cerámica loza y cerámica porcelana es que para fabricar la última, superior en calidad, se utiliza una arcilla pura, denominada caolín, el cual constituye la principal fuente de blancura de la pieza, a la que se le añaden fundente, llamado feldespato, y un desengrasante, llamado cuarzo o sílex, elementos duros, de color natural blanco o translúcido. Para que el producto se considere porcelana es necesario que sufra dos cocciones: la primera a una temperatura entre 1000 y 1300 °C, y la segunda a temperatura más alta, pudiendo llegar a los 1800 °C, y la prueba de absorción debe entregar valores entre el 0 y el 1%.

Robledo (2007) menciona que en la producción de la cerámica artesanal se utilizan diferentes procesos físicos y químicos. Las etapas utilizadas se presentan en la Figura 1.

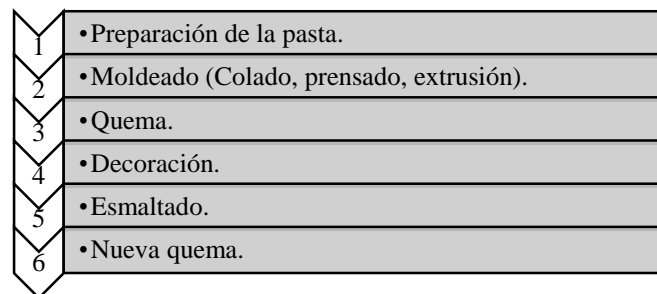


Figura 1. Fases resumidas del proceso cerámico.

Preparación de la pasta: La preparación de las pastas para cerámica comprende las siguientes operaciones: dosificación, molienda, tamizado, mezcla, humidificación, filtración, escurrido, desecación, estacionamiento y homogeneización. De estas operaciones, se eligen los procesos y equipos más adecuados según la conformación de las piezas, ya sea por vía húmeda o colado, estado plástico o semiseco (Morales, 2005).

Moldeado (torneado, colado, extrusión): El torneado se fundamenta en el empleo del torno y solo se pueden confeccionar objetos con un eje de revolución. El procedimiento consiste esencialmente en dos operaciones, la primera es el torneado propiamente dicho (ejecución de la forma de revolución) y el acabado (colocación de accesorios, asas, etc). Las operaciones fundamentales del torno se pueden resumir así: en el molde rotativo, el operario arroja una bola o una torta de pasta, después aproxima el calibre para formar las paredes del objeto, mientras corta una cuchilla el exceso de pasta en los bordes del molde, y finalmente pasa una esponja húmeda para uniformar y alisar la pieza (Morales, 2005).

El colado consiste en la utilización de moldes de yeso (absorbe el agua) donde se vierte la pasta de cerámica líquida. La pasta líquida agregada se va secando con el paso del tiempo y la pared de arcilla que rodea al molde se hace más gruesa. Cuando el espesor requerido es el adecuado se retira la pasta líquida que no se alcanzó a secar y se abre el molde. Con una cuchilla o esponja húmeda se uniforman los defectos y se alisan las piezas (Ramirez, 2010). El colado se aplica en la fabricación de artículos sanitarios, vajillas, objetos artísticos y de forma general a productos huecos y de formas complejas. El punto clave es la preparación de la barbotina, paso en el que se mezclan las materias primas con agua y se le agregan aditivos.

El moldeado por extrusión consiste en hacer pasar pasta de cerámica semiseca a través de un orificio con forma más o menos compleja, de manera tal, y continua, que el material adquiera una sección transversal igual a la del orificio produciendo largas longitudes que luego se cortan. Cambiando las boquillas se logran distintos perfiles y secciones. Ejemplos de cerámicos extruidos son ladrillos, tejas, bloques, tuberías, cañerías, perfiles y conductos eléctricos (Ramirez, 2010).

Quema: La cocción de las piezas es el proceso de consolidación más común de la industria cerámica. El proceso de cocción consiste en consolidar el material pulverulento seco sin alcanzar la temperatura de fusión. A la temperatura de sinterizado, se forma una gran cantidad de líquido que al enfriarse se transforma en vidrio que une las partículas sólidas. Cuanto mayor es la temperatura de cocción, mayor será la cantidad de liga vítrea formada que une los granos cristalinos. La liga vítrea tiene varios efectos como el mojado y disolución de las partículas, la disminución o eliminación de la porosidad, el incremento en la cinética del proceso, la consolidación del material por efecto de la tensión superficial y el incremento en la densidad. Las piezas moldeadas por colado, torneado o extrusión se llevan a un horno donde estarán expuestas a temperaturas que alcanzan hasta los 1200 °C y con tiempos de entre las 8 y las 10 horas.

Decoración: Luego de que las piezas son sometidas al primer proceso de cocción, cada pieza obtiene finura y resistencia, con lo que se puede realizar la decoración. Utilizando pinceles y pigmentos naturales en polvo de diferentes colores, los cuales se mezclan con agua, la cerámica es pintada. La mayoría de las decoraciones en Cerámicas Renacer son propias de la tradición de El Carmen de Viboral y las personas que decoran estas piezas ya

tienen sus diseños en cada de una de sus mentes. Hay otras decoraciones que son personalizadas y son necesarias unas guías para realizarlas. Cerámicas Renacer maneja unas 200 referencias y 80 decoraciones.

Esmaltado: El esmaltado se realiza con fines de protección o decorativos. Consiste en una fina capa vítrea de hasta medio milímetro de espesor formada sobre el cuerpo cerámico. Comúnmente el esmalte se aplica por rociado, atomizado, inmersión o calcomanía sobre el objeto ya cocido.

Nueva quema: El objeto esmaltado es pasado por un nuevo horno con un ciclo térmico adecuado para fundir el esmalte, lograr su adhesión y poderlo consolidar en la pieza. El tiempo y temperatura de las piezas en el horno generalmente es menor, respecto a la primera cocción.

4.3. CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS Y DE MEZCLAS DE PASTAS CERÁMICAS

Para caracterizar una materia prima utilizada para cerámica, sea caolín o arcilla, se realiza una serie de pruebas con el objetivo de tener una información preliminar acerca de cómo se puede comportar ese caolín o arcilla junto con los otros componentes de una pasta en el desarrollo de la pieza final. Corresponde a un análisis físico, químico y mecánico de cada material utilizado de manera que podamos conocer las propiedades y características que presentan (Inga & Saetama, 2009).

Prueba de absorción: El grado de absorción de agua o porosidad de la arcilla ya cocida determina la densidad de la materia prima. El control de la absorción de la humedad

garantiza la durabilidad de las piezas en el tiempo. La cerámica porcelana posee una absorción de agua comprendida entre el 0 y 1% (Galán & Aparicio, 2006).

Para realizar la prueba, primero se toma la masa de la pieza en seco. Luego se sumerge la pieza en agua y se calienta hasta 100 °C durante 3 horas. Luego, se dejan las piezas sumergidas durante 24 horas. Se toma la masa de la pieza húmeda y se verifica la cantidad de agua absorbida por la pieza. El porcentaje de absorción A de la pieza se determina de la siguiente forma:

$$A = \frac{(M_{ha} - M_{sa})}{M_{sa}} \times 100,$$

donde M_{sa} es la masa tomada de la pieza antes de sumergirla en el agua y M_{ha} la masa de la pieza luego de las 24 horas de reposo.

Prueba de contracción al secado: El secado de una pieza arcillosa es el mecanismo a través del cual se elimina el agua que humedece la pieza. A este proceso se le conoce como contracción, merma o encogimiento. Durante el secado se pueden deformar las piezas por lo que es una variable a controlar durante el proceso de fabricación de una pieza cerámica. Entre más agua tenga una arcilla, más encoge. “El delicado problema del secado en cerámica, se resuelve en gran parte cuando la velocidad de evaporación no supera a la velocidad de difusión del agua desde el interior a la superficie de la masa, y el agua puede difundirse y evaporarse a una velocidad tal que no dañe el material que se está secando” (Estrada & Espinosa de los Monteros, 1982).

Para calcular el porcentaje de contracción al secado de una pieza se toma una muestra y se incrusta en un anillo de 23 cm de diámetro. Se anota la longitud del perímetro antes del

secado que es conocido y después del secado de la muestra. El porcentaje de contracción al secado C_s de la pieza se determina de la siguiente forma:

$$C_s = \frac{(L_{is} - L_{fs})}{L_{is}} \times 100,$$

donde L_{is} es la longitud del perímetro del anillo antes del secado y L_{fs} es la longitud del perímetro de la muestra circular después del secado.

Prueba de contracción a la quema: La fase de encogimiento final de una pieza ocurre en la cocción de esta. Luego de la quema en el horno, la arcilla se vuelve dura, compacta y adquiere un cambio irreversible mostrando el aspecto de la pieza final. El debido control del porcentaje de la contracción a la quema garantiza unas piezas que no se deformen lo suficiente en el horno. Para calcular el porcentaje de contracción a la quema C_q se utiliza la siguiente expresión matemática:

$$C_q = \frac{(L_{ic} - L_{fc})}{L_{ic}} \times 100,$$

donde L_{ic} es la longitud del perímetro del círculo de muestra antes de la cocción y L_{fc} es la longitud del perímetro del círculo de muestra después de la cocción.

Prueba de pérdidas por ignición: Las pérdidas por ignición es la cantidad de materia que pierde la pieza al calcinarse. Puede ser materia orgánica, agua física, agua de cristalización u otras sustancias como sulfuros. Según Avgustinik (1983) en el proceso de la cocción se desarrollan siete tipos de reacciones:

- 1) Desprendimiento y eliminación de agua.
- 2) Oxidación de impurezas orgánicas.
- 3) Desprendimiento del agua de constitución.

- 4) Reacciones en las fases sólidas.
- 5) Reacciones en las fases líquidas y formación de la solución vítrea.
- 6) Formación de nuevas fases cristalinas.
- 7) Reacciones de descarbonización y desulfuración.

Todas estas reacciones hacen que la pieza pierda masa durante la cocción, haciendo que se deforme o salga con defectos luego de la quema. La prueba de pérdidas por ignición es muy importante para el control de la deformación de las piezas. Para calcular las pérdidas por ignición I se utiliza la siguiente fórmula matemática:

$$I = \frac{(M_{ic} - M_{fc})}{M_{ic}} \times 100,$$

donde M_{ic} es la masa de muestra antes de la cocción y M_{fc} es la masa de muestra después de la cocción.

Prueba de plasticidad: La plasticidad es la característica más sobresaliente de una pasta cerámica. Es la capacidad que tiene una arcilla para manejarla, moldearla y formar las respectivas piezas cerámicas; debido a la plasticidad, una pieza conserva su forma. En la formulación de una pasta cerámica se debe tener muy en cuenta esta propiedad. “El término plasticidad hace referencia a la capacidad de la arcilla para ser maleable y, sin embargo, conservar su forma una vez que ha sido moldeada” (Midgley, 1982, p.36).

Según Ginés, Feliu, García-Ten & Sanz (1997), los métodos para calcular la plasticidad de una arcilla se pueden dividir en dos grupos. En el primer grupo están los métodos directos, que son los que definen de una manera aproximada cómo es el comportamiento de la arcilla, tienen en cuenta la relación entre el contenido de humedad y la deformación producida y el esfuerzo aplicado. Entre los métodos directos están los métodos

de compresión, como el método de Moore, métodos de tracción, métodos de extrusión, métodos de flexión, métodos de cizalla o métodos de torsión. En el segundo grupo están los métodos indirectos, en los cuales no se evalúa directamente la plasticidad, sino valores relacionados con esta. Entre los métodos indirectos se encuentran el método de Atterberg y el método de Pfefferkorn. Los métodos indirectos, a pesar de que no dan un valor aproximado numérico de la plasticidad, son ampliamente utilizados por ser sencillos, económicos y dan un estimado de la “trabajabilidad” de la pasta.

Hay arcillas con buena plasticidad, pero con otras propiedades deficientes, y por el contrario, hay caolines con una mala plasticidad, pero con otras buenas propiedades como un color bueno en la quema. La prueba de plasticidad en la empresa Cerámicas Renacer se determina tomando una pequeña muestra de la pasta cerámica, se amasa, se forma un rollo y se forma una especie de arco. Si el arco se agrieta es símbolo de que la pasta cerámica es poco plástica, si no se agrieta el arco, la pasta cerámica es plástica. Dependiendo de la cantidad de grietas se determina que tan poco plástica es la pasta cerámica. Los operarios encargados de los diferentes procesos, de forma empírica y con la experiencia, son los que determinan si una pasta tiene buena plasticidad. Al momento de moldear la pieza, si se forman grietas en el torno, u ocurre adhesión de pasta por las paredes de los moldes, son síntomas de una pasta cerámica con una plasticidad no adecuada.

Prueba de determinación de color a la quema: La naturaleza y la composición de las diferentes primas, junto con sus impurezas, son las que tienen influencia en el desarrollo del color luego de la quema en el horno. “Las principales impurezas que dan colores extraños

a las piezas de cerámica son los compuestos de hierro y titanio; los caolines, cuarzos y feldspatos primarios suelen estar casi libres de dichos minerales” (Inga & Saetama, 2009).

La prueba de determinación de color a la quema es una inspección visual para determinar la coloración que ha tomado la pieza después de la cocción en el horno. La determinación de si el color es el adecuado para decorar cerámica a mano, la realiza el técnico de la empresa Cerámicas Renacer.

4.4. DISEÑO DE EXPERIMENTOS PARA MEZCLAS DE COMPONENTES

Según Gutiérrez & De la Vara (2008), entre los objetivos de un diseño de experimentos con mezclas está determinar, primero, cuáles ingredientes de la mezcla tienen más influencia sobre una o varias respuestas de interés, y segundo, modelar las respuestas de interés en función del porcentaje de los compuestos de la mezcla.

En general, el objetivo del diseño de experimentos con mezclas es cuantificar la influencia que tienen los diferentes componentes sobre la respuesta, tanto en forma individual como en su acción conjunta con otros componentes. Se trata de modelar esta respuesta para predecirla en cualquier formulación posible, y utilizar los modelos con el propósito de encontrar la composición de la mezcla que proporcione mejores resultados (optimizar) (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

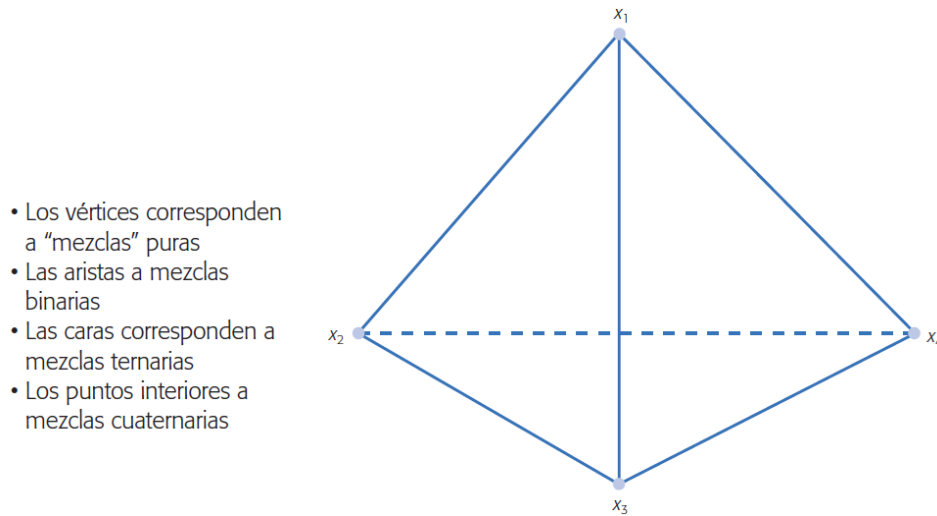


Figura 2. Región experimental de un diseño de mezclas con cuatro componentes.

Fuente: Gutiérrez & De la Vara, 2008.

Según Montgomery (2004), en los diseños de experimentos de mezclas se usan básicamente dos tipos de diseños, el diseño simplex reticular y el modelo simplex con centroide. Una vez obtenidos los resultados experimentales de un diseño de mezcla es necesario ajustar un modelo estadístico para investigar el efecto de los componentes sobre la respuesta (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

Las características de las piezas terminadas en una cerámica están condicionadas básicamente por el porcentaje de cada uno de los tres componentes principales, caolines y/o arcillas, feldespato y cuarzo. En cuanto a las arcillas y caolines, estas pueden ser plásticas y no plásticas. Por lo tanto, ahora, las piezas terminadas, estarán influenciadas por cuatro variables, caolines y/o arcillas plásticas, caolines y/o arcillas no plásticas, feldespato y cuarzo.

Las variables de respuesta son cada uno de los resultados de la caracterización de mezclas para formar pasta cerámica. Estas variables de respuesta son los resultados de la prueba de absorción, contracción al secado, contracción a la quema, pérdidas por ignición,

plasticidad y color a la quema. De las anteriores pruebas, el resultado de la prueba de absorción es la que más influye, para que las piezas cerámicas sean de buena calidad y resistencia mecánica.

Se puede hacer un modelo de primer orden o un modelo cuadrático (segundo orden), utilizando mezclas preliminares de las cuatro variables independientes (caolines y/o arcillas plásticas, caolines y/o arcillas no plásticas, feldespatos y cuarzo) y predecir el comportamiento del resultado de la prueba de absorción.

Teniendo mezclas preliminares que pueden ser dadas por el diseño simplex reticular o por el modelo simplex de centroide, se puede hacer estimados de la prueba de absorción, a través de métodos estadísticos, como el modelo de primer orden o cuadrático, que ayuden a simular esta prueba en función de los caolines y/o arcillas, el feldespatos y el cuarzo. Para la escogencia de cuál modelo es más conveniente, se pueden utilizar el valor-p (p-value) o el criterio de los coeficientes de determinación (R^2). “El valor-p (o p-value) prueba si el modelo es significativo o aporta elementos en la explicación de la respuesta al compararlo con el modelo anterior de más bajo orden. De manera adicional, para la selección del modelo se tiene el criterio de los coeficientes (R^2 y R^2 (ajus)), los cuales muestran el porcentaje de la variación en y_1 que es explicada por el correspondiente modelo” (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

5. DISEÑO METODOLÓGICO

5.1. CARACTERIZACIÓN DE CAOLINES Y ARCILLAS

A los caolines y arcillas que llegaron directamente de la mina o contaminados se les realizó un beneficio. Primero se trituraron en seco, se adicionó agua y luego esta mezcla se pasó por un tamiz malla 100. El pasante se dejó secar hasta que la pasta formada tuviera la plasticidad adecuada, en otras palabras, que se pudiera manipular y moldear por parte de las personas encargadas de este proceso. A estos caolines y arcillas se les hizo las respectivas pruebas: prueba de plasticidad, prueba de absorción, prueba de contracción al secado, prueba de contracción a la quema, prueba de pérdidas por ignición, y la prueba de determinación de color a la quema.

5.2. PREPARACIÓN DE LA PASTA. MEZCLAS DE CAOLINES, ARCILLAS, FELDESPATOS Y CUARZOS

En la formulación de la pasta tipo porcelana se necesitaron básicamente cuatro componentes (variables independientes): caolín o arcilla plástica, caolín o arcilla no plástica, feldespato y cuarzo. Se realizaron diferentes ensayos de acuerdo a los resultados de las pruebas realizadas en la caracterización de caolines y arcillas con diferentes porcentajes de estas sustancias. Las variables independientes se mezclaron de diferentes formas como se muestra en la Figura 3.

Las variables de respuesta o dependientes son la plasticidad, la absorción de agua, la contracción al secado, la contracción a la quema, las pérdidas por ignición y el color después

de quema. De las anteriores variables, la que se ajustó estadísticamente y por la importancia de su valor, fue el porcentaje de la prueba de absorción.

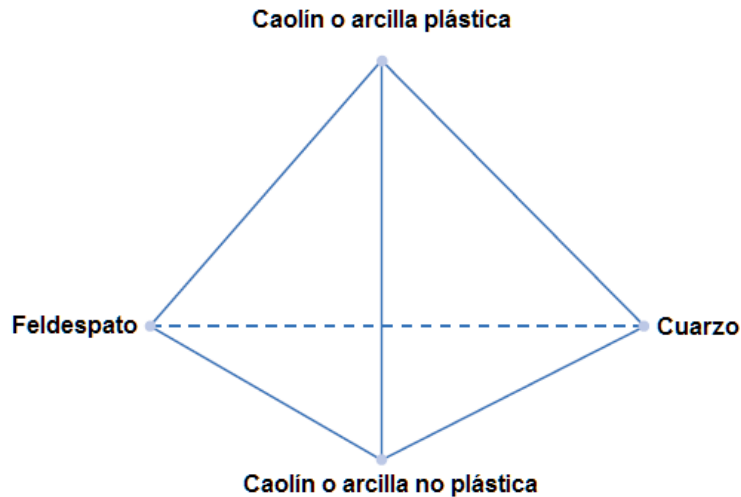


Figura 3. Región experimental de un diseño de mezclas de cuatro componentes: caolín y/o arcilla plástica, caolín y/o arcilla no plástica, feldespato y cuarzo.
Fuente: Gutiérrez & De la Vara, 2008.

5.3. CARACTERIZACIÓN DE LAS PRUEBAS DE CAOLINES-ARCILLAS Y MEZCLAS DE CAOLINES, ARCILLAS, FELDESPATOS Y CUARZOS

Se mezclaron en seco los caolines (plásticos y no plásticos), las arcillas, el feldespato y el cuarzo teniendo en cuenta la información obtenida de la caracterización de las materias primas. Se agregó agua y se hizo una correcta mezcla con ayuda de un agitador (ver Figura 4). Se dejaron secar las muestras hasta que se pudieran manipular y se armaron en un aro metálico para realizar las pruebas antes mencionadas.



Figura 4. Preparación de las mezclas de arcillas, caolines, feldespato, cuarzo y otros aditivos. Los diferentes componentes se mezclan con agua y se disuelven con la ayuda de un agitador (batidora).

Prueba de absorción: Se utilizaron las muestras provenientes de la quema. Se anotó la masa de la muestra después de efectuada la quema, se colocaron las muestras en un recipiente con agua y se llevó a ebullición, 100 °C, durante dos horas, cuidando que las muestras siempre estuvieran sumergidas en agua, como se muestra en la Figura 5. Se retiró el recipiente de la fuente de calor y se dejaron las muestras sumergidas en agua y en reposo por 24 horas. Pasado este tiempo se retiraron las muestras y con una tela un poco húmeda se eliminó el exceso de agua en la muestra. Se registró la masa de la muestra después de este proceso.



Figura 5. Ilustración prueba de absorción. Las muestras se llevan a ebullición en agua durante un período de 2 horas.

Prueba de contracción al secado: Se registró el perímetro de las muestras antes del secado. Luego se dejaron secar las muestras por dos días y nuevamente se registró el perímetro de las muestras en seco.



Figura 6. Ilustración de muestras prueba de contracción al secado. Las muestras se arman con la ayuda de un aro metálico de perímetro fijo. Las muestras se secan, y así poder registrar el perímetro antes y después del secado.

Prueba de contracción a la quema: Se registró el perímetro de las muestras después del secado. Se llevaron las muestras al horno donde estuvieron en el proceso de la cocción a una temperatura de 1200 °C. Se sacaron las muestras, se dejaron enfriar y nuevamente se registró el perímetro de las muestras después de la quema en el horno.



Figura 7. Ilustración de prueba de contracción a la quema. Se registra el perímetro de las muestras antes y después de la cocción en el horno.

Prueba de pérdidas por ignición: Se registró la masa de las muestras después del secado. Estas muestras, se llevaron al proceso de cocción en el horno a una temperatura de 1200 °C. Luego de efectuada la quema, se registró nuevamente la masa de cada una de las muestras.



Figura 8. Ilustración de prueba de pérdidas por ignición. Se registra la masa de las muestras antes y después de la cocción en el horno.

Prueba de determinación de color a la quema: Para esta prueba se tomó cada una de las muestras que sale de la quema del horno. Se realizó una inspección visual para poder identificar el color que ha tomado la muestra después de la quema. Esta inspección visual es valorada por el técnico de Cerámicas Renacer y determinó si es adecuada o si es necesario mejorar el color.

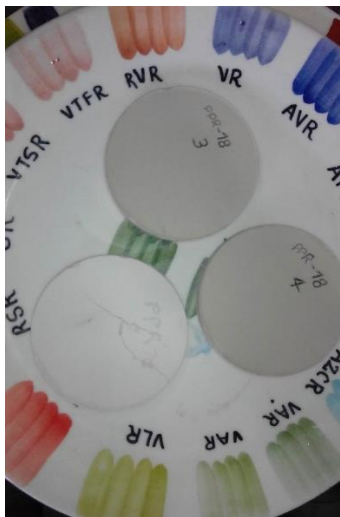


Figura 9. Ilustración de prueba de determinación de color a la quema. Se hace una inspección visual al color de la muestra luego de la cocción.

Prueba de plasticidad de caolines, arcillas y pastas formuladas: Se obtuvieron muestras de pasta amasada, se formaron rollos y se doblaron en arco con la ayuda de los dedos de las manos. Si al doblarla, el rollo se agrietaba demasiado, era síntoma de que la arcilla es poco plástica.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

6.1. CARACTERIZACIÓN DE CAOLINES Y ARCILLAS

Se encontraron seis fuentes de materias primas para la fabricación de pasta porcelana. Caolín blanco Oiba, Caolín gris Oiba, Arcilla Arcabuco, Caolín Unión, Caolín JM y Arcilla Amalia. El Caolín blanco Oiba y el Caolín gris Oiba son caolines procedentes del municipio de Oiba, Santander. El nombre de la empresa de contacto y suministro de las cantidades para los ensayos es Caolines de Oiba. Los dos caolines vienen listos para ser mezclados con los demás componentes de la pasta. El Caolín blanco Oiba es un caolín que desarrolla un color en quema gris, bastante alejado de lo que quiere la empresa Cerámicas Renacer. Es un caolín con una muy buena plasticidad, en colado se forman muy bien las piezas, y en torneado se deja trabajar muy fácilmente. El Caolín gris Oiba tiene unas características muy parecidas al Caolín blanco Oiba, buena plasticidad, se forman muy bien las piezas en colado. El color que desarrolla luego de la cocción es gris, con más tonalidad, que el que desarrolla el Caolín blanco Oiba. La Arcilla Arcabuco es una materia prima procedente del suroeste del municipio de Arcabuco, en el departamento de Boyacá. La arcilla viene contaminada con otros componentes de diferente granulometría. La arcilla se debe preparar disolviéndola en agua con la cantidad adecuada, pasar por un tamiz malla 100 y dejar secar para moldear en torno. Es una arcilla que desarrolla un color en quema gris, con una leve tendencia al color rojo. Es un tono de color de quema no adecuado para la fabricación de piezas en la empresa Cerámicas Renacer. Es una arcilla con una muy buena plasticidad.

El Caolín Unión es una materia prima procedente del municipio de La Unión, Antioquia. La empresa proveedora del caolín es Colombiana de Caolines S.A. El caolín tiene aproximadamente un 20 % de humedad y el tamaño de partícula es el apropiado para la preparación de una cerámica. Desarrolla un color blanco ante la quema a 1200 °C. Es un buen color para la fabricación de una cerámica para decorar a mano. Es un caolín no plástico, no se deja trabajar en el torno y tampoco en colado. El Caolín JM es un caolín suministrado por la empresa Sumicol S.A. El caolín tiene un color uniforme crema en crudo y el porcentaje de humedad es del 0,50 %. El tamaño de la partícula es el adecuado para mezcla de componentes para desarrollar pasta para cerámica. En quema, desarrolla un color crema. Buen color para desarrollar piezas de cerámica para decorar a mano. Es un caolín poco plástico, no se deja manipular fácilmente en el torno y por colado.

La Arcilla Amalia es una arcilla procedente de la zona de Llanogrande del municipio de Rionegro, Antioquia. Es una arcilla que viene con diferente tamaño en la granulometría. La arcilla se debe preparar disolviéndola en agua con la cantidad adecuada, pasar por un tamiz malla 100 y dejar secar si es para moldear en torno. Es una arcilla que desarrolla un color en quema crema claro. Es un tono de color de quema adecuado para la fabricación de piezas en la empresa Cerámicas Renacer. Es una arcilla de poca plasticidad. Se debe mezclar esta arcilla con otros componentes para mejorar la plasticidad en el momento de formar las piezas.

Los resultados de las diferentes pruebas de la caracterización de caolines y arcillas se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5*Caracterización de caolines y/o arcillas plásticas y no plásticas*

Caolín o arcilla		Prueba	Porcentaje de contracción al secado (Cs)	Porcentaje de contracción a la quema (Cq)	Porcentaje de pérdidas por ignición (I)	Porcentaje de absorción (A)
Caolines y/o arcillas plásticas	Caolín blanco Oiba		5.6	11.4	7.8	2.6
	Caolín gris Oiba		7.7	9.2	8.5	1.4
	Arcilla Arcabuco		4.8	7.2	8.7	5.4
Caolines y/o arcillas no plásticas	Caolín Unión		6.7	7.4	16.8	25.1
	Caolín JM		3.4	3.8	12.4	35.6
	Arcilla Amalia		4.6	10.6	22.8	17.1

A continuación, se presenta un análisis de los resultados mostrados en la Tabla 5. El Caolín JM desarrolla un color crema en la quema. Es un color apto para la fabricación de una cerámica y decorarla a mano. Es un caolín que no tiene mucha deformación, 3.8 % de porcentaje de contracción a la quema. Es un poco liviano. Lo liviano de este caolín se debe a unas pérdidas por ignición altas, 12.4 %. El porcentaje de absorción es elevado, 35.6%, por lo cual no tiene una buena resistencia mecánica. Este caolín debe mezclarse con otra arcilla u otro caolín para disminuir el porcentaje de adsorción. El Caolín JM no es plástico. Debe ir acompañado con una arcilla u otro caolín plástico.

La Arcilla Amalia, al igual que el Caolín JM, desarrolla un color crema luego de la cocción. Es más pesada que el Caolín JM. Las piezas presentan una leve deformación luego de la cocción, 10.6%, de porcentaje de contracción a la quema. Es una arcilla que presenta una elevada pérdida de masa al momento de cocción en el horno, 22.8 %, de porcentaje de pérdidas por ignición. Su porcentaje de absorción es del 17.1 %, un valor muy alto, si lo que se busca es una cerámica de buena resistencia mecánica. Esta arcilla, a pesar de tener un buen color en la quema, debe mezclarse con otro caolín o arcilla, con el objetivo de disminuir el porcentaje de absorción y el porcentaje de pérdidas por ignición. La Arcilla Amalia es poco plástica, debe ir acompañada con otras sustancias plásticas que ayuden a mejorar esta propiedad.

El Caolín gris Oiba desarrolla un color gris oscuro luego de la cocción. Tiene buen peso por unidad de volumen. Se deforman un poco las piezas con este caolín, 9.2 % de porcentaje de contracción a la quema. Es un caolín con una buena resistencia mecánica, 1.4 % de porcentaje de absorción, con lo que podría ser el material mayoritario en una pieza cerámica porcelana. Es un caolín con muy buena plasticidad. El Caolín blanco Oiba, también quema gris, pero de una tonalidad menor al Caolín gris Oiba. Posee un buen peso por unidad de volumen. Es un caolín que también presenta una buena resistencia mecánica al tener un porcentaje de absorción bajo, 2.6%. Al igual que el Caolín gris Oiba, debe ir en un alto porcentaje en las mezclas de pasta por tener un bajo porcentaje de absorción. Presenta unas pérdidas por ignición normales para el promedio, 7.8 %. Al igual que el Caolín gris Oiba, presenta una muy buena plasticidad.

El Caolín Unión quema blanco, tiene poca deformación, pero es el más liviano de todas las arcillas y caolines. El Caolín Unión presenta un porcentaje de absorción elevado, 25.1%, lo cual indica una mala resistencia mecánica. A pesar de presentar un buen color en la quema, este caolín debe mezclarse con otro caolín o arcilla que ayuden a mejorar y bajar este porcentaje de absorción. El Caolín Unión presenta una mala plasticidad, por lo que no deja formar las piezas en colado y en el torno. Debe mezclarse con otras sustancias que le ayuden a mejorar su plasticidad.

La Arcilla Arcabuco desarrolla un color luego de la cocción gris, con una tendencia al rojizo. No hay deformación y tiene un buen peso por volumen. Es una arcilla con un buen porcentaje de absorción, 5.4 %. Agregándole un poco de material fundente puede mejorar esta absorción y poder formar piezas cerámicas de buena calidad. El porcentaje de pérdidas por ignición, 8.7 %, y el porcentaje de contracción a la quema, 7.2 %, están dentro del promedio de valores permitidos. La Arcilla Arcabuco posee muy buena plasticidad.

6.2. CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS DE CAOLINES-ARCILLAS Y MEZCLAS DE CAOLINES, ARCILLAS, FELDESPATOS, CUARZOS

Con base en la caracterización realizada en la sección anterior, se proponen las mezclas 1 y 2 mostradas en la Tabla 6. Las fracciones utilizadas para la mezcla 1 y mezcla 2 fueron establecidas de acuerdo a lo expuesto en el estado del arte; la mayoría de autores expresan que para formular una pasta cerámica deben incluirse cuatro componentes principales, caolín y/o arcilla, feldespato y cuarzo. Las fracciones utilizadas de cada uno de

estos componentes, fueron establecidas buscando que estuvieran dentro de los puntos interiores más profundo de un tetraedro (representación simbólica para mezclas de cuatro componentes), como se muestra en la Figura 2. Los resultados de las pruebas se encuentran consignados en la Tabla 7. A continuación se realiza un análisis de los mismos.

Tabla 6
Formulación de mezclas para pastas

Caolín u arcilla		Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5	Mezcla 6
Mezcla							
Caolines y/o arcillas no plásticos	% Arcilla Amalia	20	15	15	0	0	12
	% Caolín Unión	0	0	0	25	0	0
	% Caolín JM	5	10	8.5	0	31	19
Caolines y/o arcillas plásticos	% Arcilla Arcabuco	10	10	10	0	0	0
	% Caolín blanco Oiba	15	15	15	50	40	40
	% Caolín gris Oiba	0	0	0	0	4	4
Cuarzo	% Cuarzo	30	25	20	0	0	0
Fundente	% Feldespato	20	25	27	0	0	0
	% Sienita	0	0	0	21.25	21.25	21.25
	% Dolomita	0	0	4.5	3.75	3.75	3.75

Tabla 7*Caracterización de mezclas de caolines, arcillas, feldespatos y cuarzos.*

Mezcla Prueba	Porcentaje de contracción al secado (Cs)	Porcentaje de contracción a la quema (Cq)	Porcentaje de pérdidas por ignición (I)	Porcentaje de absorción (A)
Mezcla 1	2.6	7.1	7.4	9.1
Mezcla 2	2.4	7.4	6.9	8.6
Mezcla 3	1.5	9.2	8.7	1.8
Mezcla 4	2.7	9.9	11.9	0.2
Mezcla 5	2.5	11.6	10.4	3.5
Mezcla 6	3.2	11.6	9.1	1.9

La mezcla 1 es una pasta cerámica compuesta por 25% de caolines no plásticos, 25% de arcillas plásticas, 30% de cuarzo y 20% de fundente feldespato. Es una pasta cerámica con dificultades en su plasticidad y de formación de piezas por colado. El color que desarrolla en quema es gris, color no apto para lo que quiere la empresa Cerámicas Renacer. Esto sugiere un cambio en los porcentajes de arcillas que le aumenten el color blanco a la pasta en la quema del horno. El porcentaje de absorción, 9.1%, es alto y no se puede utilizar esta mezcla para una pasta tipo porcelana. Para disminuir este porcentaje, el porcentaje de fundente feldespato debe aumentar. Los demás resultados, como el porcentaje de contracción al

secado, 2.6 %, porcentaje de contracción a la quema, 7.1 % y porcentaje de pérdidas por ignición, están dentro del rango que se puede utilizar para una pieza cerámica.

La mezcla 2 es una pasta compuesta por 25% de arcillas plásticas, 25% arcillas no plásticas, 25% de cuarzo y 25% de fundente feldespató. El Caolín JM con relación al porcentaje en la mezcla 1, pasó del 5% al 10%. El fundente feldespató se igualó al porcentaje de cuarzo en la pasta, 25%. La prueba de absorción mostró un resultado de 8.6%, sin embargo, es una pasta que necesita mejorar su plasticidad. Para esto se debe aumentar el porcentaje de caolines y/o arcillas plásticas. El color de la pasta después de la quema sigue siendo gris. Los porcentajes de contracción al secado, 2.4 %, porcentaje de contracción a la quema, 7.4 %, y porcentaje de pérdidas por ignición, son muy parecidos a los de la mezcla 1 y están dentro de los rangos que se pueden tener en cuenta para una cerámica.

De acuerdo a los resultados de la Tabla 5, los caolines y/o arcillas no plásticas, como el Caolín JM, el Caolín Unión y la Arcilla Amalia, presentan valores muy altos en la prueba de absorción. Por consiguiente, la mezcla de estos componentes no plásticos, aportan al aumento del valor de la prueba de absorción en una eventual mezcla. Hay que tener presente que la fracción de caolines y/o arcillas no plásticas no puede ser muy bajo, porque estos componentes son los que le aportan el color blanco, también esperado luego de la cocción, en una pieza cerámica para ser decorada a mano.

Teniendo en cuenta los resultados de la caracterización de caolines y arcillas, de la mezcla 1 y mezcla 2, se proponen la formulación de las mezclas 3, 4, 5 y 6 teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Cambiar el material fundente feldespatos utilizados en las mezclas 1 y 2, por la combinación de dos materias primas, dolomita y sienita (en porcentajes 85 % y 15 % respectivamente), esto, por conocimiento previo en la empresa.
- Aumentar el porcentaje de caolines y/o arcillas plásticas para aumentar la plasticidad de la pasta.
- Quitar el porcentaje de cuarzo. La caracterización de caolines y arcillas mostró que los porcentajes de contracción a la quema de los caolines y/o arcillas plásticas no son muy altos; 11.4 % para el Caolín blanco Oiba, 9.2 % para el Caolín gris Oiba y 7.2 % para la Arcilla Arcabuco. Se pueden hacer mezclas con un porcentaje de cuarzo de 0% y aumentar el porcentaje de estos caolines y/o arcillas plásticas, y que el porcentaje de contracción a la quema no supere los límites permitidos.
- El color deseado en las piezas terminadas lo aporta los caolines y/o arcillas no plásticas. Las mezclas deben tener un buen porcentaje de estas materias primas, Caolín Unión, Caolín JM y Arcilla Amalia. Hay que tener en cuenta que estas materias primas no aportan plasticidad y aportan mucho para el porcentaje de absorción.

El porcentaje de las materias primas y los resultados de la caracterización de cada una de las pruebas en las mezclas 3, 4, 5 y 6, se muestran en la Tabla 6 y Tabla 7.

La mezcla 3 es una pasta compuesta por 23.5 % de caolines y/o arcillas no plásticas, 25 % de caolines y/o arcillas plásticas, 20 % de cuarzo y 31.5 % de material fundente. La mezcla 3 es una pasta a la cual se le disminuyó el porcentaje de cuarzo, se le aumentó el porcentaje de fundente feldespatos y se le agregó otra sustancia denominada dolomita, que

hace aumentar la cohesión de las fases presentes en la pieza y poder bajar el valor en la prueba de absorción. Los resultados muestran que efectivamente la prueba de absorción, 1.8 %, fue más baja con relación a la mezcla 1 y mezcla 2. Es un resultado que se va acercando a lo que se quiere de porcentaje de prueba de absorción, entre el 0 y el 1 %. La plasticidad de la pasta no es la óptima, por lo que se debe aumentar el porcentaje de caolines y/o arcillas plásticas.

La pasta cerámica mezcla 4 está conformada por 25% de caolín no plástico, 50 % de caolín plástico y 25 % de material fundente, distribuido en 21,25% de sienita con 3,75% de dolomita. El porcentaje de cuarzo es cero. Para mejorar completamente la plasticidad de las mezclas anteriores, se aumentó considerablemente el porcentaje de caolín plástico, Caolín blanco Oiba, pasando del 15 % al 50 % en la mezcla 4. Se determinó también, quitar el porcentaje de cuarzo en esta mezcla. Los resultados muestran un porcentaje de absorción del 0.2 %, un muy buen resultado para una cerámica porcelana que tenga buena durabilidad en el tiempo. El porcentaje de contracción al secado, 2.7 %, es un resultado aceptable para una la elaboración de una cerámica. El porcentaje de pérdidas por ignición, 11.9 %, y el porcentaje de contracción a la quema, 9.9 %, se aumentaron un poco con relación a las anteriores mezclas, debido a la no inclusión del componente cuarzo, pero son resultados que se pueden manejar dentro del rango permitido para estas dos pruebas. El color en quema sigue siendo gris; esta mezcla cumple con todos los requerimientos para una cerámica tipo porcelana a excepción del color que se requiere en la empresa Cerámicas Renacer para poder decorar a mano.

La mezcla 5 de pasta cerámica, está conformada por 31% de Caolín JM, 44 % de caolines plásticos, distribuidos en 40% de Caolín blanco Oiba y 4% de Caolín gris Oiba,

material fundente del 25 %, distribuido en 21,25% de Sienita con 3,75% de Dolomita. El porcentaje de absorción en la mezcla 5 es del 3.5 %, porcentaje alto para una pasta tipo porcelana. Podría utilizarse como una pasta tipo loza. El porcentaje de absorción aumentó debido a que el porcentaje del Caolín JM fue mayor, 31 %; este caolín se aumentó para mejorar el color en quema. El color de esta mezcla en quema mejoró satisfactoriamente, al ser menos gris; pero aún sigue siendo un color no apto para la presentación de piezas terminadas. El porcentaje de contracción a la quema es un poco alto, 11.6 %, por lo que, si se utiliza esta mezcla para la fabricación de cerámica, se debe tener mucho cuidado con la posible deformación de las piezas. Es una pasta cerámica que posee una buena plasticidad.

La mezcla 6 está conformada por 31 % de caolines y/o arcillas no plásticas, 44 % de caolín plástico y 25 % de material fundente, distribuido en 21,25% de sienita y 3,75% de dolomita. A la mezcla 6 se le agregó un pequeño porcentaje de Arcilla Amalia, con el objetivo de mejorar el color de la muestra luego de la cocción. El resultado muestra un 1.9% en el porcentaje de absorción, un valor muy bueno, pero no el adecuado para lo que necesita la empresa Cerámicas Renacer. Podría utilizarse esta mezcla para la fabricación de cerámica tipo loza. El color de la mezcla después de la quema es un gris claro, de menos tonalidad que el color de la mezcla 4, color no adecuado para lo que quiere la empresa Cerámicas Renacer. El porcentaje de contracción a la quema, 11.6 %, es alto, se tendría que tener mucho cuidado en cuanto a la posibilidad de deformación de las piezas si en algún momento se toma esta mezcla como materia prima para la fabricación de cerámica. El porcentaje de contracción al secado, 3.2 %, y el porcentaje de pérdidas por ignición, 9.1 %, están dentro de los valores permitidos.

6.3. MODELADO DE LAS RESPUESTAS DE INTERÉS

Con base en los datos experimentales obtenidos en la caracterización de caolines y arcillas, y las seis mezclas ya trabajadas, ver Tabla 21, se proponen dos modelos matemáticos, lineal y cuadrático, que relacionan las cuatro fracciones principales en la formulación de una pasta, X_1 fracción de caolines y/o arcillas plásticos, X_2 fracción de caolines y/o arcillas no plásticos, X_3 fracción de feldespato y X_4 fracción de cuarzo, y las variables de respuesta, porcentaje de absorción, A , porcentaje de pérdidas por ignición, I , porcentaje de contracción a la quema, Cq . Los parámetros de los modelos fueron identificados usando el método de mínimos cuadrados. Los modelos obtenidos y el coeficiente de determinación (R^2) se encuentran consignados en la Tabla 8.

Respecto al modelo lineal identificado para el porcentaje de absorción, A_{1orden} , el coeficiente de determinación (R^2) es 0.8608, lo que significa que el 86.08 % de los valores en la prueba de absorción son explicados mediante el modelo lineal. De esta ecuación se puede discutir varios aspectos. El coeficiente de la variable X_3 , fracción de feldespato, es negativo, debido a que el componente feldespato no hace aumentar el porcentaje de absorción; el feldespato es el componente que hace unir los caolines y/o arcillas con el cuarzo, por consiguiente, entre más feldespato tenga una mezcla, el valor en el porcentaje de absorción debe ser menor. El coeficiente que más aporta al aumento del porcentaje de absorción es el de la variable de caolines y/o arcillas no plásticas, X_2 . El coeficiente de la variable X_1 , caolines y/o arcillas plásticos, es el más pequeño de los tres coeficientes positivos. Esto sugiere que esta fracción se debe utilizar en mayor cantidad para mezclas posteriores, y más aún, si la mezcla 1 y la mezcla 2, fueron mezclas poco plásticas.

Tabla 8

Modelo lineal y cuadrático de las respuestas de interés en función de los componentes de mezcla

Prueba	Ecuación	R²
Porcentaje de Absorción (A)	$A_{1orden} = 3.17X_1 + 25.98X_2 - 29.06X_3 + 27.24X_4$	0.8608
	$A_{2orden} = 3.10X_1 + 25.90X_2 - 215.0X_3 - 165.7X_4 + 107.8X_1X_2 + 175.1X_1X_3 - 83.30X_1X_4 + 168.6X_2X_3 + 420.9X_2X_4 + 755.2X_3X_4$	0.8655
Porcentaje de pérdidas por ignición (I)	$I_{1orden} = 8.34X_1 + 17.28X_2 + 6.86X_3 - 1.76X_4$	0.7384
	$I_{2orden} = 8.33X_1 + 17.33X_2 + 83.41X_3 + 69.85X_4 - 59.18X_1X_2 - 8.83X_1X_3 + 25.13X_1X_4 - 143.1X_2X_3 - 139.0X_2X_4 - 280.1X_3X_4$	0.7639
Porcentaje de contracción a la quema (Cq)	$Cq_{1orden} = 9.25X_1 + 7.30X_2 + 18.50X_3 - 3.60X_4$	0.4389
	$Cq_{2orden} = 9.25X_1 + 7.30X_2 + 18.50X_3 - 3.60X_4 - 113.7X_1X_2 + 0.368X_1X_3 + 370.9X_1X_4 + 207.9X_2X_3 - 160.6X_2X_4 - 312.2X_3X_4$	0.4802

En todos los casos y según los coeficientes de determinación (R^2) consignados en la Tabla 8, las ecuaciones de segundo orden son las que mejor se ajustan a los datos experimentales.

Usando los modelos cuadráticos identificados para las tres variables de respuesta A_{2orden} , I_{2orden} y Cq_{2orden} , se formuló un problema de optimización no lineal para determinar los porcentajes óptimos de los componentes de mezcla que minimicen el valor de

la prueba de absorción, teniendo en cuenta las pruebas de contracción a la quema y pérdidas por ignición. Este problema de optimización se presenta a continuación:

$$\min_{X_1, X_2, X_3, X_4} A_{2orden}(X_1, X_2, X_3, X_4), \quad (1)$$

$$s. a. \quad \sum_{i=1}^4 X_i = 1, \quad (2)$$

$$I_{2orden}(X_1, X_2, X_3, X_4) \leq 10\%, \quad (3)$$

$$Cq_{2orden}(X_1, X_2, X_3, X_4) \leq 10\%, \quad (4)$$

$$X_2 \geq 0.25, \quad (5)$$

$$X_1 \geq 0.40, \quad (6)$$

donde la Eq. (1) es la función a minimizar descrita en la Tabla 8 para el porcentaje de absorción con modelo cuadrático; la Eq. (2) es la sumatoria de las fracciones que debe ser igual a uno; la Eq. (3) es el porcentaje de pérdidas por ignición con modelo estadístico cuadrático y que en lo posible no debe pasar del 10%; la Eq. (4) es el porcentaje de contracción a la quema con modelo estadístico cuadrático y que en lo posible no debe sobrepasar el 10%; la Eq. (5) es la fracción de caolines y/o arcillas no plásticos que debe ser mayor al 25% para garantizar una blancura adecuada después de la cocción y la Eq. (6), es la fracción de caolines y/o arcillas plásticos, que debe ser mayor al 40% para garantizar una buena plasticidad en la pasta.

Usando el método del gradiente reducido generalizado para problemas no lineales, los valores de las fracciones X_1, X_2, X_3 y X_4 que minimizan el porcentaje de absorción son 0.4696, 0.2893, 0.2409 y 0, respectivamente.

7. CONCLUSIONES

7.1. CONSECUCIÓN DE OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Los objetivos específicos propuestos fueron los siguientes:

- Identificar las posibles fuentes de materias primas.
- Ejecutar las diferentes pruebas características para caolines y arcillas identificadas.
- Planificar la experimentación adecuada para la optimización de la pasta.
- Ejecutar las diferentes pruebas características de mezclas de componentes de pasta.
- Modelar las diferentes pruebas en función de las proporciones de los componentes de pasta.

Se hizo una búsqueda bibliográfica de las posibles fuentes de arcillas y en especial de caolines que fueran de fácil consecución, económicas y de buena calidad. Las materias primas identificadas fueron las siguientes: Caolín Unión que se encuentra en el municipio de La Unión-Antioquia; Caolín JM, proporcionado por la empresa Sumicol S.A; Caolín gris Oiba y Caolín blanco Oiba, procedentes del municipio de Oiba-Santander; Arcilla Arcabuco, procedente del municipio Arcabuco-Boyacá; y Arcilla Amalia, procedente de la zona de Llano Grande del municipio de Rionegro-Antioquia. Con estas seis fuentes de caolines y arcillas se dio cumplimiento al primer objetivo específico, el cual era identificar las posibles fuentes de materias primas, y de paso, fue la antesala para el cumplimiento del segundo objetivo específico, la caracterización de los caolines y arcillas encontrados.

Se realizó la caracterización de cada uno de las seis fuentes de caolines y arcillas encontradas. Con esta caracterización se obtuvo un estimado de cómo iban a ser los porcentajes de cada uno de los componentes de mezcla, en la formulación de pasta para cerámica tipo porcelana. La Arcilla Amalia, el Caolín JM y el Caolín Unión adquieren un color adecuado para la decoración a mano luego de la cocción a temperatura de 1200 °C; son materias primas no plásticas. El Caolín blanco Oiba y el Caolín gris Oiba, adquieren un color gris luego de la cocción a 1200 °C; la Arcilla Arcabuco, desarrolla un color gris con una leve tendencia al color rojo luego de la cocción a 1200 °C. Estos dos caolines, Caolín blanco Oiba y Caolín gris Oiba, junto con la Arcilla Arcabuco, son componentes que le dan mucha plasticidad a la formulación de la mezcla.

De acuerdo a la caracterización realizada a cada uno de las arcillas y caolines encontrados para la formulación de una pasta cerámica, se estableció que, para la planificación de los experimentos, se debe mezclar estos seis caolines y arcillas, en proporciones tales que, las arcillas u caolines no plásticos que desarrollen un color en cocción gris, con arcillas u caolines plásticos que desarrollen un color en cocción blanco. Lo plástico y desarrollo de color gris, se puede apaciguar con lo no plástico y desarrollo de color blanco. Se debe buscar un punto intermedio con lo cual se pueda tener una buena plasticidad de pasta cerámica y un color adecuado blanco para el desarrollo de una pasta cerámica. Con los resultados previos de las mezclas 1 y 2 y junto con la caracterización previa de los caolines y arcillas se planificaron las mezclas que se analizaron en este trabajo. Los resultados aceptables en las pruebas de contracción de las mezclas 4, 5 y 6, corroboraron la decisión de no incluir la materia prima cuarzo. Para mejorar la plasticidad de las siguientes mezclas, se

optó por aumentar considerablemente el porcentaje de caolines y/o arcillas plásticas, los cuales, no presentaban un porcentaje de contracción a la quema elevado.

Se ejecutaron las diferentes pruebas de caracterización de mezclas de caolines, arcillas, feldespatos y cuarzos. La mezcla 4, es una buena pasta para la fabricación de cerámica, y más específicamente, cerámica para porcelana, al tener un porcentaje de absorción del 0.2 %. La mezcla 5 y la mezcla 6, son mezclas que se pueden ser utilizadas para la fabricación de cerámica tipo loza, al tener unos porcentajes bajos en la prueba de absorción, pero no los suficientes para ser utilizada en cerámica porcelana, 3.5 % para la mezcla 5 y 1.9 % para la mezcla 6.

Usando los datos experimentales, se propusieron dos modelos matemáticos para cada una de las diferentes pruebas en función de las proporciones de los componentes de pasta. Estas ecuaciones de primer y segundo orden servirán de insumo para futuras formulaciones y trabajos posteriores en la empresa Cerámicas Renacer. Según los coeficientes de determinación, R^2 , que son una medida de la capacidad de ajuste de una ecuación, en las pruebas de absorción, contracción a la quema y pérdidas por ignición, las ecuaciones de segundo grado son las que mejor explican el comportamiento con relación a los datos hallados experimentalmente. Se obtuvo una formulación óptima matemática, donde las fracciones fueron de 0.4696, para los caolines y/o arcillas plásticos, 0.2893, para los caolines y/o arcillas no plásticos, 0.2409, para el feldespato y 0 para el componente cuarzo.

7.2. CONSECUCIÓN DE OBJETIVO GENERAL

El objetivo general planteado para el proyecto fue el siguiente: “Formular de forma óptima una pasta tipo porcelana para la empresa Cerámicas Renacer de El Carmen de Viboral”. A través del desarrollo de cada uno de los puntos específicos, se fue ejecutando el objetivo general. Primero se consiguieron las materias primas, se caracterizaron estas materias primas y de acuerdo a esta caracterización, se empezaron a mezclar estos componentes encontrados, para luego llevar a cabo las diferentes pruebas para conseguir una pasta tipo porcelana. La mezcla 4, es una pasta tipo porcelana que cumple con una buena durabilidad en el tiempo. Sin embargo, a pesar de que en la mayoría de las pruebas se obtuvieron los resultados esperados, falta mejorar el color en quema. A esta mezcla 4, le hace falta reducirle la tonalidad del color gris claro que presenta, a una tonalidad menos gris y más blanca, luego de la cocción. Los compradores de piezas decoradas a mano les interesa por experiencia propia en la empresa, comprar cerámicas que sean lo más blancas posibles. La tradición Carmelitana es decorar sobre bizcocho blanco, por eso la cerámica del municipio es reconocida; aparte de esto, la cerámica blanca hace que los colores de la decoración se vean mejor y por ende las piezas tienen una mayor sensación de calidez.

Las mezclas 5 y 6, poseen un mejor color, pero los resultados en la prueba de absorción no son los satisfactorios para una cerámica porcelana que tenga una buena durabilidad. Las mezclas 5 y 6, pueden ser utilizadas como pasta cerámica tipo loza.

7.3. DIFICULTADES ENCONTRADAS EN EL DESARROLLO DEL PROYECTO

Los caolines y arcillas, debido a su composición química, toman colores diferentes al blanco, luego de la quema en el horno. Metales como el hierro y el titanio, le aportan diferentes colores a las piezas luego de la cocción. La empresa no cuenta con equipos de análisis instrumental adecuados que hubieran podido ayudar a identificar la composición aproximada de estos metales en cada una de las arcillas y caolines.

En un posible análisis químico para los caolines y/o arcillas, y con la posibilidad de encontrar porcentajes altos de metales, se debe de hacer una preparación previa de estas materias primas como una buena molienda, un buen tamizado y una posible separación magnética. Como la implementación de la fabricación de la pasta es un proceso a futuro, no se trabajó para el proyecto de grado la separación magnética y la molienda, conllevando a que posibles partículas de metales quedarán incrustadas en las piezas, y posiblemente, aportando al desarrollo del color gris claro de la mezcla 4.

Durante la realización de la caracterización de los caolines, arcillas y mezclas, se utilizó un horno, el cual venía presentando problemas de cocción. En algunas ocasiones, las muestras tenían un buen proceso de cocción, mientras que en otras ocasiones, la temperatura no alcanzaba a llegar a los 1200 °C, ocasionando errores en los valores de cada una de las pruebas.

BIBLIOGRAFÍA

Avgustinik, A. (1983). *Cerámica*. (2da. Ed.). Barcelona: Editorial Reverté, S.A. Recuperado de

https://books.google.com.co/books?id=LNCeOhT6ruEC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbg_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

Bernal, I., Cabezas, H., Espitia, C., Mojica, J. y Quintero, J. (2003). Análisis próximo de arcillas para cerámica. *Academia colombiana de ciencias exactas, física y naturales*, 27(105), 569-578. Recuperado de http://www.accefyn.org.co/revista/Vol_27/105/7-ANALISIS.pdf

Caballero, J. y Grossmann, I. (2007). Una revisión del estado del arte en optimización. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 4(1), 5-23. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1697791207701887>

Callister, W. (1995). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. (1ra. Ed.). Barcelona: Editorial Reverté, S.A. Recuperado de <https://books.google.com.co/books?id=gnfPV1txXiUC&pg=PA441&dq=cuarzo+feldespatato+arcilla&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwioiL3Pq7HKAhWlQIYKHSb0AboQ6AEIHZAB#v=onepage&q=cuarzo%20felsespatato%20arcilla&f=false>

Cerámicas Renacer (2014, 03 de diciembre). Reseña histórica de la empresa. Recuperada de <http://www.ceramicasrenacer.com/corporativo/resena-historica>

Dal Bó, M., Zimmer, A., Grando, S., Kaspari, P. y Hotza, D. (2016). Incremento de resistencia mecánica en materiales de gres porcelánico a partir de tratamiento químico de intercambio iónico. *Academia colombiana de ciencias exactas, física y naturales*, 55(2016), 197-201.

Estrada, D. y Espinosa de los Monteros, J. (1982). El secado de productos cerámicos. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 21(6), 327-337. Recuperado de <http://boletines.secv.es/upload/198221327.pdf>

Frades, J., Sánchez, E., Linares, A., Casanova, A. y Solís, N. (2016). Obtención de cerámica estructural por sinterización reactiva con materia prima nacional. *Revista Cubana de Química*, 28(1), 431-443. Recuperado de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-54212016000100007

Galán, E. y Aparicio, P. (2006). Materias primas para la industria cerámica. En: García del Cura, M y Cañaveras C. (Eds.). *Utilización de Rocas y Minerales Industriales. Seminarios de la Sociedad Española de Mineralogía*, 2, 31-48. Recuperada de http://www.ehu.es/sem/seminario_pdf/SEMINARIO_SEM_2_031.pdf

Ginés, F., Feliu, C., García-Ten, J. y Sanz, V. (1997). Análisis de los métodos tradicionales utilizados para evaluar la plasticidad. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 36(1), 25-30. Recuperado de <http://boletines.secv.es/upload/199736025.pdf>

Gomez, S. (1991). Preparación y caracterización de arcillas pilareadas (Tesis de maestría inédita). Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa, México D.F, México. Recuperada de <http://148.206.53.84/tesiuami/UAM7979.pdf>

Gutiérrez, H. y De la Vara, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. (2da. Ed.). México: McGraw-Hill.

Inga, J. y Saetama, D. (2009). Formulación de pasta del tipo porcelana química para la producción de materiales de laboratorio, y otros usos en la industria (Tesis de grado inédita). Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador. Recuperada de <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:-62YtRUEauoJ:repositorio.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/3330/1/660X1109.pdf+&cd=1&hl=es&ct=clnk&gl=co>

Méndez, J. y Hernández, J. (2007). Optimización del proceso de molienda y secado por pulverización en la empresa Cerámica Italia S.A (Trabajo de grado inédito). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Recuperada de <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/6307/2/124230.pdf>

Midgley, B. (1982). *Guía completa de escultura, modelado y cerámica: técnicas y materiales.*

(1ra. Ed.). Madrid: Hermann Blume Ediciones. Recuperado de <https://books.google.com.co/books?id=ySfYxxdSeqwC&pg=PA37&dq=plasticidad+de+arcillas&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwj3dbXtpbKAhXIMyYKHXudAw8Q6AEIJDAC#v=onepage&q=plasticidad%20&f=false>

Montgomery, D. (2004). *Diseño y análisis de experimentos.* (2da. Ed.). México, D.F: Limusa Wiley.

Morales, J. (2005). *Tecnología de los materiales cerámicos.* Madrid: Ediciones Díaz de

Santos. Recuperado de <https://books.google.com.co/books?id=4H6OXgN1w6wC&printsec=frontcover&dq=tecnologia+de+los+materiales+ceramicos&hl=es&sa=X&ved=0CBsQ6AEwAGoVChMI6ODp1d7-yAIVCPAmCh3mqApN#v=onepage&q=preparacion%20de%20la%20pasta&f=false>

Ramirez, J. (2010). *Diseño de conceptos para la diversificación de productos en el sector cerámico del municipio de El Carmen de Viboral, Antioquia.* (Trabajo de grado inédito).

Universidad Eafit, Medellín, Colombia.

Ramírez, Y. (2012). *Determinación de las fases presentes en pisos y revestimientos cerámicos a base de arcilla cocidos a diferentes temperaturas y su influencia en las propiedades técnicas* (Tesis de maestría inédita). Universidad Nacional de Colombia,

- Bogotá, Colombia. Recuperada de <http://www.bdigital.unal.edu.co/8707/1/300088.2012.pdf>
- Ríos, C. (2009). Uso de materias primas colombianas para el desarrollo de baldosas cerámicas con alto grado de gresificación (Tesis de maestría inédita). Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. Recuperada de <http://www.bdigital.unal.edu.co/1905/1/98658721.2010.pdf>
- Robledo, G. (2007). La cerámica del Carmen de Viboral: un tesoro sin descubrir. Instituto de estudios regionales, Medellín, Universidad de Antioquia.
- Santos, J., Malagón, P. y Córdoba, E. (2009). Caracterización de arcillas y preparación de pastas cerámicas para la fabricación de tejas y ladrillos en la región de Barichara, Santander. *Dyna*, 78(167), 50-58. Recuperada de <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25762/26189>
- Tobón, A. Retos y perspectivas del sector minero en Antioquia. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. Recuperada de <http://economix.fr/docs/57/Retos%20y%20perspectivas%20del%20sector%20minero%20en%20Antioquia.pdf>
- Trujillo, A. (2012). Patrimonio industrial de la cerámica en el Carmen de Viboral: proceso de quema de loza en los hornos tipo colmena (Informe final de trabajo de investigación).

Universidad de San Buenaventura, Bello, Colombia. Recuperada de http://bibliotecadigital.usbcali.edu.co/bitstream/10819/912/1/Patrimonio_Industrial_Ceramica_Trujillo_2012.pdf

ANEXOS

Anexo 1. Resultados más detallados y por muestra, caracterización de caolines y arcillas.

Tabla 9
Caracterización muestras Caolín blanco Oiba

CAOLÍN BLANCO OIBA	
PRUEBA DE CONTRACCIÓN AL SECADO	
Muestra I Longitud antes de secar= 24.8 cm Longitud después de secar= 23.5 cm $Cs = \frac{(Lis - Lfs)}{Lis} \times 100$ Porcentaje de contracción al secado= 5.2%	Muestra II Longitud antes de secar= 24.8 cm Longitud después de secar= 23.3 cm $Cs = \frac{(Lis - Lfs)}{Lis} \times 100$ Porcentaje de contracción al secado= 6.0%
PORCENTAJE DE CONTRACCIÓN AL SECADO= 5.6%	
PRUEBA DE CONTRACCIÓN A LA QUEMA	
Muestra I Longitud antes de quema= 23.5 cm Longitud después de quema= 20.8 cm $Cq = \frac{(Lic - Lfc)}{Lic} \times 100$ Porcentaje de contracción a la quema= 11.5%	Muestra II Longitud antes de quema= 23.3 cm Longitud después de quema= 20.7 cm $Cq = \frac{(Lic - Lfc)}{Lic} \times 100$ Porcentaje de contracción a la quema= 11.2%
PORCENTAJE DE CONTRACCIÓN A LA QUEMA= 11.4%	
PRUEBA DE PÉRDIDAS POR IGNICIÓN	
Muestra I Masa antes de quema= 39.7 g Masa después de quema= 36.6 g $I = \frac{(Mic - Mfc)}{Mic} \times 100$ Porcentaje de pérdidas por ignición= 7.8%	Muestra II Masa antes de quema= 37.6 g Masa después de quema= 34.7 g $I = \frac{(Mic - Mfc)}{Mic} \times 100$ Porcentaje de pérdidas por ignición= 7.7%
PORCENTAJE DE PÉRDIDAS POR IGNICIÓN= 7.8%	
PRUEBA DE ABSORCIÓN	
Muestra I Masa seca= 36.6 g Masa húmeda= 37.6 g $A = \frac{(Mha - Msa)}{Msa} \times 100$ Porcentaje de prueba de absorción= 2.7%	Muestra II Masa seca= 34.7 g Masa húmeda= 35.6 g $A = \frac{(Mha - Msa)}{Msa} \times 100$ Porcentaje de prueba de absorción= 2.6%
PORCENTAJE DE PRUEBA DE ABSORCIÓN= 2.6%	

Tabla 10
Caracterización muestras Caolín gris Oiba

CAOLÍN GRIS OIBA	
PRUEBA DE CONTRACCIÓN AL SECADO	
Muestra I Longitud antes de secar= 24.8 cm Longitud después de secar= 22.9 cm $Cs = \frac{(Lis - Lfs)}{Lis} \times 100$ Porcentaje de contracción al secado= 7.7%	Muestra II Longitud antes de secar= 24.8 cm Longitud después de secar= 22.9 cm $Cs = \frac{(Lis - Lfs)}{Lis} \times 100$ Porcentaje de contracción al secado= 7.7%
PORCENTAJE DE CONTRACCIÓN AL SECADO= 7.7%	
PRUEBA DE CONTRACCIÓN A LA QUEMA	
Muestra I Longitud antes de quema= 22.9 cm Longitud después de quema= 20.8 cm $Cq = \frac{(Lic - Lfc)}{Lic} \times 100$ Porcentaje de contracción a la quema= 9.2 %	Muestra II Longitud antes de quema= 22.9 cm Longitud después de quema= 20.8 cm $Cq = \frac{(Lic - Lfc)}{Lic} \times 100$ Porcentaje de contracción a la quema= 9.2%
PORCENTAJE DE CONTRACCIÓN A LA QUEMA= 9.2%	
PRUEBA DE PÉRDIDAS POR IGNICIÓN	
Muestra I Masa antes de quema= 34.7 g Masa después de quema= 31.8 g $I = \frac{(Mic - Mfc)}{Mic} \times 100$ Porcentaje de pérdidas por ignición= 8.4%	Muestra II Masa antes de quema= 37.1 g Masa después de quema= 33.9 g $I = \frac{(Mic - Mfc)}{Mic} \times 100$ Porcentaje de pérdidas por ignición= 8.6%
PORCENTAJE DE PÉRDIDAS POR IGNICIÓN= 8.5%	
PRUEBA DE ABSORCIÓN	
Muestra I Masa seca= 31.8 g Masa húmeda= 32.5 g $A = \frac{(Mha - Msa)}{Msa} \times 100$ Porcentaje de prueba de absorción= 2.2%	Muestra II Masa seca= 33.9 g Masa húmeda= 34.1 g $A = \frac{(Mha - Msa)}{Msa} \times 100$ Porcentaje de prueba de absorción= 0.6%
PORCENTAJE DE PRUEBA DE ABSORCIÓN=1.4%	

Tabla 11*Caracterización muestras Arcilla Arcabuco*

ARCILLA ARCABUCO	
PRUEBA DE CONTRACCIÓN AL SECADO	
<p>Muestra I Longitud antes de secar= 24.8 cm Longitud después de secar= 23.6 cm</p> $C_s = \frac{(L_{is} - L_{fs})}{L_{is}} \times 100$ <p>Porcentaje de contracción al secado= 4.8%</p>	<p>Muestra II Longitud antes de secar= 24.8 cm Longitud después de secar= 23.6 cm</p> $C_s = \frac{(L_{is} - L_{fs})}{L_{is}} \times 100$ <p>Porcentaje de contracción al secado= 4.8%</p>
PORCENTAJE DE CONTRACCIÓN AL SECADO= 4.8%	
PRUEBA DE CONTRACCIÓN A LA QUEMA	
<p>Muestra I Longitud antes de quema= 23.6 cm Longitud después de quema= 22.0 cm</p> $C_q = \frac{(L_{ic} - L_{fc})}{L_{ic}} \times 100$ <p>Porcentaje de contracción a la quema= 6.8%</p>	<p>Muestra II Longitud antes de quema= 23.6 cm Longitud después de quema= 21.8 cm</p> $C_q = \frac{(L_{ic} - L_{fc})}{L_{ic}} \times 100$ <p>Porcentaje de contracción a la quema= 7.6%</p>
PORCENTAJE DE CONTRACCIÓN A LA QUEMA= 7.2%	
PRUEBA DE PÉRDIDAS POR IGNICIÓN	
<p>Muestra I Masa antes de quema= 42.8 g Masa después de quema= 39.2 g</p> $I = \frac{(M_{ic} - M_{fc})}{M_{ic}} \times 100$ <p>Porcentaje de pérdidas por ignición= 8.4%</p>	<p>Muestra II Masa antes de quema= 42.6 g Masa después de quema= 38.9 g</p> $I = \frac{(M_{ic} - M_{fc})}{M_{ic}} \times 100$ <p>Porcentaje de pérdidas por ignición= 8.7%</p>
PORCENTAJE DE PÉRDIDAS POR IGNICIÓN= 8.6%	
PRUEBA DE ABSORCIÓN	
<p>Muestra I Masa seca= 39.2 g Masa húmeda= 41.9 g</p> $A = \frac{(M_{ha} - M_{sa})}{M_{sa}} \times 100$ <p>Porcentaje de prueba de absorción= 6.9%</p>	<p>Muestra II Masa seca= 38.9 g Masa húmeda= 40.4 g</p> $A = \frac{(M_{ha} - M_{sa})}{M_{sa}} \times 100$ <p>Porcentaje de prueba de absorción= 3.9%</p>
PORCENTAJE DE PRUEBA DE ABSORCIÓN= 5.4%	

Tabla 12
Caracterización muestras Caolín Unión

CAOLÍN UNIÓN	
PRUEBA DE CONTRACCIÓN AL SECADO	
<p>Muestra I Longitud antes de secar= 24.8 cm Longitud después de secar= 23.2 cm</p> $Cs = \frac{(Lis - Lfs)}{Lis} \times 100$ <p>Porcentaje de contracción al secado= 6.5%</p>	<p>Muestra II Longitud antes de secar= 24.8 cm Longitud después de secar= 23.1 cm</p> $Cs = \frac{(Lis - Lfs)}{Lis} \times 100$ <p>Porcentaje de contracción al secado= 6.9%</p>
PORCENTAJE DE CONTRACCIÓN AL SECADO= 6.7%	
PRUEBA DE CONTRACCIÓN A LA QUEMA	
<p>Muestra I Longitud antes de quema= 23.2 cm Longitud después de quema= 21.6 cm</p> $Cq = \frac{(Lic - Lfc)}{Lic} \times 100$ <p>Porcentaje de contracción a la quema= 6.9%</p>	<p>Muestra II Longitud antes de quema= 23.1 cm Longitud después de quema= 21.3 cm</p> $Cq = \frac{(Lic - Lfc)}{Lic} \times 100$ <p>Porcentaje de contracción a la quema= 7.8%</p>
PORCENTAJE DE CONTRACCIÓN A LA QUEMA= 7.4%	
PRUEBA DE PÉRDIDAS POR IGNICIÓN	
<p>Muestra I Masa antes de quema= 30.5 g Masa después de quema= 25.4 g</p> $I = \frac{(Mic - Mfc)}{Mic} \times 100$ <p>Porcentaje de pérdidas por ignición= 16.7%</p>	<p>Muestra II Masa antes de quema= 29.4 g Masa después de quema= 24.4 g</p> $I = \frac{(Mic - Mfc)}{Mic} \times 100$ <p>Porcentaje de pérdidas por ignición= 17%</p>
PORCENTAJE DE PÉRDIDAS POR IGNICIÓN= 16.8%	
PRUEBA DE ABSORCIÓN	
<p>Muestra I Masa seca= 25.4 g Masa húmeda= 31.9 g</p> $A = \frac{(Mha - Msa)}{Msa} \times 100$ <p>Porcentaje de prueba de absorción= 25.5%</p>	<p>Muestra II Masa seca= 24.4 g Masa húmeda= 30.4 g</p> $A = \frac{(Mha - Msa)}{Msa} \times 100$ <p>Porcentaje de prueba de absorción= 24.6%</p>
PORCENTAJE DE PRUEBA DE ABSORCIÓN= 25.1%	

Tabla 13
Caracterización muestras Caolín JM

CAOLÍN JM	
PRUEBA DE CONTRACCIÓN AL SECADO	
<p>Muestra I Longitud antes de secar= 24.8 cm Longitud después de secar= 24 cm</p> $C_s = \frac{(L_{is} - L_{fs})}{L_{is}} \times 100$ <p>Porcentaje de contracción al secado= 3.2%</p>	<p>Muestra II Longitud antes de secar= 24.8 cm Longitud después de secar= 23.9 cm</p> $C_s = \frac{(L_{is} - L_{fs})}{L_{is}} \times 100$ <p>Porcentaje de contracción al secado= 3.6%</p>
PORCENTAJE DE CONTRACCIÓN AL SECADO= 3.4%	
PRUEBA DE CONTRACCIÓN A LA QUEMA	
<p>Muestra I Longitud antes de quema= 24 cm Longitud después de quema= 23.1 cm</p> $C_q = \frac{(L_{ic} - L_{fc})}{L_{ic}} \times 100$ <p>Porcentaje de contracción a la quema= 3.8%</p>	<p>Muestra II Longitud antes de quema= 23.9 cm Longitud después de quema= 23.0 cm</p> $C_q = \frac{(L_{ic} - L_{fc})}{L_{ic}} \times 100$ <p>Porcentaje de contracción a la quema= 3.8%</p>
PORCENTAJE DE CONTRACCIÓN A LA QUEMA= 3.8%	
PRUEBA DE PÉRDIDAS POR IGNICIÓN	
<p>Muestra I Masa antes de quema= 32.1 g Masa después de quema= 28.1 g</p> $I = \frac{(M_{ic} - M_{fc})}{M_{ic}} \times 100$ <p>Porcentaje de pérdidas por ignición= 12.4%</p>	<p>Muestra II Masa antes de quema= 33.2 g Masa después de quema= 29.1 g</p> $I = \frac{(M_{ic} - M_{fc})}{M_{ic}} \times 100$ <p>Porcentaje de pérdidas por ignición= 12.3%</p>
PORCENTAJE DE PÉRDIDAS POR IGNICIÓN= 12.4%	
PRUEBA DE ABSORCIÓN	
<p>Muestra I Masa seca= 28.1 g Masa húmeda= 38.1 g</p> $A = \frac{(M_{ha} - M_{sa})}{M_{sa}} \times 100$ <p>Porcentaje de prueba de absorción= 35.6%</p>	<p>Muestra II Masa seca= 29.1 g Masa húmeda= 39.5 g</p> $A = \frac{(M_{ha} - M_{sa})}{M_{sa}} \times 100$ <p>Porcentaje de prueba de absorción= 35.7%</p>
PORCENTAJE DE PRUEBA DE ABSORCIÓN= 35.6%	

Tabla 14
Caracterización muestras Arcilla Amalia

ARCILLA AMALIA	
PRUEBA DE CONTRACCIÓN AL SECADO	
<p>Muestra I Longitud antes de secar= 24.8 cm Longitud después de secar= 23.7 cm</p> $C_s = \frac{(L_{is} - L_{fs})}{L_{is}} \times 100$ <p>Porcentaje de contracción al secado= 4.4%</p>	<p>Muestra II Longitud antes de secar= 24.8 cm Longitud después de secar= 23.6 cm</p> $C_s = \frac{(L_{is} - L_{fs})}{L_{is}} \times 100$ <p>Porcentaje de contracción al secado= 4.8%</p>
PORCENTAJE DE CONTRACCIÓN AL SECADO= 4.6%	
PRUEBA DE CONTRACCIÓN A LA QUEMA	
<p>Muestra I Longitud antes de quema= 23.7 cm Longitud después de quema= 20.9 cm</p> $C_q = \frac{(L_{ic} - L_{fc})}{L_{ic}} \times 100$ <p>Porcentaje de contracción a la quema= 11.8%</p>	<p>Muestra II Longitud antes de quema= 23.6 cm Longitud después de quema= 21.4 cm</p> $C_q = \frac{(L_{ic} - L_{fc})}{L_{ic}} \times 100$ <p>Porcentaje de contracción a la quema= 9.3%</p>
PORCENTAJE DE CONTRACCIÓN A LA QUEMA= 10.6%	
PRUEBA DE PÉRDIDAS POR IGNICIÓN	
<p>Muestra I Masa antes de quema= 39.3 g Masa después de quema= 30.3 g</p> $I = \frac{(M_{ic} - M_{fc})}{M_{ic}} \times 100$ <p>Porcentaje de pérdidas por ignición= 22.9%</p>	<p>Muestra II Masa antes de quema= 40.9 g Masa después de quema= 31.6 g</p> $I = \frac{(M_{ic} - M_{fc})}{M_{ic}} \times 100$ <p>Porcentaje de pérdidas por ignición= 22.7%</p>
PORCENTAJE DE PÉRDIDAS POR IGNICIÓN= 22.8%	
PRUEBA DE ABSORCIÓN	
<p>Muestra I Masa seca= 30.3 g Masa húmeda= 34.9 g</p> $A = \frac{(M_{ha} - M_{sa})}{M_{sa}} \times 100$ <p>Porcentaje de prueba de absorción= 15.2%</p>	<p>Muestra II Masa seca= 31.6 g Masa húmeda= 37.6 g</p> $A = \frac{(M_{ha} - M_{sa})}{M_{sa}} \times 100$ <p>Porcentaje de prueba de absorción= 19.0%</p>
PORCENTAJE DE PRUEBA DE ABSORCIÓN= 17.1%	

Anexo 2. Resultados más detallados y por muestra, caracterización de mezclas de caolines, arcillas, feldespatos y cuarzos.

Tabla 15
Caracterización muestras Mezcla 1

MEZCLA 1	
Arcilla Amalia 20% Arcilla Arcabuco 10% Caolín blanco Oiba 15% Caolín Jm 5% Cuarzo 30% Feldespato 20%	
PRUEBA DE CONTRACCIÓN AL SECADO	
Muestra I Longitud antes de secar= 24.8 cm Longitud después de secar= 24.2 cm $Cs = \frac{(Lis - Lfs)}{Lis} \times 100$ Porcentaje de contracción al secado= 2.4 %	Muestra II Longitud antes de secar= 24.8 cm Longitud después de secar= 24.1 cm $Cs = \frac{(Lis - Lfs)}{Lis} \times 100$ Porcentaje de contracción al secado= 2.8%
PORCENTAJE DE CONTRACCIÓN AL SECADO= 2.6%	
PRUEBA DE CONTRACCIÓN A LA QUEMA	
Muestra I Longitud antes de quema= 24.2 cm Longitud después de quema= 22.6 cm $Cq = \frac{(Lic - Lfc)}{Lic} \times 100$ Porcentaje de contracción a la quema= 6.6%	Muestra II Longitud antes de quema= 24.1 cm Longitud después de quema= 22.3 cm $Cq = \frac{(Lic - Lfc)}{Lic} \times 100$ Porcentaje de contracción a la quema= 7.5%
PORCENTAJE DE CONTRACCIÓN A LA QUEMA= 7.1%	
PRUEBA DE PÉRDIDAS POR IGNICIÓN	
Muestra I Masa antes de quema= 41.4 g Masa después de quema= 38.3 g $I = \frac{(Mic - Mfc)}{Mic} \times 100$ Porcentaje de pérdidas por ignición= 7.5%	Muestra II Masa antes de quema= 41.4 g Masa después de quema= 38.4 g $I = \frac{(Mic - Mfc)}{Mic} \times 100$ Porcentaje de pérdidas por ignición= 7.2%
PORCENTAJE DE PÉRDIDAS POR IGNICIÓN= 7.4 %	
PRUEBA DE ABSORCIÓN	
Muestra I Masa seca= 38.3 g Masa húmeda= 42.1 g $A = \frac{(Mha - Msa)}{Msa} \times 100$ Porcentaje de prueba de absorción= 9.9%	Muestra II Masa seca= 38.4 g Masa húmeda= 41.6 g $A = \frac{(Mha - Msa)}{Msa} \times 100$ Porcentaje de prueba de absorción= 8.3%
PORCENTAJE DE PRUEBA DE ABSORCIÓN= 9.1%	

Tabla 16
Caracterización muestras Mezcla 2

MEZCLA 2	
Arcilla Amalia 15% Arcilla Arcabuco 10% Caolín blanco Oiba 15% Caolín Jm 10% Cuarzo 25% Feldespatos 25%	
PRUEBA DE CONTRACCIÓN AL SECADO	
Muestra I Longitud antes de secar= 24.8 cm Longitud después de secar= 24.2 cm $Cs = \frac{(Lis - Lfs)}{Lis} \times 100$ Porcentaje de contracción al secado= 2.0 %	Muestra II Longitud antes de secar= 24.8 cm Longitud después de secar= 24.2 cm $Cs = \frac{(Lis - Lfs)}{Lis} \times 100$ Porcentaje de contracción al secado= 2.4 %
PORCENTAJE DE CONTRACCIÓN AL SECADO= 2.4%	
PRUEBA DE CONTRACCIÓN A LA QUEMA	
Muestra I Longitud antes de quema= 24.2 cm Longitud después de quema= 22.4 cm $Cq = \frac{(Lic - Lfc)}{Lic} \times 100$ Porcentaje de contracción a la quema= 7.4 %	Muestra II Longitud antes de quema= 24.2 cm Longitud después de quema= 22.4 cm $Cq = \frac{(Lic - Lfc)}{Lic} \times 100$ Porcentaje de contracción a la quema= 7.4 %
PORCENTAJE DE CONTRACCIÓN A LA QUEMA= 7.4%	
PRUEBA DE PÉRDIDAS POR IGNICIÓN	
Muestra I Masa antes de quema= 36.2 g Masa después de quema= 33.6 g $I = \frac{(Mic - Mfc)}{Mic} \times 100$ Porcentaje de pérdidas por ignición= 7.2 %	Muestra II Masa antes de quema= 36.3 g Masa después de quema= 33.9 g $I = \frac{(Mic - Mfc)}{Mic} \times 100$ Porcentaje de pérdidas por ignición= 6.6 %
PORCENTAJE DE PÉRDIDAS POR IGNICIÓN= 6.9%	
PRUEBA DE ABSORCIÓN	
Muestra I Masa seca= 33.6 g Masa húmeda= 36.6 g $A = \frac{(Mha - Msa)}{Msa} \times 100$ Porcentaje de prueba de absorción= 8.9%	Muestra II Masa seca= 33.9 g Masa húmeda= 36.7 g $A = \frac{(Mha - Msa)}{Msa} \times 100$ Porcentaje de prueba de absorción= 8.3 %
PORCENTAJE DE PRUEBA DE ABSORCIÓN= 8.6%	

Tabla 17
Caracterización muestras Mezcla 3

MEZCLA 3						
Arcilla Amalia 15% Arcilla Arcabuco 10% Caolín blanco Oiba 15% Caolín Jm 8.5% Cuarzo 20% Feldespató 27% Dolomita 4.5%						
PRUEBA DE CONTRACCIÓN AL SECADO						
$Cs = \frac{(Lis - Lfs)}{Lis} \times 100$						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6
Longitud antes de secar (cm)	24.8	24.8	24.8	24.8	24.8	24.8
Longitud después de secar (cm)	24.4	24.4	24.4	24.4	24.5	24.5
Porcentaje de contracción al secado	1.61%	1.61%	1.61%	1.61%	1.21%	1.21%
PORCENTAJE DE CONTRACCIÓN AL SECADO= 1.48%						
PRUEBA DE CONTRACCIÓN A LA QUEMA						
$Cq = \frac{(Lic - Lfc)}{Lic} \times 100$						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6
Longitud antes de quema (cm)	24.4	24.4	24.4	24.4	24.5	24.5
Longitud después de quema (cm)	22.0	22.0	22.2	22.2	22.4	22.2
Porcentaje de contracción a la quema	9.84%	9.84%	9.02%	9.02%	8.57%	9.02%
PORCENTAJE DE CONTRACCIÓN A QUEMA= 9.22%						
PRUEBA DE PÉRDIDAS POR IGNICIÓN						
$I = \frac{(Mic - Mfc)}{Mic} \times 100$						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6
Masa antes de quema (g)	42.8	42.7	41.1	42.0	42.3	44.2
Masa después de quema (g)	39.1	39.0	37.5	38.3	38.6	40.4
Porcentaje de pérdidas por ignición	8.64	8.67	8.76	8.81	8.75	8.60
PORCENTAJE DE PÉRDIDAS POR IGNICIÓN= 8.71%						
PRUEBA DE ABSORCIÓN						
$A = \frac{(Mha - Msa)}{Msa} \times 100$						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6
Masa seca (g)	39.1	39.0	37.5	38.3	38.6	40.4
Masa húmeda (g)	39.1	39.1	37.5	38.4	40.7	42.3
Porcentaje de prueba de absorción	0.0 %	0.26%	0.0%	0.26%	5.44%	4.70%
PORCENTAJE DE PRUEBA DE ABSORCIÓN= 1.78%						

Tabla 18
Caracterización muestras Mezcla 4

MEZCLA 4						
Caolín Unión 25% Caolín blanco Oiba 50% Sienita 21.25% Dolomita 3.75%						
PRUEBA DE CONTRACCIÓN AL SECADO						
$C_s = \frac{(Lis - Lfs)}{Lis} \times 100$						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6
Longitud antes de secar (cm)	24.8	24.8	24.8	24.8	24.8	
Longitud después de secar	24.0	24.2	24.0	24.2	24.2	
Porcentaje de contracción al secado	3.22%	2.42%	3.22%	2.42%	2.42%	
PORCENTAJE DE CONTRACCIÓN AL SECADO= 2.74%						
PRUEBA DE CONTRACCIÓN A LA QUEMA						
$C_q = \frac{(Lic - Lfc)}{Lic} \times 100$						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6
Longitud antes de quema (cm)	24.0	24.2	24.0	24.2	24.2	
Longitud después de quema (cm)	21.6	21.8	21.8	21.7	21.7	
Porcentaje de contracción a la quema	10%	9.92%	9.17%	10.3%	10.3%	
PORCENTAJE DE CONTRACCIÓN A QUEMA= 9.94%						
PRUEBA DE PÉRDIDAS POR IGNICIÓN						
$I = \frac{(Mic - Mfc)}{Mic} \times 100$						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6
Masa antes de quema (g)	37.7	36.5	37.9	36.6	34.6	
Masa después de quema (g)	34.2	32.1	32.8	32.4	30.1	
Porcentaje de pérdidas por ignición	9.28%	12.05%	13.5%	11.47%	13.0%	
PORCENTAJE DE PÉRDIDAS POR IGNICIÓN= 11.86%						
PRUEBA DE ABSORCIÓN						
$A = \frac{(Mha - Msa)}{Msa} \times 100$						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6
Masa seca (g)		32.1	32.8	32.4	30.1	
Masa húmeda (g)		32.2	32.9	32.4	30.1	
Porcentaje de prueba de absorción		0.31%	0.30%	0.00%	0.00%	
PORCENTAJE DE PRUEBA DE ABSORCIÓN= 0.15%						

Tabla 19
Caracterización muestras Mezcla 5

MEZCLA 5						
Caolín blanco Oiba 40% Sienita 21.25% Dolomita 3.75% Caolín gris Oiba 4% Caolín JM 31%						
PRUEBA DE CONTRACCIÓN AL SECADO						
$Cs = \frac{(Lis - Lfs)}{Lis} \times 100$						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6
Longitud antes de secar (cm)	24.8	24.8	24.8	24.8		
Longitud después de secar (cm)	24.2	24.2	24.2	24.1		
Porcentaje de contracción al secado	2.42%	2.42%	2.42%	2.82%		
PORCENTAJE DE CONTRACCIÓN AL SECADO= 2.52%						
PRUEBA DE CONTRACCIÓN A LA QUEMA						
$Cq = \frac{(Lic - Lfc)}{Lic} \times 100$						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6
Longitud antes de quema (cm)	24.2	24.2	24.2	24.1		
Longitud después de quema (cm)	21.4	21.4	21.2	21.5		
Porcentaje de contracción a la quema	11.57%	11.57%	12.40%	10.79%		
PORCENTAJE DE CONTRACCIÓN A QUEMA= 11.58%						
PRUEBA DE PERDIDAS POR IGNICIÓN						
$I = \frac{(Mic - Mfc)}{Mic} \times 100$						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6
Masa antes de quema (g)	35.9	34.7	35.2	31.0		
Masa después de quema (g)	32.4	31.2	31.2	27.8		
Porcentaje de pérdidas por ignición	9.75%	10.09%	11.36%	10.32%		
PORCENTAJE DE PÉRDIDAS POR IGNICIÓN= 10.38%						
PRUEBA DE ABSORCIÓN						
$A = \frac{(Mha - Msa)}{Msa} \times 100$						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6
Masa seca (g)	32.4	31.2	31.2	27.8		
Masa húmeda (g)	33.5	31.6	31.9	29.8		
Porcentaje de prueba de absorción	3.40%	1.28%	2.24%	7.19%		
PORCENTAJE DE PRUEBA DE ABSORCIÓN= 3.53%						

Tabla 20
Caracterización muestras Mezcla 6

MEZCLA 6						
Caolín blanco Oiba 40% Sienita 21.25% Dolomita 3.75% Caolín gris Oiba 4% Caolín JM 19% Arcilla Amalia 12						
PRUEBA DE CONTRACCIÓN AL SECADO						
$C_s = \frac{(Lis - Lfs)}{Lis} \times 100$						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6
Longitud antes de secar (cm)	24.8	24.8	24.8	24.8		
Longitud después de secar (cm)	24.0	24.0	24.0	24.0		
Porcentaje de contracción al secado	3.23%	3.23%	3.23%	3.23%		
PORCENTAJE DE CONTRACCIÓN AL SECADO= 3.23%						
PRUEBA DE CONTRACCIÓN A LA QUEMA						
$C_q = \frac{(Lic - Lfc)}{Lic} \times 100$						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6
Longitud antes de quema (cm)	24.0	24.0	24.0	24.0		
Longitud después de quema (cm)	21.1	21.2	21.5	21.1		
Porcentaje de contracción a la quema	12.08%	11.67%	10.42%	12.08%		
PORCENTAJE DE CONTRACCIÓN A QUEMA= 11.56%						
PRUEBA DE PÉRDIDAS POR IGNICIÓN						
$I = \frac{(Mic - Mfc)}{Mic} \times 100$						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6
Masa antes de quema (g)	36.0	32.2	33.6	38.4		
Masa después de quema (g)	32.6	29.3	30.5	35.0		
Porcentaje de pérdidas por ignición	9.44%	9.00%	9.23%	8.85%		
PORCENTAJE DE PÉRDIDAS POR IGNICIÓN= 9.13%						
PRUEBA DE ABSORCIÓN						
$A = \frac{(Mha - Msa)}{Msa} \times 100$						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6
Masa seca (g)	32.6	29.3	30.5	35.0		
Masa húmeda (g)	33.4	29.8	31.1	35.5		
Porcentaje de prueba de absorción	2.45%	1.71%	1.97%	1.43%		
PORCENTAJE DE PRUEBA DE ABSORCIÓN= 1.89%						

Tabla 21

Fracciones utilizadas para encontrar un modelo de primer orden y segundo orden con mezclas y caracterizaciones completas

Fracción de Caolines y/o arcillas no plásticas X_1			Fracción de Caolines y/o arcillas plásticas X_2			Fracción Fundente X_3	Fracción Cuarzo X_4	Porcentaje de Absorción	Porcentaje de pérdidas por ignición	Porcentaje de contracción a la quema
Arcilla Amalia	Caolín Unión	Caolín JM	Arcilla Arcabuco	Caolín blanco Oiba	Caolín gris Oiba	Feldespato	Cuarzo	A	I	Cq
1			0			0	0	2.6	7.8	11.4
1			0			0	0	1.4	8.5	9.2
1			0			0	0	5.4	8.7	7.2
0			1			0	0	25.1	16.8	7.4
0			1			0	0	35.6	12.4	3.8
0			1			0	0	17.1	22.8	10.6
0.250			0.250			0.20	0.300	9.1	7.4	7.1
0.250			0.250			0.25	0.250	8.6	6.9	7.4
0.235			0.250			0.315	0.200	1.8	8.7	9.2
0.250			0.500			0.25	0	0.2	11.9	9.9
0.310			0.440			0.25	0	3.5	10.4	11.6
0.310			0.440			0.25	0	1.9	9.1	11.6