

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA

ESTUDIO DEL APROVECHAMIENTO DE MINERALES ARCILLOSOS DEL ECUADOR EN LA ELABORACIÓN DE BARBOTINAS PARA USO EN EL SECTOR CERÁMICO ARTESANAL

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA
QUÍMICA**

GUISELLA ESTEFANÍA LEMA AUZ
guiss_ec@hotmail.com

DIRECTOR: ING. RAFAEL ALONSO URIBE SOTO, PhD
rafael.uribe@epn.edu.ec

CODIRECTOR: ING. OMAR FERNANDO BONILLA HIDALGO, MSc
omar.bonilla@epn.edu.ec

Quito, octubre 2018

© Escuela Politécnica Nacional (2018)
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Guisella Estefanía Lema Auz, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Guisella Estefanía Lema Auz

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Guisella Estefanía Lema Auz, bajo nuestra supervisión.

Rafael Uribe, PhD
DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Omar Bonilla, MSc.
CO-DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por ser mi fuerza espiritual, mi paz y mi refugio. Por recordarme que frente a su grandeza cualquier problema es pequeño.

A mis padres por darme su amor y apoyo incondicional, sobre todo en esta etapa universitaria. ¡Lo logramos!

A mis hermanos por ser mis confidentes de vida, les amo mucho, y aunque me demoré un poco más de lo normal igual lo logré jaja.

A mi familia Lema Auz por la fuerza y ánimo que me han dado toda la vida. Fer, Alex, Manuel, Vicky, abuelitos Auz y abuelita Luzmila. Muchas gracias porque con su amor y paciencia he logrado cumplir cada meta.

A la Escuela Politécnica Nacional por brindarme el conocimiento a lo largo de mi carrera. Por estos largos años acogiéndome en sus aulas junto a excelentes profesores que aparte de impartirme conocimiento me enseñaron a formar un carácter ético y responsable.

A mi director de tesis Dr. Rafael Uribe por ser mi guía durante todo el proyecto, por su paciencia y enseñanza. Muchas gracias por su tiempo y por ayudarme a resolver rápidamente los problemas que se presentaron a lo largo del proyecto.

A mi Co-director de tesis Ing. Andrés Chico por brindarme su confianza para la realización de este proyecto. Gracias por sus oportunas palabras para animarme y continuar hasta cumplir la meta. Le deseo lo mejor en su doctorado y que Dios le bendiga mucho en todos los proyectos que se plantee.

A Ruth Tapia por ser una increíble ayuda en la realización de la parte experimental de este proyecto. Gracias por sus buenos ánimos en todo

momento, por ayudarme a buscar soluciones donde yo ya veía negro todo y por permitirme usar todo el material y equipos del laboratorio.

A Metrexlab y Labdim porque sin su ayuda técnica no hubiese logrado culminar con la parte experimental del proyecto. Ing. Andrés Méndez e Ing. Adrián Méndez muchas gracias por su profesionalismo, por personas como ustedes el país progresará.

A mis amigos con los que compartí momentos increíbles al finalizar la carrera: Darío, Cindy y Majo, estoy muy agradecida con ustedes porque sin su paciencia no hubiese egresado jeje. Les quiero muchísimo chicos.

A mis compañer@s tesistas con los que compartí muchas experiencias bonitas y de desesperación jeje. Mary, Karen, Klever Andre, Dennise, y Cindy son lo máximo amigos, les quiero mucho.

A las dos generaciones de pasantes con los que logre culminar mi tesis: Dani, Victor, Chivo, Sambo, Mishu, Cris y Carlos. Fueron la ayuda más oportuna y divertida que tuve en este proceso, gracias por ser tan geniales les quiero mucho.

Ahora a mis amig@s ingenieros antes que yo:

Inge Patito, no sé cómo agradecerte tanto. Eres la persona más tierna y peleona en una misma persona jaja. Gracias, porque contigo aprendí a valorar la amistad de otra forma y aprendí a amar a una amiga como a una hermana. Te quiero un montón y recuerda que si me quedó atrapada en el baño debes ayudarme y no reírte o sino no levantaré tu silla.

Inge Mabe, te agradezco mucho por tu amistad. Gracias por tus sabios consejos a lo largo de la carrera. Eres muy especial para mí y fuiste una ayuda brutal para acabar este proyecto. Gracias por tu paciencia, te quiero y admiro muchísimo.

Inge Pao, amiga querida, gracias por todas las experiencias que compartimos juntas. Me enseñaste que aferrarse no siempre es bueno y gracias a eso aprendo cada día a madurar. Te quiero mucho.

Inge Mishu, no te enojés jeje. Te quiero mucho y te agradezco por tu amistad a pesar de todo. Gracias por ayudarme a tomar decisiones sabias a lo largo de la carrera y por siempre hablarme clarito. Espero siempre poder contar con tu amistad.

Cuasi Inge Sammy, amiga querida tantos años de amistad y sigues siendo tan linda. Te quiero un montón, desde prepo hasta ahora amiga. Gracias por tu amistad y por saber tratarme así con este carácter “especial” jaja.

Inge David Kit! Te quiero mucho amigo. Gracias por todos los momentos lindos que vivimos durante la carrera y por mantener tu amistad a pesar de tantas cosas que pasaron. Espero seguir contando con tu amistad siempre.

Inge Jessy, te quiero mucho. Espero que nuestra amistad siga siendo tan fuerte y que conforme pase el tiempo se fortalezca aún más. Gracias por tu amistad y por darme fuerzas para terminar esta bendita tesis.

Ing. Danilo L.D.U te quiero mucho amigo, nos conocimos de manera inesperada y ahora eres como un hermano para mí. Gracias por las risas, las pizzas, las habladuras, las peleas y todo jaja. Espero que sigamos compartiendo muchos momentos lindos.

Inge Luisito ♥. Gracias por estar conmigo esta cuasi década jaja. Te amo mucho mi amor. Hemos pasado por tanto en esta etapa universitaria y todo ha fortalecido esta relación. Que Dios bendiga todo lo que nos depara el futuro y que a pesar de todo sigamos adelante. Mua mua.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios porque ha sido mi fuerza espiritual en toda esta
dura etapa.

A mi familia
porque sin su apoyo no hubiera logrado alcanzar esta meta.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN	xii
INTRODUCCIÓN	xiii
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
1.1. Minerales Arcillosos	1
1.1.1. Minerales arcillosos plásticos	1
1.1.1.1. Composición química de las arcillas	1
1.1.1.2. Estructura de las arcillas	2
1.1.1.3. Clases de arcillas	2
1.1.1.4. Propiedades de las arcillas	4
1.1.2. Minerales arcillosos no plásticos	6
1.1.2.1. Feldespatos	6
1.1.2.2. Arenas o sílice	7
1.1.3. Minerales arcillosos en el Ecuador	8
1.2. Pastas-barbotinas cerámicas	9
1.2.1. Composición de pastas-barbotinas cerámicas (mezclas triaxiales)	9
1.2.1.1. Formulación barbotinas cerámicas	11
1.2.1.2. Proceso de elaboración de barbotinas cerámicas	13
1.2.1.3. Proceso de elaboración de pastas cerámicas	14
1.2.2. Propiedades de las barbotinas cerámicas	15
1.2.2.1. Viscosidad	15
1.2.2.2. Tixotropía	16
1.2.2.3. Densidad	16
1.2.2.4. Contenido de sólidos	17
1.2.2.5. Granulometría en húmedo	17
1.2.2.6. Comportamiento al moldeo	18
1.2.3. Control de barbotinas cerámicas	19
1.3. Productos cerámicos artesanales	20
1.3.1. Tipos de productos cerámicos artesanales en el Ecuador	21
1.3.2. Propiedades en servicio/uso de los productos cerámicos en el Ecuador	22
2. PARTE EXPERIMENTAL	24
2.1. Evaluación de los minerales arcillosos provenientes del Ecuador	24
2.1.1. Acondicionamiento de la materia prima	24
2.1.2. Selección de los minerales arcillosos con base en la caracterización química y mineralógica	25
2.1.3. Caracterización de los minerales arcillosos seleccionados	27
2.2. Desarrollo de barbotinas cerámicas de distinta composición a partir de la formulación de mezclas triaxiales de arcilla, feldespato y cuarzo.	30

2.2.1.	Caracterización de una barbotina cerámica comercial de uso artesanal	30
2.2.2.	Desarrollo de barbotinas cerámicas para uso artesanal	33
2.3.	Estudio del efecto de distintas composiciones de barbotinas sobre la absorción de agua, porosidad y resistencia a la flexión de los productos cerámicos obtenidos.	35
2.3.1.	Preparación de probetas y medición de propiedades de los productos cerámicos obtenidos	36
2.3.2.	Diseño experimental	37
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
3.1.	Evaluación de los minerales arcillosos provenientes del Ecuador	39
3.1.1.	Selección de los minerales arcillosos	39
3.1.2.	Caracterización física de los minerales arcillosos seleccionados	44
3.2.	Desarrollo de barbotinas cerámicas de distinta composición a partir de la formulación de mezclas triaxiales de arcilla, feldespato y cuarzo	50
3.2.1.	Caracterización de la barbotina cerámica comercial y las barbotinas cerámicas experimentales	50
3.2.2.	Caracterización física y mecánica de la pasta comercial y pastas experimentales.	56
3.3.	Evaluación del efecto de la composición y temperatura de cocción de las barbotinas experimentales sobre la absorción de agua, porosidad y resistencia a la flexión.	66
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	73
4.1.	Conclusiones	73
4.2.	Recomendaciones	74
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
	ANEXOS	82

ÍNDICE DE TABLAS

		PÁGINA
Tabla 1.1.	Composición química de las arcillas	1
Tabla 1.2.	Nombres comerciales de las arcillas especiales	3
Tabla 1.3.	Clasificación de los minerales arcillosos según su granulometría	4
Tabla 1.4.	Composición química y mineral de las principales especies de feldspatos	6
Tabla 1.5.	Formas alotrópicas de la sílice	7
Tabla 1.6.	Aprovechamiento de los minerales arcillosos en distintas provincias del Ecuador	8
Tabla 1.7.	Viscosidad cinemática y dinámica para barbotinas de porcelana sanitaria y gres porcelánico	16
Tabla 2.1.	Identificación de los minerales arcillosos empleados en el estudio	25
Tabla 2.2.	Criterios de selección para los minerales arcillosos	26
Tabla 2.3.	Consistencia de suelos	28
Tabla 2.4.	Textura de suelos	28
Tabla 2.5.	Composición de las barbotinas cerámicas experimentales	34
Tabla 2.6.	Distribución para la quema de probetas obtenidas por extrusión manual.	36
Tabla 2.7.	Diseño experimental para la evaluación de las propiedades mecánicas de las barbotinas experimentales	38
Tabla 3.1.	Análisis químico de óxidos de los minerales arcillosos mediante fluorescencia de rayos X	39
Tabla 3.2.	Análisis mineralógico de los minerales arcillosos mediante difracción de rayos X	41
Tabla 3.3.	Índice de plasticidad para las arcillas	42

Tabla 3.4.	Caracterización física por atributos de los minerales arcillosos seleccionados	44
Tabla 3.5.	Caracterización física por variables de los minerales arcillosos seleccionados	48
Tabla 3.6.	Análisis granulométrico de los minerales arcillosos seleccionados	49
Tabla 3.7.	Caracterización física de la barbotina comercial y barbotinas experimentales	51
Tabla 3.8.	Análisis granulométrico de la barbotina comercial y barbotinas experimentales	52
Tabla 3.9.	Tiempo de secado de la barbotina comercial en molde cónico	53
Tabla 3.10.	Rata de colada de la barbotina comercial en molde plano	54
Tabla 3.11.	Contracción al secado a 110 °C y a la quema a 900 °C de las pastas comercial y experimentales	59
Tabla 3.12.	Contracción al secado a 110 °C y a la quema a 1 000 °C de las pastas comercial y experimentales	61
Tabla 3.13.	Contracción al secado a 110 °C y a la quema a 1 100 °C de las pastas comercial y experimentales	62
Tabla 3.14.	Absorción de agua, porosidad abierta, porosidad cerrada y porosidad total de la pasta comercial y pastas experimentales quemadas a 900 °C	63
Tabla 3.15.	Absorción de agua, porosidad abierta, porosidad cerrada y porosidad total de la pasta comercial y pastas experimentales quemadas a 1 000 °C	64
Tabla 3.16.	Absorción de agua, porosidad abierta, porosidad cerrada y porosidad total de la pasta comercial y pastas experimentales quemadas a 1 100 °C	64
Tabla 3.17.	Resistencia a la flexión de la pasta comercial y pastas experimentales quemadas a 900, 1 000 y 1 100 °C	66
Tabla AII.1.	Determinación del límite líquido de la pasta cerámica comercial	84
Tabla AII.2.	Determinación del límite plástico para la pasta cerámica comercial	85

Tabla AIII.1.	Determinación de la materia orgánica de la arcilla AR-MO-17-01	87
Tabla AIV.1.	Determinación de la humedad de la arcilla AR-MO-17-01	88
Tabla AV.1.	Determinación de la densidad de la arcilla AR-MO-17-01	89
Tabla AV.2.	Densidad absoluta del agua	90
Tabla AVI.3.	Densidad absoluta de aire seco a 760 mmHg a la temperatura t	90
Tabla AVI.1.	Determinación de fracciones arcillosas de la arcilla AR-MO-17-01	91
Tabla AVII.1.	Determinación del contenido de sólidos de la barbotina comercial	92
Tabla AVIII.1	Determinación de la densidad de humedad de la barbotina comercial	93
Tabla AIX.1.	Determinación del contenido de humedad de la barbotina comercial	94
Tabla AX.1.	Determinación de la granulometría de la barbotina comercial	95
Tabla AXI.1.	Determinación de la viscosidad de la barbotina comercial	96
Tabla AXII.1.	Determinación de la rata de colada de la barbotina comercial	98
Tabla AXIV.1.	Determinación de la contracción al secado y a la quema de la pasta comercial a 900 °C	101
Tabla AXV.1.	Determinación de la absorción de agua y porosidad de la pasta comercial	103
Tabla AXVII.1.	Resultados de análisis estadístico de la superficie de respuesta para la absorción de agua a 900 °C	107
Tabla AXVII.2.	Resultados del análisis estadístico de la superficie de respuesta para la porosidad a 900 °C	108
Tabla AXVII.3.	Resultados del análisis estadístico de la superficie de respuesta para la resistencia a la flexión a 900 °C	109
Tabla AXVII.4.	Resultados del análisis estadístico de la superficie de respuesta para la absorción de agua a 1 000 °C	109

Tabla AXVII.5.	Resultados del análisis estadístico de la superficie de respuesta para la porosidad a 1 000 °C	110
Tabla AXVII.6.	Resultados del análisis estadístico de la superficie de respuesta para la resistencia a la flexión a 1 000 °C	111
Tabla AXVII.7.	Resultados de análisis estadístico de la superficie de respuesta para la absorción de agua a 1 100 °C	111
Tabla AXVII.8.	Resultados de análisis estadístico de la superficie de respuesta para la porosidad a 1 100 °C	112
Tabla AXVII.9.	Resultados de análisis estadístico de la superficie de respuesta para la resistencia a la flexión a 1 100 °C	113

ÍNDICE DE FIGURAS

		PÁGINA
Figura 1.1.	Estructura laminar de la arcilla	2
Figura 1.2.	Diagrama triaxial según varios productos cerámicos comerciales	9
Figura 1.3.	Distribución de puntos experimentales en un modelo Simplex-Centroide	10
Figura 1.4.	Ficha de cálculo para la formulación de barbotinas a partir de una composición dada	12
Figura 1.5.	Diagrama de elaboración de barbotinas cerámicas	13
Figura 1.6.	Diagrama de elaboración de pastas cerámicas	14
Figura 1.7.	Control de barbotinas cerámicas	19
Figura 1.8.	Distribución de actividad cerámica en el Ecuador en el año 2003	21
Figura 2.1.	Diagrama Casagrande	26
Figura 2.2.	Ensayo de textura para suelos	29
Figura 2.3.	Proceso de elaboración de barbotinas cerámicas	33
Figura 2.4.	Diagrama ternario con las formulaciones experimentales	34
Figura 3.1.	Arcillas AR-MO-17-01, AR-AZ-17-01 y pasta comercial en el diagrama Casagrande	43
Figura 3.2.	Minerales arcillosos en estado inicial y su consistencia: a) AR-MO-17-01 b) FE-BO-17-02 y c) SI-NP-17-02	45
Figura 3.3.	Resultados de la prueba de sensación al tacto para: a) AR-MO-17-01 b) FE-BO-17-02 y c) SI-NP-17-02	45
Figura 3.4.	Textura de los minerales arcillosos seleccionados: a) AR-MO-17-01 b) FE-BO-17-02 y c) SI-NP-17-02.	46
Figura 3.5.	Coloración de los minerales arcillosos seleccionados: a) AR-MO-17-01 b) FE-BO-17-02 y c) SI-NP-17-02	47

Figura 3.6.	Presencia de impurezas de los minerales arcillosos seleccionados: a) AR-MO-17-01 b) FE-BO-17-02 y c) SI-NP-17-02.	47
Figura 3.7.	Presencia de materia orgánica de los minerales arcillosos seleccionados: a) AR-MO-17-01 b) FE-BO-17-02 y c) SI-NP-17-02.	48
Figura 3.8.	Curva de tixotropía para la barbotina comercial	54
Figura 3.9.	Curvas de tixotropía para las barbotinas experimentales	55
Figura 3.10.	Formación de pasta en moldes de yeso- parte 1	56
Figura 3.11.	Formación de pasta en moldes de yeso-parte 2	56
Figura 3.12.	Amasado de pasta	57
Figura 3.13.	Extrusión de probetas	57
Figura 3.14.	Medición de la marca de 10 cm sobre las probetas	58
Figura 3.15.	Probetas identificadas previas al secado	58
Figura 3.16.	Triángulo de superficie de respuesta de la absorción de agua para las barbotinas experimentales a 900 °C	67
Figura 3.17.	Triángulo de superficie de respuesta de la porosidad para las barbotinas experimentales a 900 °C	68
Figura 3.18.	Triángulo de superficie de respuesta de la resistencia a la flexión para las barbotinas experimentales a 900 °C	69
Figura 3.19.	Diagrama de Pareto estandarizado para la absorción de agua.	70
Figura 3.20.	Gráfica de efectos principales para la absorción de agua.	70
Figura 3.21.	Gráfica de interacción para la absorción de agua.	71
Figura 3.22.	Gráfica de contornos de la superficie de respuesta estimada para las formulaciones, absorción de agua, porosidad, resistencia mecánica a la flexión y temperatura de cocción	72
Figura AI.1.	Relación de la densidad de la barbotina con el contenido de sólidos	83
Figura AII.1.	%Humedad vs. número de golpes para la pasta comercial	85

Figura AII.2.	Pasta comercial en el diagrama Casagrande	86
Figura AXVI.1.	Tabla de conversión de viscosidad cinemática de s a cSt.	96
Figura AXII.1.	Molde de yeso plano	98
Figura AXIII.1.	Molde de yeso cónico	100
Figura AXIII.2.	Conos formados en la prueba de tiempo de secado y tortas de la rata de colada para la barbotina comercial y barbotinas experimentales	100
Figura AXVI.1.	Ensayo de resistencia a la flexión de las probetas cerámicas obtenidas	106
Figura AXVII.1.	Superficie de respuesta para la absorción de agua a 900 °C	107
Figura AXVII.2.	Superficie de respuesta para la porosidad a 900 °C	108
Figura AXVII.3.	Superficie de respuesta para la resistencia a la flexión a 900 °C	108
Figura AXVII.4.	Superficie de respuesta para absorción de agua a 1 000 °C	109
Figura AXVII.5.	Superficie de respuesta para la porosidad a 1 000 °C	110
Figura AXVII.6.	Superficie de respuesta para la resistencia mecánica a la flexión a 1 000 °C	110
Figura AXVII.7.	Superficie de respuesta para absorción de agua a 1 100 °C	111
Figura AXVII.8.	Superficie de respuesta para la porosidad a 1 100 °C	112
Figura AXVII.9.	Superficie de respuesta para la resistencia mecánica a la flexión a 1 100 °C	112
Figura AXVII.10.	Diagrama de Pareto para la porosidad de agua	113
Figura AXVII.11.	Diagrama de Pareto para la resistencia a la flexión	113
Figura AXVII.12.	Gráfica de efectos principales para la porosidad	114
Figura AXVII.13.	Gráfica de interacción para la porosidad	114
Figura AXVII.14.	Gráfica de efectos principales para la resistencia a la flexión	115
Figura AXIX.15.	Gráfica de interacción para la resistencia a la flexión.	115

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
ANEXO I Relación entre el % de sólidos y la densidad de la barbotina	83
ANEXO II Ejemplo de cálculo para la determinación del índice de plasticidad	84
ANEXO III Ejemplo de cálculo para la determinación de la materia orgánica de los minerales arcillosos	87
ANEXO IV Ejemplo de cálculo para la determinación de la humedad de los minerales arcillosos	88
ANEXO V Ejemplo de cálculo para la determinación de la densidad de los minerales arcillosos	89
ANEXO VI Ejemplo de cálculo para el análisis granulométrico de los minerales arcillosos	91
ANEXO VII Ejemplo de cálculo para el contenido de sólidos de las barbotinas cerámicas	92
ANEXO VIII Ejemplo de cálculo para la densidad de las barbotinas cerámicas	93
ANEXO IX Ejemplo de cálculo para el contenido de humedad de las barbotinas cerámicas	94
ANEXO X Ejemplo de cálculo para la granulometría de las barbotinas cerámicas	95
ANEXO XI Ejemplo de cálculo para la viscosidad de las barbotinas cerámicas	96
ANEXO XII Ejemplo de cálculo para la rata de colada de las barbotinas cerámicas	98
ANEXO XIII Registro fotográfico de los espesores de pared de las barbotinas cerámicas	100

ANEXO XIV

Ejemplo de cálculo para la contracción al secado y a la quema de las pastas cerámicas

101

ANEXO XV

Ejemplo de cálculo para la absorción de agua y porosidad de las pastas cerámicas

103

ANEXO XVI

Registro fotográfico del ensayo de resistencia a la flexión de las piezas cerámicas obtenidas

106

ANEXO XVII

Superficies de respuesta, diagramas de pareto y de interacción para la absorción de agua, porosidad y resistencia a la flexión.

107

RESUMEN

El presente proyecto tuvo como finalidad estudiar el aprovechamiento de minerales arcillosos del Ecuador en la elaboración de barbotinas para uso en el sector cerámico artesanal. Los minerales arcillosos que se emplearon fueron arcilla, cuarzo y feldespato procedentes de minas y afloramientos minerales de distintas provincias del Ecuador. Se efectuó la caracterización química y mineralógica de dos tipos de: arcilla, cuarzo y feldespato, con el fin de seleccionar uno de cada tipo para la formulación de barbotinas cerámicas. Los minerales arcillosos seleccionados fueron: arcilla proveniente de Morona Santiago, feldespato proveniente de Bolívar y sílice proveniente de Napo, los cuales fueron caracterizados mediante un control por atributos (evaluación de propiedades generales cualitativas) y un control por variables (evaluación de propiedades específicas cuantitativas). La formulación de barbotinas se sustentó con base en un diseño de mezclas Simplex-centroide, el cual determinó las proporciones de cada mineral seleccionado en las formulaciones. Las barbotinas cerámicas se prepararon vía molienda en húmedo y posteriormente se evaluaron sus propiedades físicas, como densidad, viscosidad, tiempo de colado, etc., comparándolas con las propiedades de una barbotina cerámica comercial de uso artesanal. Para la evaluación de la absorción de agua, porosidad y resistencia a la flexión de las barbotinas cerámicas se elaboraron probetas mediante extrusión manual, estas fueron secadas a 110 °C y luego cocidas a tres temperaturas: 900 °C, 1 000 °C y 1 100°C. Se determinó que la absorción de agua guarda una relación directamente proporcional con la porosidad, ya que a menor absorción de agua se tiene menor porosidad. Por otra parte, el análisis de resistencia mecánica determinó que a mayor temperatura de cocción mayor resistencia mecánica a la flexión. Finalmente, la investigación permitió determinar que la composición en peso de las barbotinas cerámicas de uso artesanal debe considerar aproximadamente 70 % de arcilla, 20 % de feldespato y 10 % de cuarzo, para obtener piezas que posean baja absorción de agua ($\approx 12,1$ %), baja porosidad ($\approx 23,6$ %) y alta resistencia a la flexión ($\approx 240,4$ kg/cm²) a una temperatura de cocción 1 100 °C.

INTRODUCCIÓN

La cerámica artesanal hace referencia a los productos elaborados a partir de materias primas arcillosas que, por lo general, emplean maquinaria simple y técnicas de vaciado o moldeo (CENDAR, 2001, p. 2). Los productos cerámicos artesanales son apreciados por la habilidad con la que son elaborados, sin embargo, son obtenidos mediante procesos que no están sometidos a normas y procedimientos controlados, y en muchos casos no cumplen con los requisitos mínimos de calidad (Alcócer y Gachet, 2007, p. 17).

Durante la producción de piezas cerámicas artesanales, uno de los mayores inconvenientes es el agrietamiento de las piezas, el cual se produce por las tensiones que se generan durante el moldeo o debido a un proceso de secado y cocción no controlados. Asimismo, la mayoría de los artesanos no tienen el suficiente conocimiento técnico sobre las propiedades de los minerales arcillosos, los efectos de la formulación de barbotinas sobre los productos, y las pruebas de control de calidad que deben realizarse a la materia prima, barbotinas y productos cerámicos terminados (Durán, Montoya, Silva, Peralbo y Castro, 2014, p. 287).

Para contribuir a la reducción de esta problemática se deben implementar procesos estandarizados para la elaboración de piezas cerámicas, que permitan predecir el comportamiento en las propiedades finales del producto a partir del estudio de la composición físico-química, cerámica y mineralógica de las materias primas (arcilla, feldespato y cuarzo), las propiedades finales del producto y las adecuadas técnicas de elaboración (Cely y Bolívar, 2015, p. 85).

Estudios recientes relacionados con la producción de cerámica artesanal recalcan la importancia de implementar procesos estandarizados que permitan predecir el comportamiento en las propiedades finales del producto. Se han estudiado las características físicas, superficiales y de densidad de las

arcillas para obtener piezas cerámicas artesanales de buena calidad, que presenten baja absorción de agua y alto módulo de ruptura (Sarango, 2011, p. 94; Santos, Malagón, y Córdoba, 2011, p. 54; Grimán, Lascano, Rojas y Uribe, 2015, p. 14). Se ha estudiado también la producción de piezas cerámicas, obtenidas a partir de barbotinas, que presentan alta resistencia a la flexión (Fajardo, 2017, pp. 107-127). Por otra parte, investigaciones en el sector de fabricación cerámica han logrado una mejora de 50 % en la resistencia a la flexión y de 50 % en la vida útil de la pieza mediante el control de la temperatura durante el proceso de cocción (BREF, 2011, p. 295). Por lo tanto, es importante considerar que para una adecuada formulación de barbotinas se deben evaluar las propiedades del producto terminado (piezas quemadas), como pueden ser absorción de agua, porosidad y resistencia mecánica a la flexión, debido a que están relacionadas con la resistencia y durabilidad de la pieza.

Por lo expuesto, la presente investigación propone el aprovechamiento de minerales arcillosos del Ecuador para elaborar barbotinas de uso artesanal, siguiendo normas y procedimientos establecidos en la industria cerámica. El empleo de estas barbotinas permitirá que los artesanos elaboren sus productos cerámicos a partir de procesos controlados bajo especificaciones técnicas, con el fin de obtener mayor valor agregado y garantía de calidad en sus productos.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1. MINERALES ARCILLOSOS

Los minerales arcillosos son hidrosilicatos de aluminio de fórmula general $n\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot m\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$, en donde n, m y x son constantes que dependen de su formación mineral. Constituyen gran parte de la corteza terrestre externa y se los puede clasificar en plásticos y no plásticos. El conocimiento de sus características y propiedades es importante cuando se desea formular pastas o barbotinas cerámicas (Güeto, 2005, p. 51).

1.1.1. MINERALES ARCILLOSOS PLÁSTICOS

Los minerales arcillosos plásticos son esencialmente arcillas y caolines. Las arcillas son rocas constituidas por diferentes fuentes minerales, que se encuentran sedimentadas en forma de láminas y que poseen tamaños de partícula menores a $2 \mu\text{m}$ (SACMI, 2004, p. 47).

1.1.1.1. Composición química de las arcillas

Generalmente, la composición de las arcillas comprende: Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , en las proporciones que se muestra en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Composición química de una arcilla.

Sustancia	Composición (%)
Al_2O_3	24-38
SiO_2	38-65
Fe_2O_3	0-11
CaO	0-15
MgO	0-7
$\text{Na}_2\text{O}/ \text{K}_2\text{O}$	0-4
TiO_2	0-2

(Güeto, 2005)

La composición química de las arcillas les permiten poseer como características principales: coloraciones que van de gris a rojo oscuro, índices de plasticidad entre 8-60 %, pérdidas al fuego entre 9-17 % y roturas a la flexión en seco de aproximadamente 40 kg/cm², entre otras (Güeto, 2005, p. 52).

1.1.1.2. Estructura de las arcillas

Las arcillas están conformadas por láminas que pueden dar lugar a fenómenos de desplazamiento unas sobre otras; estructura que caracteriza a los filosilicatos. Los filosilicatos son silicatos hidratados de aluminio, hierro y magnesio que se encuentran apilados en planos de iones oxígeno e hidroxilo como se observa en la Figura 1.1 (Tufiño, Vieira, Lascano y Guerrero, 2012, p. 1)

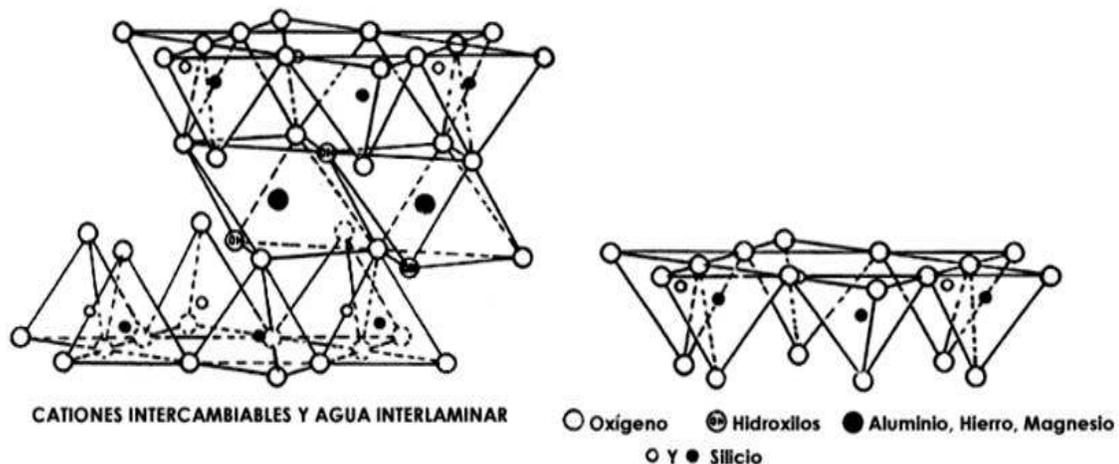


Figura 1.1. Estructura laminar de la arcilla
(Dominguez y Schifter, 2003)

1.1.1.3. Clases de arcillas

Las arcillas son muy diversas, debido a las innumerables combinaciones de roca inicial, condiciones morfológicas y climáticas, tipo de erosión,

sedimentación, estado, y tiempo del yacimiento (SACMI, 2004, p. 47). Sin embargo se las puede clasificar en arcillas comunes, arcillas especiales y caolines.

- **Arcillas comunes**

Son aquellas que se encuentran distribuidas ampliamente en afloramientos minerales. Su composición mineralógica es variada; posee mayormente micas y en menor proporción caolinita y esmectitas. Tienen baja plasticidad debido a su granulometría variada y presencia de desengrasantes naturales como cuarzo y carbonatos. Se emplean en la industria cerámica alfarera y de construcción, esencialmente para la producción de tejas, ladrillos y azulejos. El color de quema de los productos es rojo, debido a la presencia de hierro (Díaz y Torrecillas, 2002). En Ecuador las arcillas comunes están distribuidas en las provincias de Napo y Zamora (Uribe, 2015).

- **Arcillas especiales**

Son aquellas cuyas composición mineralógica y propiedades son conocidas en la industria cerámica. Están compuestas por esmectitas. Se caracterizan por poseer gran capacidad de adsorción. En la Tabla 1.2 se detallan sus tipos y nombres comerciales (Díaz y Torrecillas, 2002).

Tabla 1.2. Nombres comerciales de las arcillas especiales

Mineral predominante	Nombre tradicional
Montmorillonita de sodio	Bentonita Sintética
Montmorillonita de calcio	Bentonita no hinchable
Montmorillonita de magnesio	Piedra de jabón
Montmorillonita de potasio	Metabentonita
Montmorillonita de magnesio y litio	Hectorita
Palygorskita	Lana de montaña
Sepiolita de sodio	Loughlinita

(Díaz y Torrecillas, 2002)

En Ecuador las arcillas especiales están distribuidas en las provincias de Azuay, Cañar, Chimborazo, Loja y Manabí. Las arcillas especiales de tipo esmectita pueden usarse en cerámica roja (Uribe, 2015).

- **Caolines**

Son las arcillas más utilizadas en la industria cerámica, se encuentran constituidas esencialmente por caolinita. En estado natural y cuando son quemadas presentan una coloración blanca o casi blanca, por lo que se utiliza en la industria de cerámica blanca (Díaz y Torrecillas, 2002).

1.1.1.4. Propiedades de las arcillas

El conocimiento de las propiedades de las arcillas es importante en la industria cerámica. Entre las propiedades más importantes están su granulometría, plasticidad, comportamiento al secado y transformaciones físico-químicas durante la cocción.

- **Granulometría**

La granulometría de un mineral sirve para clasificarlo según su tamaño de partícula. En la Tabla 1.3 se muestra la clasificación de los minerales arcillosos según la distribución del tamaño de partícula, en donde se observa que las arcillas presentan diámetros de partícula menor a 2 μm , propiedad que les confiere una gran superficie de contacto (Güeto, 2005, p. 59).

Tabla 1.3. Clasificación de los minerales arcillosos según su granulometría

Tamaño de partícula (Φ)	Mineral
$\Phi < 2 \mu\text{m}$	Arcillas
$2 < \Phi < 60 \mu\text{m}$	Limos
$\Phi > 60 \mu\text{m}$	Arenas

(Manoharan, Sutharsan, Dhanapandian y Venkatachalapathy, 2012)

La granulometría de las arcillas influye en su comportamiento durante los procesos tecnológicos de secado y cocción, y afecta varias propiedades de los productos cerámicos, tales como la plasticidad, la microestructura y las propiedades mecánicas de los materiales cocidos. Las fracciones de arcilla están asociadas con minerales muy finos que son los principales responsables de la plasticidad, una alta plasticidad se debe a la presencia de una alta fracción de arcilla y una baja plasticidad es debida a una alta cantidad de limo y arena. Las fracciones arcillosas para una arcilla se encuentran en una proporción mayor al 60 %, mientras que para los limos y arenas son menores al 60 % (Manoharan, Sutharsan, Dhanapandian y Venkatachalapathy, 2012).

- **Plasticidad**

La plasticidad es una propiedad de las arcillas que permite establecer las condiciones sobre las cuales, al añadirseles agua, serán deformadas sin presentar rotura cuando se ejerce una fuerza suficiente para causar la deformación y que les permiten retener su forma después de que la fuerza aplicada ha sido eliminada. Las arcillas altamente plásticas requieren menos fuerza para la deformación y no se agrietan, mientras que las de baja plasticidad se deforman y agrietan rápidamente (Andrade, Al-Qureshi y Hotza, 2011).

- **Comportamiento al secado**

Durante el secado controlado de una arcilla se presenta un proceso de contracción, que se expresa en tanto por ciento. Existen tres tipos de contracción de las arcillas: contracción al secado, contracción a la quema y contracción total. La contracción al secado de las arcillas oscila entre 2 y 3 % y 10 y 12 %, en función del contenido de fracciones arcillosas finas. Esta contracción puede disminuir si a las arcillas se les añade materiales desengrasantes como arena o escoria granulada. La arena se puede añadir si posee un tamaño de partícula entre 0,5 y 2,0 mm, en una proporción entre 10

y 25 %; en caso de añadir más arena se pierde resistencia mecánica y resistencia en frío de los productos cerámicos. Por otra parte la contracción a la quema oscila entre 2 y 8 % dependiendo del tipo de arcilla. La contracción total es la suma de la contracción al secado y la contracción a la quema, oscila entre 5 y 18 % (Restrepo, 2011, pp. 19-20).

1.1.2. MINERALES ARCILLOSOS NO PLÁSTICOS

Los minerales arcillosos no plásticos son aquellos que al ser introducidos en una pasta o barbotina cerámica, actúan principalmente como desengrasantes. Los principales minerales arcillosos no plásticos son: la sílice, que actúa como mineral inerte; los feldespatos y los óxidos de hierro, que actúan como pigmentos y en ciertos casos como fundentes (Galán y Aparicio, 2005).

1.1.2.1. Feldespatos

Los feldespatos son minerales arcillosos abundantes en la corteza terrestre, en menor proporción que la arcilla; están formados por silicoaluminatos de potasio, sodio, calcio o bario, y cuya composición química y mineral depende de su tipo de especie, como se muestra en la Tabla 1.4 (Güeto, 2005, p. 82).

Tabla 1.4. Composición química y mineral de las principales especies de feldespatos

Tipo de feldespato	Minerales presentes	Composición química
Potásico ($K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$)	Microclina y ortosa	16,90 % K_2O 18,40 % Al_2O_3 64,70 % SiO_2
Sódico ($Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$)	Albita	11,80 % Na_2O 19,40 % Al_2O_3 68,80 % SiO_2
Cálcico ($CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$)	Anortita	20,16 % CaO 36,65% Al_2O_3 43,19 % SiO_2

(Güeto, 2005)

Los feldespatos poseen puntos de fusión alrededor de 1 160 °C. Se emplean en productos cerámicos para disminuir el punto de fusión, lo cual constituye un aspecto técnico-económico importante, pues permite elaborar piezas cerámicas a una temperatura de cocción menor a las temperaturas normales del proceso (Güeto, 2005, p. 84).

1.1.2.2. Arenas o sílice

La sílice (SiO_2) es el óxido más abundante en la naturaleza, después de las arcillas y los feldespatos; se acumula como arena y grava. Sus puntos de fusión están comprendidos entre 1 610 y 1 763°C. Puede presentarse en formas alotrópicas diferentes, como se muestra en la Tabla 1.5 (Güeto, 2005, p. 72):

Tabla 1.5. Formas alotrópicas de la sílice

Forma	Sistema cristalográfico
Cuarzo α	Romboédrico
Cuarzo β	Hexagonal
Tridimita α y β	Ortorómbico
Cristobalita α y β	Tetragonal
Sílice amorfa	Amorfo

(Güeto, 2005)

La sílice se emplea en pastas o barbotinas cerámicas en proporciones medianamente elevadas, en función de la aplicación que se desea que desempeñe. Pueden usarse para aumentar la blancura y temperatura de quema, reducir la plasticidad (disminuyendo la contracción y deformación en el secado y cocción) y como material desengrasante. En altas proporciones puede ocasionar saltos bruscos en los coeficientes de dilatación, provocando fisuraciones del material. La forma más idónea de usarla es como tridimita debido a que posee bajos coeficientes de dilatación (Güeto, 2005, p. 80).

1.1.3. MINERALES ARCILLOSOS EN EL ECUADOR

Los minerales arcillosos representan alrededor del 20 % de la riqueza mineral no metálica del Ecuador (Uribe, 2015). En 2015, la producción minera para reservas no metálicas contabilizó: 479 622 t de arcilla, 3 809 822 t de caliza, 63 829 t de caolín, 247 253 t de feldespato y 84 473 t de sílice (BCE, 2017, p 10). Esta disponibilidad de recurso mineral ha permitido su aprovechamiento en distintas provincias del Ecuador, como se muestra en la Tabla 1.6 (Uribe, 2015).

Tabla 1.6. Aprovechamiento de minerales arcillosos en distintas provincias del Ecuador

Provincia	Mineral arcilloso presente	Aplicación
Azuay	Arcillas caoliníticas y esmectíticas	Fabricación de cerámica plana, artística y de vajillas.
Bolívar	Arcillas caoliníticas y feldespatos	Elaboración de ladrillos
Cañar	Arcillas caoliníticas y feldespatos	Elaboración de ladrillos
Carchi	Arcillas caoliníticas y feldespatos	Fabricación de ladrillos y tejas
Cotopaxi	Pómez y lapilli	Figuras artesanales de barro y alfarería
Chimborazo	Ceniza volcánica con componentes feldespáticos y material amorfo	Elaboración de ladrillos
El Oro	Arcillas para la elaboración de ladrillos, gravas, caolín y feldespato	Elaboración de ladrillos y cerámica fina.
Esmeraldas	Arcillas caoliníticas y feldespatos	Elaboración de ladrillos
Guayas	Piedra caliza y arcilla	Elaboración de ladrillos
Imbabura	Piedra caliza	Elaboración de cemento
Loja	Arcilla para ladrilleras y arenas	Elaboración de ladrillos
Los Ríos	No existe	No existe
Manabí	Arcilla de quema blanca importada y arcillas de la zona	Figuras artesanales
Morona Santiago	Arcillas caoliníticas	Fabricación de ladrillos y tejas
Napo	Piedra caliza, arcillas, carbonato de calcio, yeso, bentonita, diatomita y caolín	No existe
Pastaza	Sílice, caolín, arcillas y calizas	No existe
Pichincha	Arcillas, limos y lutitas	Fabricación de ladrillos y tejas
Tungurahua	Arcillas caoliníticas y feldespatos	Fabricación de ladrillos
Zamora Chinchipe	Arena silícea y feldespato	Fabricación de cerámica roja

(Uribe, 2015)

1.2. PASTAS-BARBOTINAS CERÁMICAS

La mezcla de agua con arcilla y otros minerales no plásticos se conoce como pasta cerámica cuando contiene entre 20-25 % de humedad, y barbotina cerámica cuando contiene entre 60-70 % de humedad. Las pastas cerámicas se emplean para moldeo, mientras que las barbotinas se emplean para colado (Sancho, 2013, p. 1).

1.2.1. COMPOSICIÓN DE PASTAS - BARBOTINAS CERÁMICAS (MEZCLAS TRIAXIALES)

La composición de las pastas o de las barbotinas cerámicas se puede realizar con base en un diagrama triaxial, en donde se fijan las proporciones de minerales arcillosos que deben añadirse a la pasta o barbotina según el producto comercial de interés, como se muestra en la Figura 1.2. La preparación de las mezclas es generalmente en peso o porcentaje en peso, en cada esquina del diagrama se encuentran los componentes puros y en el centro los puntos de mezcla.

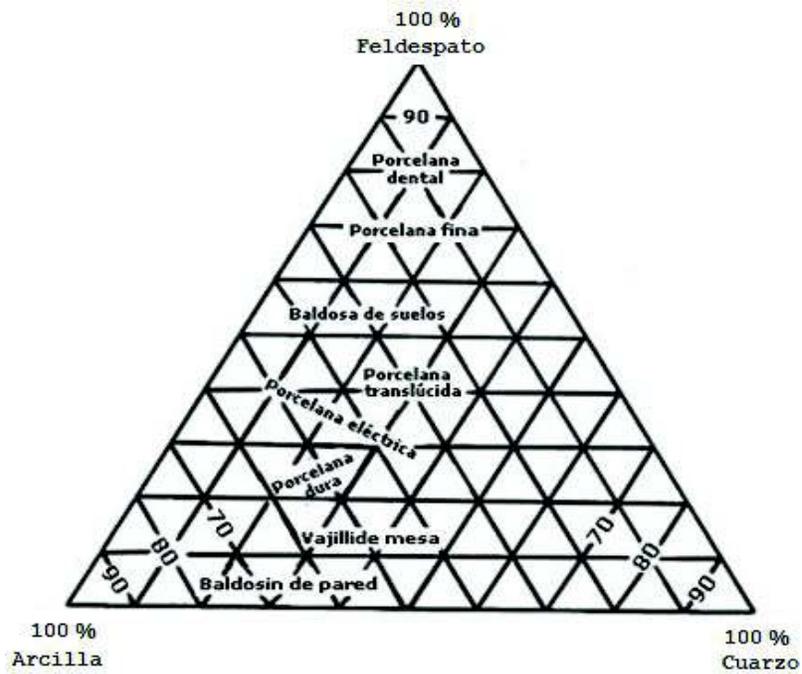


Figura 1.2. Diagrama triaxial según varios productos cerámicos comerciales (Singer y Singer, 1971)

Las barbotinas además de contener minerales arcillosos y agua, puede contener floculantes y defloculantes, conocidos como sustancias auxiliares, que son fundamentales para la elaboración de la barbotina. Los floculantes y defloculantes, son sustancias que ayudan a aglomerar o espesar la mezcla (Pilaguano, 2007, p. 19). En la industria cerámica generalmente se emplean como defloculantes inorgánicos: silicatos, fosfatos, carbonatos y sales de sodio, y defloculantes orgánicos como: sales de poliacrilatos de distinta composición estructural (Ortega, 2013, p. 28).

La composición también se puede determinar empleando un criterio de proporcionalidad de mezclas con un diseño experimental tipo Simplex-Centroide, el cual permite obtener puntos de mezcla alrededor de un punto de interés, como se muestra en la Figura 1.3:

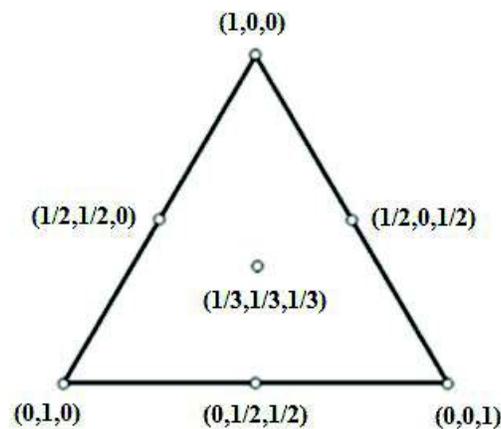


Figura 1.3. Distribución de puntos experimentales en un modelo Simplex-Centroide (Nepomucena, Maciel y Cirillo, 2013)

En la Figura 1.3 los puntos en las esquinas: $(1, 0, 0)$, $(0, 1, 0)$, $(0, 0, 1)$ representan mezclas puras, es decir, un solo componente que puede ser arcilla, feldespato o cuarzo; un punto en la línea del diagrama representa dos componentes o mezclas binarias; y los puntos dentro del diagrama representan mezclas formadas por todos los ingredientes en cantidades proporcionales. Con las composiciones de las pastas o barbotinas cerámicas se pueden realizar los cálculos de formulación para posteriormente preparar barbotina vía molienda en húmedo y a partir de la barbotina preparar pasta en moldes de yeso.

1.2.1.1. Formulación barbotinas cerámicas

La formulación de barbotinas cerámicas se realiza a partir de la masa seca de los componentes considerados en el diagrama triaxial y la masa de agua (m_a); necesarios para preparar 1 litro de barbotina (Amorós, 2004, pp. 145-147). La masa seca se calcula mediante la Ecuación 1.1.

$$m_s = K(P - 1) \quad [1.1]$$

Donde:

m_s = masa seca total de arcilla, cuarzo y feldespato por litro de barbotina (kg/L)

K = constante de densidad

P = Peso por litro de barbotina (kg/L)

El peso por litro (P) de barbotina es un valor fijo, determinado por el experimentador a partir de un valor referencial de barbotina.

El cálculo de la constante de densidad se realiza empleando la Ecuación 1.2.

$$K = \frac{\rho}{\rho - 1} \quad [1.2]$$

Donde:

ρ = densidad absoluta de arcilla, cuarzo y feldespato en la formulación (g/cm^3)

K = constante de densidad

La densidad absoluta del total de arcilla, cuarzo y feldespato viene dada como la sumatoria del aporte de densidad de cada materia prima en la formulación. Se calcula como se observa en la Ecuación 1.3.

$$\rho = \sum_{i=1}^n (\rho_i)(V_i) \quad [1.3]$$

Donde:

ρ_i = densidad de cada mineral arcilloso (g/cm^3)

V_i = proporción de cada mineral arcilloso en la formulación (%)

ρ = densidad total de los minerales arcillosos (g/cm^3)

La masa de agua por litro se determina mediante la Ecuación 1.4.

$$m_a = (P - m_s) \quad [1.4]$$

Donde:

m_s = masa seca total de arcilla, cuarzo y feldespato por litro de barbotina (kg/L)

P = peso por litro de barbotina (kg/L)

m_a = masa de agua por litro de barbotina (kg/L)

Una vez obtenida la cantidad total de arcilla, cuarzo, feldespato y agua de la formulación, se procede a calcular la cantidad individual de arcilla, cuarzo y feldespato siguiendo el orden de cálculo que se muestra en la ficha de la Figura 1.4.

Cantidad de materia prima					
Materia prima	(1) Proporción M.P. (%)	(2) Densidad (g/cm^3)	(3) ((1)*(2))/100 Aporte de densidad M.P. (g/cm^3)	(4) (((1)*(ms))/100) Proporción ms en (kg/L) (M.P./1L barbotina)	(5) ((4)*4 L barbotina) Proporción ms en (kg) (M.P./1L barbotina)* _ L barbotina
Composición	$\Sigma=100$	-	$\Sigma\rho =$ en (kg/cm^3)	$\Sigma m_s =$ en (kg/L)	$\Sigma m_a =$ en (kg/L)
Condiciones de preparación de la barbotina					
				1L barbotina	_ L barbotina
					_ L barbotina
Cantidad de barbotina		L en (L)			
Peso por litro de barbotina requerido : P	[P= (ms+ma) en (kg/L)]				
Constante de densidad de M.P.:	K [K=($\rho/(\rho-1)$) adimensional]				
Masa seca de M.P.:	ms [ms=K(P-1)] en (kg/L)				
Masa de agua:	ma [ma=(P-ms) en (kg/L)]				

Figura 1.4. Ficha de cálculo para la formulación de barbotinas a partir de una composición dada

1.2.1.2. Proceso de elaboración de barbotinas cerámicas

Las barbotinas cerámicas son preparadas mediante la mezcla de polvo de cerámica (arcilla con otros minerales), solvente y defloculante (Evcin, 2011). Las barbotinas se utilizan particularmente en procesos de colado en moldes porosos y colado a presión, para dar forma a objetos de forma compleja (decorativos o vajilla) y/o industriales (sanitarios) (Fantozzi, Nièpce y Bonnefont, 2013, p.14).

Las barbotinas cerámicas que son empleadas para la producción de artículos sanitarios siguen la siguientes etapas de elaboración: 1) mezcla de materias primas con agua y defloculante, 2) molienda, 3) colado, 4) secado de las piezas a 40 °C, 5) sinterizado a 1 150 °C y 6) caracterización de las piezas sinterizadas (Parveen y Jahan, 2010). Si se toma como referencia este procedimiento, de manera general, el proceso de elaboración de barbotinas cerámicas se puede representar como se muestra en la Figura 1.5.

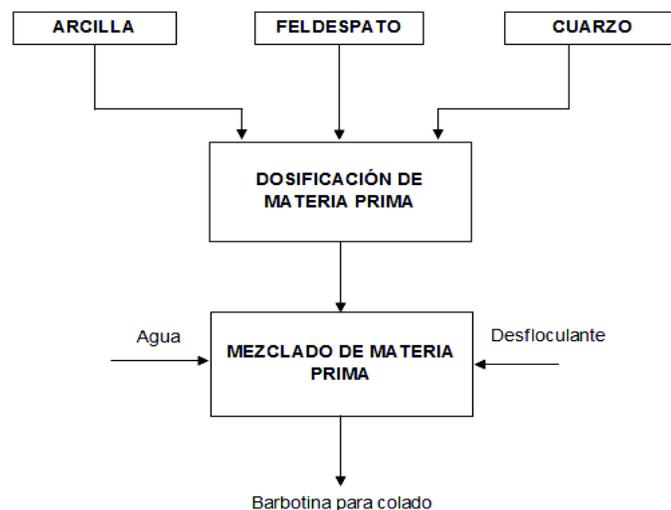


Figura 1.5. Diagrama de elaboración de barbotinas cerámicas

En la Figura 1.5 se observa que los minerales arcillosos entran al proceso de mezcla en proporciones determinadas según los requerimientos de producción. Las mezclas generalmente se realizan en molinos de bolas, proceso durante el cual se añade agua y defloculante. Se pueden usar como defloculantes a los electrolitos básicos (sales o iones), como el silicato de

sodio, en una relación molar $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ entre 1,30 y 1,40 ya que aumentan el poder de fluidificación, mientras que los ácidos provocan la coagulación o floculación (Güeto, 2005, p 61).

1.2.1.3. Proceso de elaboración de pastas cerámicas

La elaboración de pastas cerámicas puede realizarse por tres procedimientos que se eligen según la conformación de las piezas, y son: 1) por amasado plástico, 2) en estado semiplástico o semiseco y 3) por vía húmeda o barbotina. Los procesos se muestran en la Figura 1.6 (Güeto, 2005, p. 239):

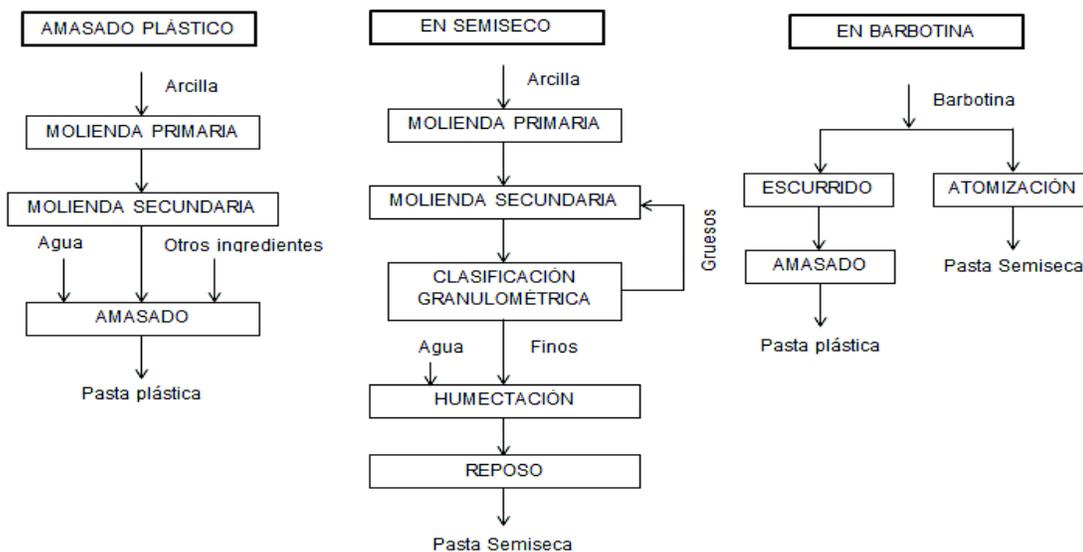


Figura 1.6. Diagrama de elaboración de pastas cerámicas (Güeto, 2005)

En la industria cerámica artesanal resulta conveniente la elaboración de pasta cerámica a partir de una barbotina que ha permanecido en reposo, ya que se aprovecha la barbotina que ha sido usada previamente en el colado de piezas cerámicas. Una barbotina que ha permanecido en reposo sedimenta rápidamente por lo que debe pasar por un proceso de mezcla durante mínimo 30 min. Posteriormente pasa a ser escurrida sobre moldes de yeso hasta obtener una pasta que pueda ser moldeada fácilmente. Las pastas moldeadas se dejan en reposo durante al menos 72 h, pero es importante considerar que a mayor tiempo de maduración se tendrá pastas más manejables.

1.2.2. PROPIEDADES DE LAS BARBOTINAS CERÁMICAS

Las propiedades que se consideran en la preparación y control de barbotinas cerámicas son: viscosidad, tixotropía, densidad, contenido de sólidos, granulometría, comportamiento al moldeo y las propiedades físicas y mecánicas de pastas elaboradas a partir de barbotinas (SIBELCO EUROPE, 2010, pp. 1-6).

1.2.2.1. Viscosidad

La viscosidad es la medida de la resistencia que presenta una sustancia líquida a fluir. Se clasifica en viscosidad aparente y viscosidad cinemática.

La ecuación que gobierna este fenómeno es la ecuación de Newton, representada por la Ecuación 1.5, que dice que el esfuerzo de corte que se imprime a un fluido es proporcional al gradiente de velocidad que se origina, siendo la constante de proporcionalidad entre ambas magnitudes, la viscosidad aparente del fluido (Portillo, Lázaro y García, 2011, p.16).

$$E = \eta * G \quad [1.5]$$

Donde:

E = esfuerzo de cizalladura (N/m²) o (dina/cm²)

G = gradiente de velocidad (s⁻¹)

η = viscosidad aparente del fluido (Pa.s) o (g/cm.s \approx cP)

La densidad del material influye en el desplazamiento del fluido, de modo que la viscosidad cinemática es igual a la viscosidad dividido para la densidad, como se muestra en la Ecuación 1.9 (Portillo et al., 2011, p.17).

$$\mu = \frac{\eta}{\rho} \quad [1.6]$$

Donde:

η = viscosidad (Pa.s) o (g/cm.s, Poise)

ρ = densidad del fluido (kg/m³) o (g/cm³)

μ = viscosidad cinemática, (m²/s) o (cm²/s, Stoke)

En la Tabla 1.7 se muestran los valores de viscosidad aparente y viscosidad cinemática para barbotinas cerámicas de porcelana sanitaria y gres porcelánico que contienen 65 % en sólidos.

Tabla 1.7. Viscosidad para barbotinas de porcelana sanitaria y gres porcelánico

	Sanitario 65 % Sólidos	Porcelánico 65 % Sólidos
Densidad (g/cm³)	1,69	1,70
Viscosidad cinemática(cSt)	106	406
Viscosidad dinámica (cP)	179	690

(Portillo, Lázaro y García, 2011)

1.2.2.2. Tixotropía

La tixotropía es una propiedad física que se presenta en líquidos no newtonianos en los que al finalizar el cizallamiento, solo recuperan su elevada viscosidad tras un lapso de tiempo. Cuando se aplica un gradiente de velocidad y un tiempo de cizalladura crecientes, la viscosidad decrece (Portillo et al., 2011, p. 24). Las barbotinas cerámicas presentan comportamiento trixotrópico, sin embargo es necesario añadir desfloculantes que permitan obtener una ligera tixotropía a fin de lograr procesos de colado adecuados (Portillo et al., 2011, pp. 125).

1.2.2.3. Densidad

La densidad es la propiedad física que relaciona la masa de una sustancia sólida o líquida con el volumen que ésta ocupa. En barbotinas o suspensiones cerámicas la densidad se encuentra en función del porcentaje de sólidos. Para

barbotinas o pastas cerámicas se suele trabajar con porcentajes de sólidos entre 50-70 %, obteniéndose barbotinas cuyas densidades oscilan entre 1,5-1,8 g/cm³ (Portillo et al., 2011, p.93).

En barbotinas cerámicas, una mayor densidad facilita el proceso de secado, se obtienen piezas más resistentes, disminuye el defecto de mancha de colada y aumenta la viscosidad (Portillo et al., 2011, p.94). Sin embargo, valores de densidad elevados dificultan el proceso de colado.

1.2.2.4. Contenido de sólidos

El contenido de sólidos, en una suspensión o mezcla líquida, indica la relación porcentual entre la cantidad sólidos y la cantidad total de la mezcla. Tiene una relación directamente proporcional con la viscosidad (Solera, Jardiel, Villegas y Fernández, 2002, p.167).

Se ha demostrado que la relación sólido/agua para preparar barbotinas cerámicas con suficiente fluidez es 65/35 (Evcin, 2011, p.2304). A una barbotina cerámica que posee un elevado contenido de sólidos es necesario añadirle desfloculante a fin de que presente una buena fluidez frente al colado (Portillo et al., 2011, p.69).

En la preparación de barbotinas cerámicas es común calcular la masa total de la materia prima seca en la formulación, a partir de su contenido en sólidos (% en peso) y la densidad real de sus componentes, como se muestra en el Anexo I (Portillo et al., 2011, p. 68).

1.2.2.5. Granulometría en húmedo

La granulometría es la propiedad que permite conocer la distribución de las partículas arcillosas de un mineral seco o de una suspensión cerámica, empleando para ello tamices ASTM de diferente apertura de malla. La

granulometría para barbotinas cerámicas se determina después del proceso molienda; una granulometría con un tamaño de partícula menor a 45 μm permitirá obtener barbotinas más estables que no sedimentan rápidamente (Portillo et al., 2011, p.180)

1.2.2.6. Comportamiento al moldeo

La evaluación del comportamiento al moldeo de una barbotina cerámica se realiza con el fin de conocer el tiempo de formación y consolidación de las piezas en moldes de yeso hasta conseguir una resistencia adecuada para su manipulación previo al secado (The American Ceramic Society, 2015). Es importante considerar que para el proceso de colado se requiere barbotinas que posean un contenido en sólidos entre 70-75 % en peso (equivalente a densidades entre 1,75-1,85 g/cm^3) (Goodman, Stirling y Shaw, 1999).

El comportamiento al moldeo de una barbotina cerámica se determina mediante los ensayos de rata de colada y tiempo de secado.

La rata de colada permite conocer si el molde de yeso es lo suficientemente poroso como para eliminar el agua durante el proceso de colado y así lograr el espesor adecuado del cuerpo en verde. Se ha demostrado que una velocidad de colado cercana $4 \times 10^{-4} \text{ g/s.cm}^2$ es adecuada para el colado de barbotinas de sanitarios (Ochoa, Gutiérrez, Rendón y Rodríguez, 2017, pp. 267-268).

Cuando una barbotina se vierte en un molde de escayola, el agua se absorbe en el molde dejando una capa sólida en la pared cuyo espesor depende del tiempo, este tiempo se conoce como tiempo de secado (Edoziuno et al, 2016, p. 41). El espesor de pared depende de los requerimientos de la industria; por ejemplo, para productos industriales de porcelana vitrificada se requieren espesores entre 6,5-7,0 mm con un tiempo de secado de una hora, pero para productos cerámicos artesanales se puede trabajar con espesores entre 2-3 mm en un tiempo de secado alrededor de 10 min (Martini, Fortuna D., Fortuna A., Rubino, Tagliaferri, 2017, p.545).

El proceso de elaboración de barbotinas cerámicas debe controlarse cuidadosamente con el fin de obtener piezas de buena calidad y de alta resistencia. El control se efectúa sobre los procesos críticos que influyen significativamente sobre las propiedades de los productos cerámicos, tales como: la evaluación físico-química de las materias primas a emplear, el proceso de molienda, la evaluación física de las barbotinas y la evaluación mecánica de las pastas cerámicas obtenidas a partir de las barbotinas (Richerson, 2005, p. 422).

El control de la evaluación química permite establecer la aplicación de las materias primas, en la elaboración de determinados productos cerámicos, con base en su composición química y mineralógica, cuando no es suficiente la evaluación física. Los análisis que se pueden emplear en la evaluación química son la difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X, absorción química, etc. (Güeto, 2005, p. 112).

El control en la molienda se realiza con el fin de asegurar una mezcla homogénea en el menor tiempo posible. El proceso de molienda está determinado por: las características del material a moler y la granulometría. En un molino de bolas las mejores condiciones se consiguen con una carga de bolas del 50 % de la carga del material a moler (Güeto, 2005, pp. 241-243).

La evaluación de las barbotinas y de las pastas cerámicas se realiza con el fin de asegurar que los productos cerámicos cumplan con las especificaciones técnicas establecidas en la industria cerámica (Güeto, 2005, p.113). Para las barbotinas cerámicas se consideran como propiedades de control a la densidad, viscosidad y porcentaje de retenido, absorción de agua, porosidad total y resistencia mecánica a la flexión.

1.3. PRODUCTOS CERÁMICOS ARTESANALES

La cerámica artesanal hace referencia a los productos elaborados a partir de materia prima arcillosa, que emplea maquinaria simple, y técnicas de colado o

moldeo. Este tipo de cerámica se produce en talleres o microempresas familiares (CENDAR, 2001). Los productos cerámicos artesanales transmiten la cultura y conocimiento de cada país en donde han sido elaborados (Slattery, 2010, p. 22).

1.3.1. TIPOS DE PRODUCTOS CERÁMICOS ARTESANALES EN EL ECUADOR

Los productos cerámicos son elaborados en todo el Ecuador, principalmente en las provincias de la Sierra, tal como se muestra en la Figura 1.8.

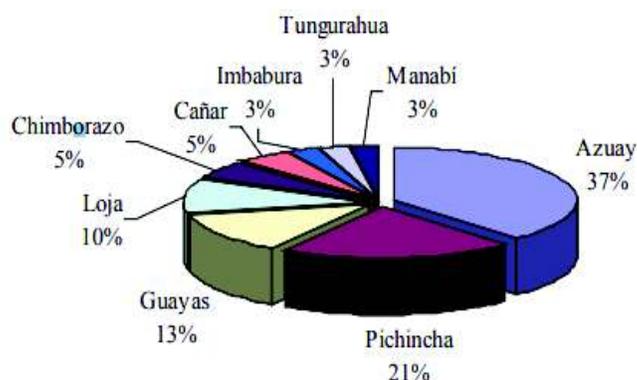


Figura 1.8. Distribución de actividad cerámica en el Ecuador en el año 2003
(Correa y Cuenca, 2011)

En la Figura 1.8 se observa la distribución de la actividad cerámica del Ecuador en el año 2003; las principales provincias de producción cerámica son Pichincha y Azuay, mismas que destacan por la producción de artesanía cerámica (Correa y Cuenca, 2011, p. 7).

En el Ecuador los productos cerámicos dividen a la industria en la producción de: cerámica blanca, cerámica roja, cemento, vidrios y refractarios, dentro de esta clasificación se ha desarrollado la cerámica tradicional para cerámica blanca (35 %) en las provincias de Pichincha y Azuay, y de cerámica roja (35 %) en las provincias de Pichincha, Chimborazo, Azuay, Cañar y Loja (Abad, 2013, p. 68).

Entre los productos elaborados para cerámica blanca y roja se encuentran: vajillas de porcelana, porcelana sanitaria y accesorios para baños, tejas, baldosas de

gres, baldosas y bloques para pisos, bloques y azulejos para paredes, adornos decorativos, adornos cerámicos, ladrillos, bloques de arcilla y adoquines (Abad, 2013, p. 69).

1.3.2. PROPIEDADES EN SERVICIO/USO DE LOS PRODUCTOS CERÁMICOS EN EL ECUADOR

Las propiedades en servicio/uso de los productos cerámicos son propiedades físicas y mecánicas que están relacionadas con la resistencia y durabilidad de la pieza. Para productos cerámicos estas propiedades son la porosidad, absorción de agua y resistencia mecánica a la flexión (Gajek, Rapacz-Kmita, Dudek y Partyka, 2016).

En un estudio se ha demostrado que los ladrillos cerámicos tienen un aumento de 28,05 % en la resistencia a la flexión cuando se varía su composición en arcilla, cuarzo y feldespato; y también se logra disminuir la absorción de agua en 14,59 % (Afanador, Ibarra y López, 2013, p.105). Por lo tanto, un producto cerámico resistente debe poseer alta resistencia mecánica a la flexión, baja porosidad y baja absorción de agua.

- **Absorción de agua**

La absorción de agua es la propiedad física de los productos cerámicos que se define como el cociente entre la masa de agua absorbida por la pieza y su masa seca (García, 1975).

En la fabricación de azulejos se emplean pastas cerámicas que pueden ser porosas o no porosas; durante la formulación de pastas porosas la absorción de agua debe poseer valores superiores al 10 %, mientras que en la formulación de pastas no porosas, especialmente en la elaboración de productos gresificados, la absorción de agua debe poseer valores de al menos 5 % (Parras, 2001).

- **Porosidad**

La porosidad es la propiedad física, de los productos cerámicos, que determina el porcentaje de volumen vacío en la pieza. Esta propiedad está determinada por el grado de sinterización que se obtiene después de la cocción y que influye sobre propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión, flexión, etc, y sobre propiedades como: impermeabilidad, desgaste, etc. (Güeto, 2005, p. 120).

La porosidad se obtiene mediante la suma algebraica de la porosidad abierta y la porosidad cerrada; la porosidad abierta es aquella que determina una red continua de conductos capilares comunicados entre sí, mientras que la porosidad cerrada es la que determina que no existan capilares abiertos en la pieza cerámica (Güeto, 2005, p. 121).

En piezas cerámicas de baja porosidad, se obtiene alta resistencia tanto mecánica como química. Por ejemplo, para gres porcelánico se buscan porosidades nulas con absorción de agua menor al 0,1 % (Gil et al, 2006).

- **Resistencia mecánica a la flexión o módulo de rotura**

La resistencia mecánica a la flexión o módulo de rotura es la propiedad que determina la resistencia de los productos cerámicos cuando son sometidos a un esfuerzo o tensión; la tensión necesaria permitirá que se propaguen los defectos de la pieza hasta que se rompa (Rendtorff, Garrido y Aglietti, 2009).

Durante la producción de piezas cerámicas uno de los mayores inconvenientes es el agrietamiento de las piezas, el cual se produce por las tensiones que se generan durante el moldeo o debido a un proceso de secado y cocción no controlados. Para baldosas cerámicas prensadas en seco se requiere una resistencia mínima a la flexión de 35 N/mm^2 y absorción de agua menor al 5 % (Lázaro, Portillo, De la Torre y Bastida, 2012, p. 203). Por lo tanto, en los productos cerámicos es importante la medición de la resistencia a la flexión a fin de conocer la durabilidad de la pieza.

2. PARTE EXPERIMENTAL

La parte experimental inició con el acondicionamiento de dos tipos de arcilla, dos tipos de feldespato y dos tipos de sílice, mediante trituración y molienda. Se seleccionó un tipo de cada mineral molido con base en los resultados obtenidos fluorescencia de rayos X y difracción de rayos X. Los minerales arcillosos seleccionados fueron caracterizados, y posteriormente estos se emplearon en la formulación de siete barbotinas cerámicas de distinta composición. Las barbotinas obtenidas fueron caracterizadas física y mecánicamente comparándolas con una barbotina comercial de uso actual en el mercado.

Con los resultados de la caracterización física y mecánica se estudió el efecto de las composiciones de las siete barbotinas sobre la absorción de agua, porosidad y resistencia a la flexión de las probetas cerámicas cocidas mediante un análisis de varianza con 95 % de confianza empleando el software estadístico Statgraphics Centurion XVI.

2.1. EVALUACIÓN DE LOS MINERALES ARCILLOSOS PROVENIENTES DEL ECUADOR

Para la evaluación de los minerales arcillosos se emplearon arcilla, feldespato y sílice. Se inició con el acondicionamiento de cada mineral mediante un proceso de trituración y molienda. La arcilla, feldespato y sílice molidos pasaron a ser caracterizados mediante fluorescencia de rayos X y difracción de rayos X y mediante un control por atributos (evaluación de propiedades cualitativas) y un control por variables (evaluación de propiedades cuantitativas)

2.1.1. ACONDICIONAMIENTO DE LA MATERIA PRIMA

La arcilla, feldespato y sílice que ingresaron al proceso de trituración y molienda fueron identificados considerando: el tipo de mineral (Arcilla: AR, Feldespato: FR,

y Sílice: SI), provincia de origen (p. ej. Napo: NP); año de manipulación (p. ej. 2017: 17) y repetición en la provincia de origen. La identificación de cada mineral se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Identificación de los minerales arcillosos empleados en el estudio

Mineral Arcilloso	Provincia de origen	Codificación
Arcilla limón	Morona Santiago	AR-MO-17-01
Arcilla D	Azuay	AR-AZ-17-01
Feldespato ercilia	Bolívar	FE-BO-17-01
Feldespato blanco	Bolívar	FE-BO-17-02
Sílice con medio contenido en hierro	Napo	SI-NP-17-01
Sílice blanca	Napo	SI-NP-17-02

Los minerales se presentaron como terrones de aproximadamente 5 cm de grosor, pasaron a trituración primaria en una trituradora de mandíbulas en la cual se redujo su tamaño hasta 10 mm. Luego pasaron a trituración secundaria en un molino de cono en el cual se redujo su tamaño hasta 2,5 mm. Para concluir con el acondicionamiento fueron tamizados con el tamiz ASTM # 16 (tamaño de partícula < 1,2 mm) y fueron almacenados en baldes al ambiente.

2.1.2. SELECCIÓN DE LOS MINERALES ARCILLOSOS CON BASE EN LA CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MINERALÓGICA

La selección de los minerales arcillosos se realizó con el fin de considerar un tipo de arcilla, un tipo de feldespato y un tipo de sílice para la formulación de las barbotinas, esto se efectuó con base en los resultados que se obtuvieron de la caracterización química realizada mediante fluorescencia de rayos X y la caracterización mineralógica realizada mediante difracción de rayos X.

La fluorescencia de rayos X se realizó en el equipo S8 Tiger (Bruker); el análisis proporcionó la composición porcentual de los minerales y se seleccionaron de acuerdo con los criterios y requerimientos que se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Criterios de selección para los minerales arcillosos

Mineral	Criterio de selección	Requerimiento
Arcilla	Contenido entre 50-60 % de SiO_2 , 20-30 % de Al_2O_3 y proporciones inferiores al 20 % en CaCO_3 y óxidos alcalinos	Se requiere esta composición propia de arcillas aptas para la fabricación de productos cerámicos (Santos et al., 2011)
Feldespatos	Contenido en óxidos de potasio y sodio entre 10-25 %	Se necesita introducir material fundente a la mezcla que contribuya a la disminución de la temperatura de cocción (Guzmán et al., 2013)
Sílice	Contenidos inferiores al 5 % en óxido de hierro (Fe_2O_3)	Se requiere piezas cerámicas de quema blanca (Galán y Aparicio, 2005)

Por otra parte, con el fin de identificar semi-cuantitativamente la naturaleza mineralógica de los minerales arcillosos, se realizó el análisis de los resultados obtenidos mediante difracción de rayos X en el equipo D8 Advance (Bruker).

Para las arcillas se determinó el índice de plasticidad a fin de conocer si eran del orden requerido para elaborar pastas plásticas. El índice de plasticidad debía ser superior al 10 % para considerar a la arcilla como adecuada para la fabricación de productos cerámicos (Santos et al., 2011). El índice de plasticidad se determinó con base en la norma *ASTM D4318: Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils* (ASTM, 2017) y se lo ubicó en el diagrama Casagrande de la Figura 2.1, a fin de clasificar a las arcillas. Los cálculos de índice de plasticidad se encuentran en el Anexo II.

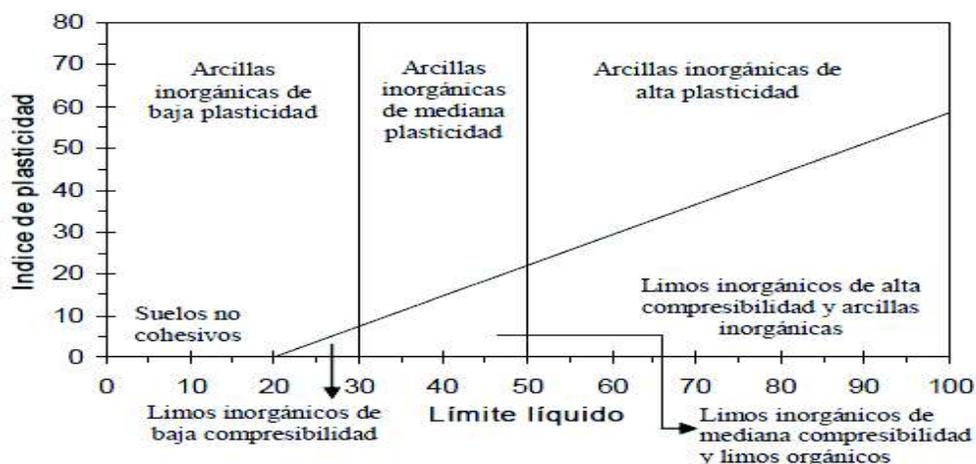


Figura 2.1. Diagrama Casagrande
(Santos et al., 2011)

2.1.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS MINERALES ARCILLOSOS SELECCIONADOS

Los minerales seleccionados fueron caracterizados mediante un control por atributos que consistió en la determinación de: color, presencia de impurezas, consistencia, sensación al tacto, textura y materia orgánica. Y, un control por variables que incluyó la determinación de la humedad, densidad y tamaño promedio en estado inicial.

El color de los minerales arcillosos se determinó para conocer la homogeneidad y posible presencia de hierro. Esto se realizó con base en la norma *ASTM D1535-14: Standard Practice for Specifying Color by the Munsell System*. Se empleó el Manual de Color Munsell para identificar el tono (ASTM, 2014-b).

La presencia de impurezas se determinó visualmente para conocer la homogeneidad de las muestras en cuanto a su constitución y evidenciar la presencia significativa de materiales inertes ajenos a la propia naturaleza mineralógica (Galán y Aparicio, 2005). Las impurezas en las arcillas como carbonatos, óxidos, e hidróxidos de hierro, disminuyen la temperatura de fusión mientras que las incrustaciones pétreas producen fisuras en los productos cerámicos (Restrepo, 2011, p.18).

La consistencia, textura y sensación al tacto se determinaron cualitativamente para clasificar a los minerales arcillosos según las manifestaciones que presentaron frente a los criterios establecidos en cada ensayo. Esto se realizó con base en la norma *ASTM D2488-09a: Standard Practice for Description and Identification of Soils (Visual-Manual Procedure)* (ASTM, 2009-a).

La consistencia permitió conocer las manifestaciones de las fuerzas físicas de cohesión y adhesión que presentaron los minerales arcillosos secos. El ensayo se realizó, presionando una muestra del mineral seco entre los dedos índice y pulgar. Se evaluó la consistencia de los minerales con base en los criterios de la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Consistencia de suelos

Consistencia	Características
Suelta	Presenta problemas para tomar un trozo y se rompe fácilmente
Frágil	El trozo es fácil de romper en pedazos usando una presión leve de los dedos índice y pulgar
Firme	El trozo se rompe en pedazos bajo una moderada presión de los dedos
Extra-firme	El trozo es muy resistente a la presión y difícil de romper en pedazos

(ASTM D2488-09, 2009-a)

La textura permitió clasificar a los minerales arcillosos según los criterios que se muestran en la Tabla 2.3. El ensayo se realizó colocando una pequeña cantidad de mineral seco sobre la palma de la mano y mediante la adición de agua se moldeó la muestra hasta adquirir alguna de las formas de la Tabla 2.4 y Figura 2.2.

Tabla 2.4. Textura de suelos

Textura	Características	Esquema
Arenoso	El mineral permanece flojo y separado, y añadiéndole agua se le da forma de pirámide	Figura 2.2-A
Franco arenoso	El mineral posee sedimento y añadiéndole agua se le da forma de bola	Figura 2.2-B
Franco limoso	El mineral posee sedimento y añadiéndole agua se puede moldear hasta formar un pequeño cilindro corto	Figura 2.2-C
Franco	El mineral contiene arena, sedimento y arcilla. Añadiéndole agua se puede formar un cilindro de 6 pulgadas de largo que se rompe al doblarlo	Figura 2.2-D
Franco arcilloso	El mineral contiene arena, sedimento y arcilla. Añadiéndole agua se puede formar un cilindro que se puede doblar en U	Figura 2.2-E
Arcilloso limoso	Añadiéndole agua se le puede dar forma de anillo, pero con grietas	Figura 2.2-F
Arcilloso	Añadiéndole agua se le da forma de anillo y no presenta grietas	Figura 2.2-G

(Euroconsultant, 1989)

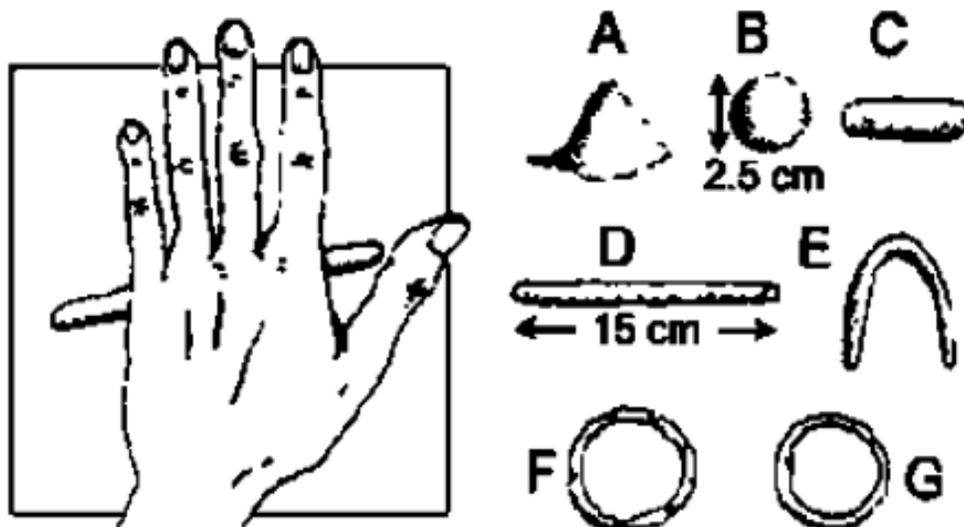


Figura 2.2. Ensayo de textura para suelos
(Euroconsultant, 1989)

La sensación al tacto permitió clasificar a los minerales como arenosos, plásticos o untuosos. El ensayo se realizó colocando una cantidad pequeña de mineral sobre la palma de la mano, se añadió agua y se frotó. La consistencia arenosa se evidenció cuando al frotar sobre la mano el mineral no se unta sino que trata de soltarse; una consistencia plástica se evidenció cuando al frotar sobre la mano se podía formar cilindros de aproximadamente 15 cm de longitud; y una consistencia untuosa se evidenció cuando al frotar sobre la mano el mineral se pega completamente.

La materia orgánica se determinó, a fin de conocer la existencia de material ajeno en las muestras. El ensayo cualitativo consistió en agregar gotas de peróxido de hidrógeno sobre la muestra. La efervescencia fue el indicador de la presencia de materia orgánica. El ensayo cuantitativo se realizó con base en la norma *ASTM D2974-00: Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils*. Los cálculos se presentan en el Anexo III (ASTM, 2014-c).

La humedad se determinó para conocer la cantidad de agua libre que está presente en los minerales arcillosos. Se calculó la humedad como se muestra en el Anexo IV (SACMI, 2004, p. 41).

La densidad absoluta se determinó para conocer el peso del mineral por unidad de volumen. Esto se realizó con base en la norma *ASTM C373: Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products*. El cálculo de densidad se muestra en el Anexo V (ASTM, 2006-a).

El tamaño en estado inicial de los minerales arcillosos se determinó para conocer las fracciones arcillosas que conforman a los minerales. Esto se realizó con base en la norma *ASTM C325: Standard Guide for Wet Sieve Analysis of Ceramic Whiteware Clays*. Los cálculos se muestran en el Anexo VI (ASTM, 2014-a).

2.2. DESARROLLO DE BARBOTINAS CERÁMICAS DE DISTINTA COMPOSICIÓN A PARTIR DE LA FORMULACIÓN DE MEZCLAS TRIAXIALES DE ARCILLA, FELDESPATO Y CUARZO

Se inició con la caracterización de una barbotina cerámica comercial de uso artesanal, a fin de emplearla en la comparación con las barbotinas experimentales. La formulación de las barbotinas partió del cálculo de las condiciones de preparación y cantidad de materia prima a utilizar, las cuales se pesaron y molieron. Se realizó un control de las condiciones de molienda y caracterización.

2.2.1. CARACTERIZACIÓN DE UNA BARBOTINA CERÁMICA COMERCIAL DE USO ARTESANAL

Para el desarrollo de barbotinas cerámicas de distinta composición en arcilla, feldespato y sílice, se partió de la caracterización de una barbotina cerámica comercial de uso artesanal actual en el mercado con el fin de tomar sus propiedades (densidad, viscosidad, etc.) como referencia para el control y

comparación con las propiedades que presenten las barbotinas desarrolladas experimentalmente.

La barbotina cerámica comercial fue obtenida de un taller artesanal ubicado en Quitumbe (Sur de Quito). A fin de garantizar la homogeneidad de la muestra patrón se mezclaron y reservaron cuarenta (40) litros de la misma.

La caracterización de la barbotina incluyó la determinación del contenido de sólidos, humedad, densidad, granulometría, viscosidad, tixotropía instantánea, tiempo de secado y rata de colada (SIBELCO EUROPE, 2010, pp. 1-6, 8-9).

El porcentaje de sólidos (% S_w) se determinó para conocer la cantidad de sólidos suspendidos en la barbotina. Esto se realizó con base en la norma *ASTM C1603-05a: Standard Test Method for Measurement of Solids in Water*. El cálculo del porcentaje de sólidos se muestra en el Anexo VII (ASTM, 2005).

La densidad se determinó para conocer la relación masa-volumen de la barbotina y para trabajar dentro de un rango de densidad comprendido ente 1.5-1.8 g/cm³ que corresponde a barbotinas o pastas cerámicas (Portillo et al, 2011, p.93). Esto se realizó con base en la norma *ASTM D1475-13: Standard Test Method for Density of Liquid Coatings, Inks, and Related Products*. El cálculo de la densidad se muestra en el Anexo VIII (ASTM, 2013).

La humedad de las barbotinas se calculó como se muestra en el Anexo IX. (SACMI, 2004, p. 41).

La granulometría se determinó para conocer las fracciones arcillosas que componen a la barbotina. Esto se realizó con base en la norma *ASTM C325: Standard Guide for Wet Sieve Analysis of Ceramic Whiteware Clays*. El cálculo se muestra en el Anexo X (ASTM, 2014-a).

La viscosidad y tixotropía se realizaron para conocer la reología de las barbotinas. Esto se realizó con base en las normas: *ASTM D1200-10: Standard Test Method*

for Viscosity by Ford Viscosity Cup (ASTM, 2014) y *ASTM D2196-10: Standard Test Methods for Rheological Properties of Non-Newtonian Materials by Rotational Viscometer* (ASTM, 2015). La conversión de unidades de tiempo (s) a unidades de viscosidad se realiza mediante el empleo de las tablas de conversión que se muestran en el Anexo XI.

La tixotropía se realizó para evaluar el comportamiento de las barbotinas cuando se someten a una velocidad de cizallamiento. El ensayo se efectuó empleando un viscosímetro Brookfield DV-II + empleando el husillo # 63 a las velocidades de cizalla de 5, 6, 10, 12, y 20 rpm. Con los resultados obtenidos se determinó si el fluido era tixotrópico o no tixotrópico.

El comportamiento al moldeo de la barbotina comercial y las barbotinas cerámicas experimentales se realizó mediante la determinación de la rata de colada y el tiempo de secado, para lo cual se emplearon dos moldes de yeso. Los cálculos se muestran en los Anexos, XII y XIII.

La rata de colada de las barbotinas se realizó para conocer la tasa de eliminación de agua de la barbotina durante el proceso de colado en un molde de yeso plano. Se llenó el molde con barbotina y se dejó reposar durante 15 minutos. Posteriormente se drenó la barbotina, y la masa formada y adherida al molde se cortó con cilíndricos de acero huecos de 2,5 cm de diámetro, a fin de obtener tortas de pasta cerámica. Se pesaron tres tortas por cada formulación. Los cálculos de la rata de colada se muestra en el Anexo XII.

El tiempo de secado permitió conocer el tiempo en el cual se podía retirar la pieza del molde según el espesor de pared formado en un determinado tiempo. El ensayo consistió en llenar un molde cónico con barbotina y dejar en reposo durante 5 minutos. Transcurrido este tiempo se drenó la barbotina y se desmoldó la pieza. Finalmente se midió el espesor de pared formada por el cono empleando un calibrador. Se repitió el procedimiento para los tiempos de 10, 15 y 20 minutos. Los conos que se formaron para las siete formulaciones y tiempos de 10, 15 y 20 minutos se muestran en el Anexo XIII.

2.2.2. DESARROLLO DE BARBOTINAS CERÁMICAS PARA USO ARTESANAL

El proceso de preparación de las barbotinas se siguió bajo el esquema mostrado en la Figura 2.3.

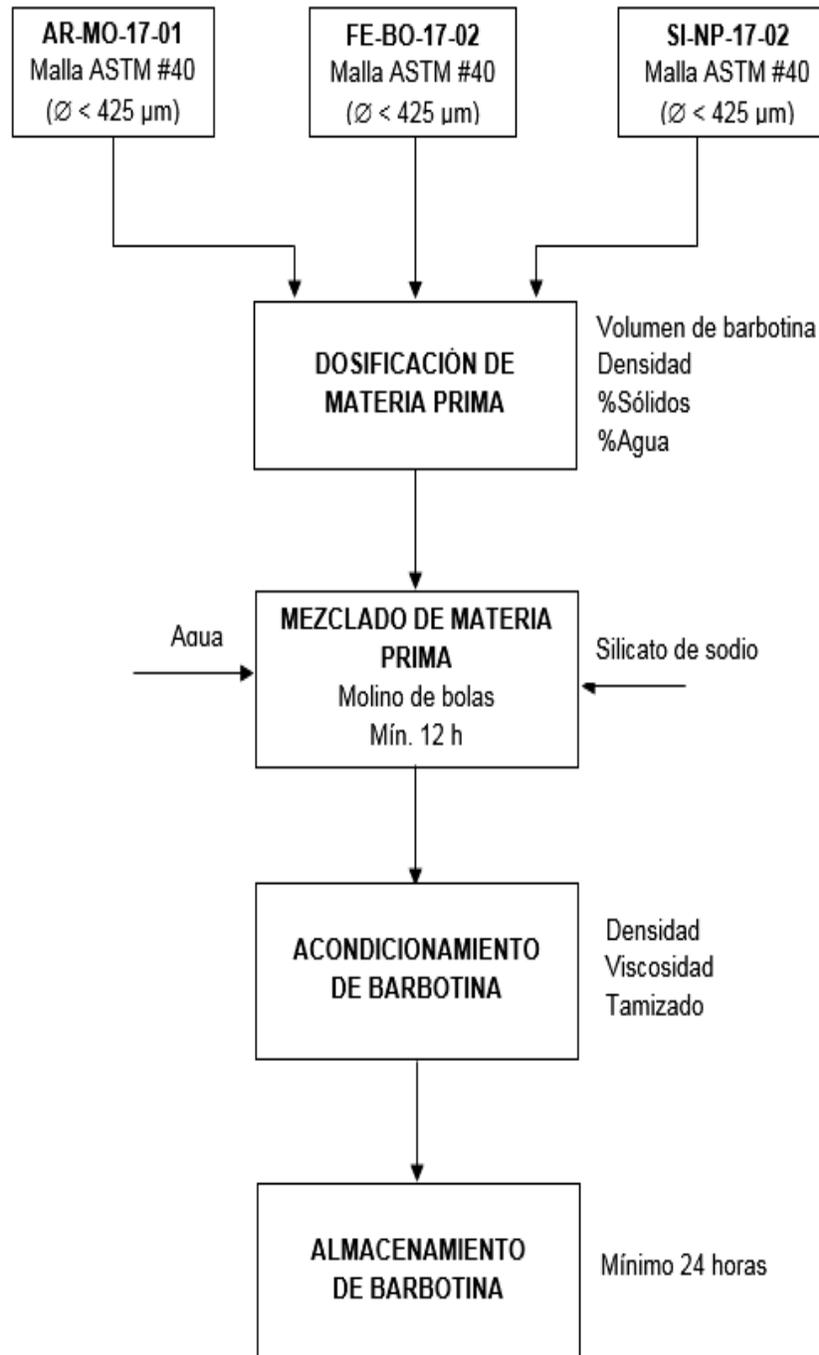


Figura 2.3. Proceso de elaboración de barbotinas cerámicas

Se prepararon siete formulaciones (F_1 , F_2 , F_3 , ..., F_7) de diferente composición porcentual en arcilla, feldespato, y sílice, de acuerdo con un diseño experimental de mezcla tipo Simplex-Centroide (Noni, Hotza, Cantavella y Sánchez, 2010, p 1731). El rango de trabajo para las mezclas fue de 45-70 % en arcilla, 20-45 % en feldespato y 10-35 % en sílice. Se obtuvieron los siete puntos mostrados en la Figura 2.4.

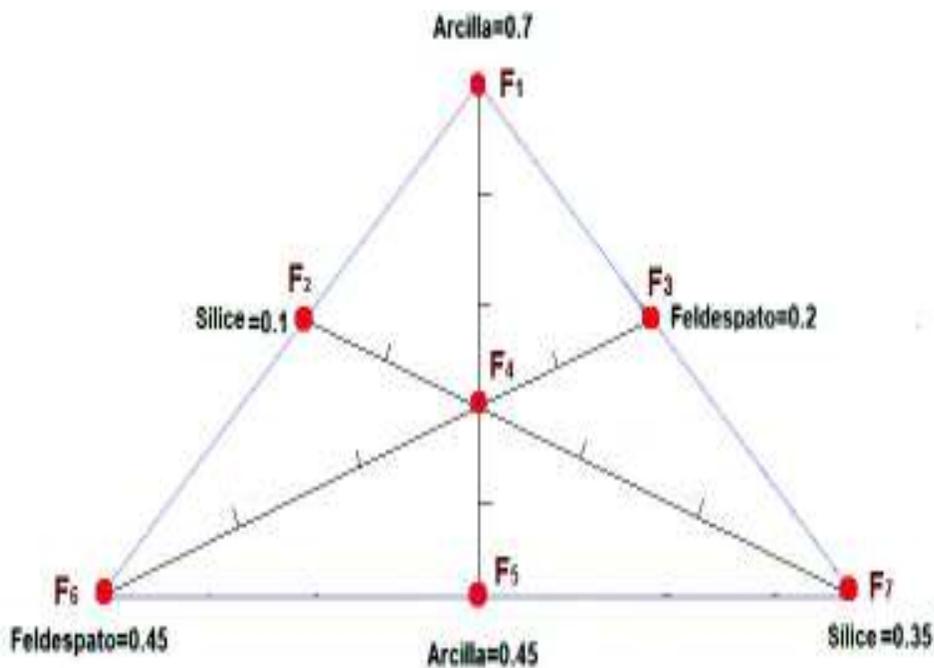


Figura 2.4. Diagrama ternario con las formulaciones experimentales

En la Tabla 2.5 se muestran los porcentajes de arcilla, feldespato y sílice de cada punto.

Tabla 2.5. Composición de las barbotinas cerámicas experimentales

Código barbotina	AR-MO-17-01 (%)	FE-BO-17-02 (%)	SI-NP-17-02 (%)
F_1	70,0	20,0	10,0
F_2	65,5	24,5	10,0
F_3	57,5	20,0	22,5
F_4	53,3	28,3	18,3
F_5	48,0	32,5	19,5
F_6	45,0	45,0	10,0
F_7	45,0	20,0	35,0

Para el cálculo de las cantidades y condiciones de preparación se consideraron las composiciones de la Tabla 2.5. Se determinó la masa seca (m_s) de la materia prima y la masa de agua (m_a) por litro de barbotina, para cada formulación mediante el procedimiento descrito en la Sección 1.2.1.1 de la revisión bibliográfica. Las cantidades calculadas de arcilla, feldespato y sílice se pesaron para las siete formulaciones, y fueron molidas manualmente hasta lograr el 100 % del paso del material por la malla ASTM #40, esto se realizó con el fin de conseguir una molienda homogénea en un tiempo menor a 48 h.

Posteriormente, se añadieron al molino de bolas los elementos molturantes, siendo el 60% del peso total del molino, y los componentes de la mezcla, comenzando con la arcilla y a continuación el feldespato y sílice. Con el fin de obtener una buena disgregación de las partículas y homogeneidad de la mezcla, se añadió silicato de sodio (Na_2SiO_3) como desfloculante. Las barbotinas se prepararon en lotes de 4 kg en un tiempo no menor de 3 horas. Inicialmente cada 4 h se realizaron controles de calidad para la molienda, se midió la densidad, viscosidad y retenido sobre la malla ASTM #100.

La molienda empleó un molino de bolas de porcelana, 3,6 kg de bolas de alúmina (50 % medianas y 50 % pequeñas), velocidad de molienda de 70 rpm y tiempos de molienda entre 12-24 h. Una vez que las barbotinas cumplieron con los requerimientos de calidad en la molienda, fueron almacenadas en recipientes y se dejaron en reposo durante, al menos, 24 h. Transcurrido el tiempo de reposo se agitó cada barbotina una durante 30 min y posteriormente fueron caracterizadas según el procedimiento de caracterización de la Sección 2.2.1.

2.3. ESTUDIO DEL EFECTO DE DISTINTAS COMPOSICIONES DE BARBOTINAS SOBRE LA ABSORCIÓN DE AGUA, POROSIDAD Y RESISTENCIA A LA FLEXIÓN.

Para el estudio del efecto de la composición y temperatura de cocción de las barbotinas experimentales sobre las propiedades de contracción, absorción de

agua, porosidad y resistencia a la flexión de las piezas cerámicas cocidas, se elaboraron pastas cerámicas que fueron extruidas manualmente a fin de obtener probetas paralelepípedas. Las probetas fueron secadas y posteriormente cocidas a los niveles de temperatura de 900, 1 000 y 1 100 °C.

2.3.1. PREPARACIÓN DE PROBETAS Y MEDICIÓN DE PROPIEDADES DE LOS PRODUCTOS CERÁMICOS OBTENIDOS

Para la obtención de las probetas cerámicas se formaron pastas a partir de las barbotinas experimentales, reduciendo su humedad al colocarlas sobre moldes de yeso. Se prepararon 35 probetas para cada formulación que fueron distribuidas, previo a la cocción, como se muestra en la Tabla 2.7.

Tabla 2.6. Distribución para la quema de las probetas obtenidas por extrusión manual

Tipo de probeta	Cantidad	Medidas	Distribución
Larga	20	12 x 1,5 x 1,5 cm	5 probetas para 110 °C 5 probetas para 900 °C 5 probetas para 1000 °C 5 probetas para 1100 °C
Cortas	15	5 x 1,5 x 1,5 cm	5 probetas para 900 °C 5 probetas para 1000 °C 5 probetas para 1100 °C

Las probetas, largas y cortas, se enumeraron considerando el orden en el que fueron extruidas y la formulación a la que pertenecían. Se colocó una marca de 100 mm de longitud en el centro de las probetas largas para medir el porcentaje de contracción después del secado a 110 °C y a la cocción a las temperaturas de 900, 1 000 y 1 100 °C. El porcentaje de contracción se calculó como se muestra en el Anexo XIV (Güeto, 2005, p.122):

En total se obtuvieron 245 probetas, para las siete formulaciones, que pasaron a ser secadas empleando un ciclo de secado controlado en una estufa con una tasa de aumento de 40 °/h hasta alcanzar 110 °C. Este ciclo permitió minimizar el

riesgo de formación de microgrietas y granitos que se producen cuando el proceso de secado es brusco. Las probetas secas se quemaron en un horno eléctrico a 900, 1 000 y 1 100 °C a una velocidad de 200 °C/h. Después de la quema las probetas se pesaron y se midió la contracción obtenida para cada pieza. El cálculo del porcentaje de contracción a la quema y total se muestra en el Anexo XIV (Güeto, 2005, p. 122).

El índice de absorción se determinó para conocer la capacidad de absorción de agua de las piezas cerámicas obtenidas. Esto se realizó con base en la norma *ASTM C373: Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products*. La absorción de agua se calculó como se muestra en el Anexo XV (ASTM, 2006).

La porosidad total de las piezas cerámicas obtenidas se determinó mediante los ensayos de porosidad abierta y porosidad cerrada. El ensayo se realizó con base en la norma *ASTM C373-72: Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products*. Se emplearon los resultados obtenidos en la prueba de absorción de agua y se determinaron los valores de porosidad como se muestra en el Anexo XV (ASTM, 2006).

La resistencia mecánica se determinó para conocer el grado de resistencia a la flexión que presentaron las probetas secas y cocidas cuando fueron sometidas a esfuerzo. Esto se realizó con base en la norma *ASTM C674-13: Standard Test Methods for Flexural Properties of Ceramic Whiteware Materials* (ASTM, 2006). El registro fotográfico del ensayo se muestra en el Anexo XVI.

2.3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL

Con los valores de absorción de agua, porosidad total y resistencia mecánica a la flexión de las probetas cerámicas quemadas a 900, 1 000 y 1 100 °C, se procedió a realizar un análisis de varianza con un 95 % de confianza en el programa estadístico Statgraphics Centurion XVI.

Se evaluó el efecto que tiene la formulación y temperatura de cocción sobre la: absorción de agua, porosidad total y resistencia mecánica a la flexión de las piezas cerámicas obtenidas para las siete formulaciones.

Para el análisis estadístico se emplearon dos diseños experimentales: un diseño de mezclas para evaluar el efecto de la formulación de las barbotinas a temperatura de cocción constante en donde las variables de respuesta son: absorción de agua, porosidad y resistencia mecánica a la flexión y posteriormente se realizó un diseño factorial 7x3 a fin de conocer la influencia de la temperatura de cocción y de la formulación sobre la absorción de agua, porosidad total y resistencia mecánica a la flexión, y los valores óptimos de temperatura de cocción y formulación que permitían obtener altos valores de resistencia mecánica a la flexión y bajos valores de porosidad y absorción de agua.

Se consideraron las variables de entrada, niveles y variables de respuesta que se muestran en la tabla 2.7.

Tabla 2.7. Diseño experimental para la evaluación de las propiedades mecánicas de las barbotinas experimentales

Variables de entrada	Niveles	Variables de respuesta
Composición porcentual de arcilla, cuarzo y feldespato	7 para la composición	Absorción de agua Porosidad
Temperatura de cocción	3 para las temperaturas de cocción	Resistencia a la flexión

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. EVALUACIÓN DE LOS MINERALES ARCILLOSOS PROVENIENTES DEL ECUADOR

La evaluación de los dos tipos de arcilla, los dos tipos de feldespato y los dos tipos de sílice, inició con el acondicionamiento de cada mineral mediante un proceso de trituración y molienda. Luego pasaron a ser caracterizados químicamente mediante fluorescencia de rayos X; mineralógicamente mediante difracción de rayos X y físicamente mediante un control por atributos y un control por variables. Los minerales arcillosos seleccionados pasaron a ser caracterizados mediante un control por atributos y un control por variables.

3.1.1. SELECCIÓN DE LOS MINERALES ARCILLOSOS

Los resultados de caracterización química realizada mediante fluorescencia de rayos X, de las arcillas AR-MO-17-01 y AR-AZ-17-01; los feldespatos FE-BO-17-01 y FE-BO-17-02; las sílices SI-NP-17-01 y SI-NP-17-02; y la barbotina comercial, se muestran en la Tabla 3.1:

Tabla 3.1. Análisis químico de óxidos de los minerales arcillosos mediante fluorescencia de rayos X

Muestra	%SiO ₂	%Al ₂ O ₃	%Fe ₂ O ₃	%CaO	%MgO	%Na ₂ O	%K ₂ O	%TiO ₂	%P ₂ O ₅
AR-MO-17-01	58,34	28,37	0,99	0,13	0,24	1,21	3,23	2,05	0,14
AR-AZ-17-01	49,07	23,12	8,04	1,78	2,35	1,28	3,47	1,83	0,08
FE-BO-17-01	72,96	17,44	1,19	0,07	0,19	0,83	2,74	1,08	0,10
FE-BO-17-02	71,90	17,37	0,74	0,79	1,00	6,03	0,19	0,40	0,03
SI-NP-17-01	98,45	2,34	0,39	0,05	-	0,17	0,15	0,15	0,04
SI-NP-17-02	97,60	2,60	0,36	0,04	-	0,16	0,29	0,36	0,04
Barbotina Comercial	66,90	20,78	1,10	0,23	0,35	1,00	2,13	0,93	0,13

El criterio de selección de la Tabla 2.2 indica que las arcillas aptas para la elaboración de productos cerámicos deben contener entre 50 y 60 % de SiO_2 , 20 y 30 % de Al_2O_3 y proporciones inferiores al 20 % en CaCO_3 y en óxidos alcalinos (Santos et al., 2011).

En la Tabla 3.1 se observa que la arcilla que cumple con el criterio de la Tabla 2.2 es la arcilla AR-MO-17-01 con un contenido de 58,34 % en SiO_2 , 28,37 % en Al_2O_3 , 5 % en óxidos alcalinos (MgO , Na_2O y K_2O), y 0,13 % en carbonatos reportados como óxido de calcio (CaO), por otra parte, considerando que se requiere materia prima de quema blanca, la arcilla AR-MO-17-01 contiene 7 % menos Fe_2O_3 que la arcilla AR-AZ-17-01, por tanto la arcilla AR-MO-17-01 se seleccionó por cumplir con los requerimientos establecidos. Por otra parte la arcilla AR-AZ-17-01 al contener alto contenido de hierro es ideal en la elaboración de productos cerámicos como macetas, ladrillos, floreros, etc.

El criterio de selección de la Tabla 2.2 indica que se deben seleccionar feldspatos que presenten contenido en óxidos de potasio y óxidos de sodio entre 10 y 25 %, debido a que era necesario introducir material fundente a la mezcla que permita disminuir la temperatura de cocción (Guzmán, Torres, Cedeño, Delvasto, Amigó y Sánchez, 2013); en la Tabla 3.1 se observa que el feldespato FE-BO-17-02 contiene alrededor de 7 % en óxidos alcalinos (MgO , Na_2O y K_2O), por tanto fue el seleccionado al contener mayor proporción en óxidos alcalinos. Por otra parte el feldespato FE-BO-17-01 al contener alta proporción de SiO_2 y baja proporción en óxidos alcalinos, podría emplearse en una mezcla cerámica como un agente que aporte sílice a la mezcla.

El criterio de selección para las sílices indica que se deben seleccionar sílices que contengan menos del 5 % en óxido de hierro (Fe_2O_3) debido a que se requiere materia prima (arcilla, feldespato y sílice) que permita obtener piezas cerámicas de quema blanca (Galán y Aparicio, 2005); en la Tabla 3.1 se observa que las dos sílices cumplen con este criterio pero se decidió seleccionar a la sílice SI-NP-17-02 debido a que presenta una proporción ligeramente inferior de óxido férrico.

Por otra parte, los resultados obtenidos de la caracterización mineralógica de fases minerales, realizada mediante difracción de rayos X, de las arcillas AR-MO-17-01 y AR-AZ-17-01; los feldespatos FE-BO-17-01 y FE-BO-17-02; las sílices SI-NP-17-01 y SI-NP-17-02 y de la barbotina comercial se muestra en la Tabla 3.2

Tabla 3.2. Análisis mineralógico de los minerales arcillosos mediante difracción de rayos X

Mineral		AR-MO-17-01	AR-AZ-17-01	FE-BO-17-01	FE-BO-17-02	SI-NP-17-01	SI-NP-17-02	Barbotina comercial
Cuarzo		30	20	73	40	96	93	63
Caolinita		5	15	-	19	2	-	19
Muscovita		19	15	22	8	-	5	11
Chabasita		-	-	-	5	-	-	-
Cordierita		-	-	-	3	-	-	-
Plagioclasas	Albita							
	Andesina	3	8	5	25	2	5	-
	Anortita							
Fengita		24	30	-	-	-	-	-
Pirofilita		9	3	-	-	-	-	-
Rutilo		4	-	-	-	-	-	-
Montmorillonita		3	2	-	-	-	-	-
Paulingita		3	-	-	-	-	-	-

Las fases cristalinas esenciales que se buscan en las arcillas son las fases montmorilloníticas, illíticas, pirofilíticas, caolinitas y micas (muscovitas) (Galán y Aparicio, 2005); en la Tabla 3.2 se observa que las arcillas AR-MO-17-01 y AR-AZ-17-01 presentan estas fases minerales y por tanto pueden ser empleadas para aplicaciones en la producción de piezas cerámicas de uso artesanal, sin embargo la arcilla AR-MO-17-01 presentó mayor proporción de estas fases minerales y fue la seleccionada para la formulación de las

barbotinas cerámicas experimentales.

Las fases cristalinas minerales esenciales en los feldespatos son la ortoclasa, microclina y plagioclasas (albita, anortita y andesina) (Galán y Aparicio, 2005); en la Tabla 3.2 se observa que los feldespatos FE-BO-17-01 y FE-BO-17-02 cumplen con la presencia de fases minerales plagioclasas: albita, anortita y andesina, sin embargo el FE-BO-17-02 posee mayor proporción de los mismos y por tanto se puede afirmar que es un tipo de feldespato que se puede emplear en la formulación de barbotinas cerámicas de uso artesanal e industrial.

La fase cristalina mineral esencial en las sílices es el cuarzo (Galán y Aparicio, 2005); en la Tabla 3.2 se observa que las sílices SI-NP-17-01 y SI-NP-17-02 cumplen con la presencia de esta fase mineral, y por tanto se puede considerar cualquiera para la formulación de las barbotinas cerámicas, sin embargo se mantuvo el criterio de seleccionar a la sílice que contenga menor proporción de óxido de hierro, siendo seleccionada la sílice SI-NP-17-02 por poseer menor proporción en Fe_2O_3 que la sílice SI-NP-17-01.

En la Tabla 3.3 se muestran los resultados de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad para la arcilla AR-MO-17-01, la arcilla AR-AZ-17-02 y la pasta comercial obtenidos mediante el ensayo Casagrande. Los cálculos se encuentran en el Anexo II.

Tabla 3.3. Índice de plasticidad para las arcillas

Proporción de humedad (%H)	AR-MO-17-01	AR-AZ-17-01	Pasta comercial
Límite líquido (LL)	44,8 ± 0,05	26,8 ± 0,06	37,0 ± 0,10
Límite plástico (LP)	27,8 ± 0,04	19,0 ± 0,05	21,0 ± 0,06
Índice de plasticidad (IP)	17,0 ± 0,02	7,8 ± 0,09	16,0 ± 0,16

Se observa que la arcilla AR-MO-17-01 presenta un índice de plasticidad mayor al de la arcilla AR-AZ-17-02 y que además es cercano al valor del índice plástico de

la pasta comercial, por tanto se puede afirmar que la arcilla AR-MO-17-01 se encuentra dentro de valores manejables para la elaboración de pastas y barbotinas cerámicas. Por otra parte, los puntos en el diagrama Casagrande se muestran en la Figura 3.1:

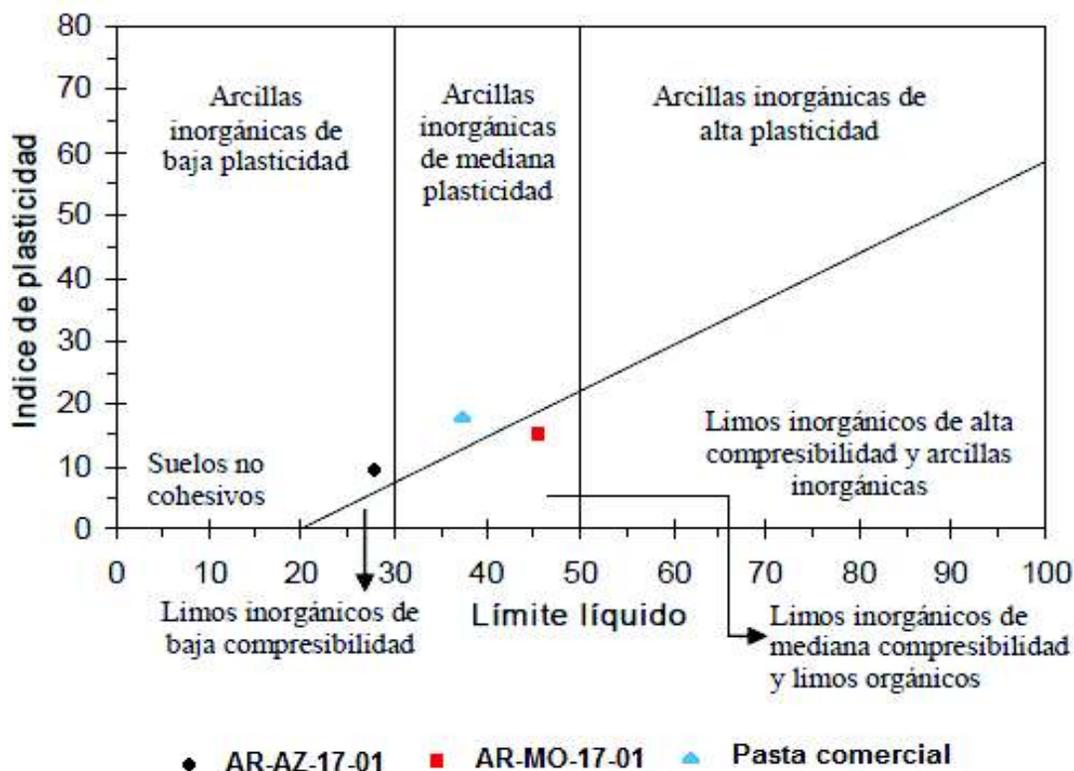


Figura 3.1. Arcillas AR-MO-17-01, AR-AZ-17-01 y pasta comercial en el diagrama Casagrande

En el diagrama Casagrande de la Figura 3.1 se observa que el punto correspondiente a la arcilla AR-MO-17-01 se encuentra cercano al de la pasta comercial; ambos puntos están dentro de la categoría de arcillas inorgánicas de mediana plasticidad con presencia de limos orgánicos e inorgánicos de mediana compresibilidad; mientras que, el punto correspondiente a la arcilla AR-AZ-17-01 se encuentra ubicado en la categoría de arcillas inorgánicas de baja plasticidad y presencia de limos inorgánicos de baja compresibilidad. Considerando que en el estudio se requería formar pastas a partir de las barbotinas, la arcilla AR-MO-17-01 se seleccionó al resultar una arcilla más plástica que la arcilla AR-AZ-17-01.

Por tanto, en función de los aspectos tecnológicos señalados, se seleccionó: a la arcilla AR-MO-17-01, el feldespato FE-BO-17-02 y la sílice SI-NP-17-02, como minerales arcillosos para la formulación de barbotinas, por cumplir con los criterios químicos y mineralógicos expuestos.

3.1.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS MINERALES ARCILLOSOS SELECCIONADOS

A fin de validar las propiedades físico-químicas de los minerales arcillosos seleccionados se realizó la caracterización física de la arcilla AR-MO-17-01, el feldespato FE-BO-17-02 y la sílice SI-NP-17-02, mediante un control por atributos.

Los resultados obtenidos para la caracterización física de los minerales arcillosos seleccionados se muestran en la Tabla 3.4:

Tabla 3.4. Caracterización física por atributos de los minerales arcillosos seleccionados

Propiedad	AR-MO-17-01	FE-BO-17-02	SI-NP-17-02
Estado inicial	Terrones desmenuzables	Terrones gruesos	Suelta
Consistencia en Estado inicial	Extra-firme	Extra-firme	Suelta
Color natural	Gris	Blanco	Beige
Color quema a 950 °C	Beige	Blanco	Rosa pálido
Impurezas	Raíces	Granos negros	Ninguna
Materia orgánica (cualitativa)	Baja efervescencia	Sin reacción	Sin reacción

En la Tabla 3.4 se observa que la arcilla AR-MO-17-01 y el feldespato FE-BO-17-02, inicialmente se presentaron como terrones de consistencia extra-firme, mientras que la sílice se presentó como arena suelta. El estado inicial de las muestras analizadas implicó llevar a cabo el proceso de molienda que se describe en la sección 2.1.1, a fin de lograr un tamaño de partícula adecuado para su uso en la formulación de las barbotinas. En la Figura 3.2 se observan los minerales arcillosos en estado inicial y su consistencia.

En la Figura 3.2 se puede observar que en estado inicial la arcilla a) AR-MO-17-01 presenta una coloración gris y una consistencia extra-firme; el feldespato b) FE-BO-17-02 presenta una coloración blanca y una consistencia extra-firme; y la sílice c) SI-NP-17-02 presenta una coloración beige y una consistencia de arena suelta.

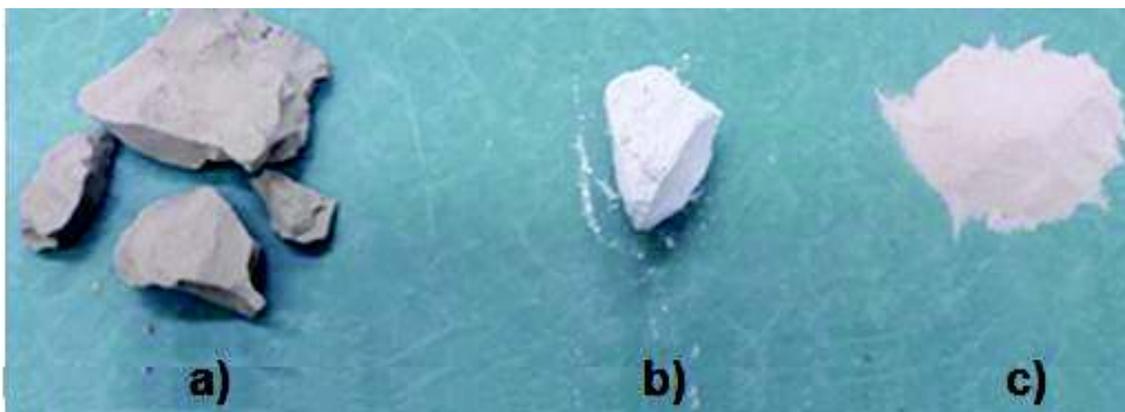


Figura 3.2. Minerales arcillosos en estado inicial y su consistencia: a) AR-MO-17-01 b) FE-BO-17-02 y c) SI-NP-17-02

En la Tabla 3.4 y en la Figura 3.3 se observa que la arcilla a) presentó una sensación al tacto untuosa; mientras que, el feldespato b) y la sílice c) presentaron una sensación al tacto seca o árida, que es propia de su naturaleza mineralógica desengrasante.



Figura 3.3. Resultados de la prueba de sensación al tacto para: a) AR-MO-17-01 b) FE-BO-17-02 y c) SI-NP-17-02

En la Tabla 3.4 y en la Figura 3.4 se observa que la arcilla a) presentó una textura arcillosa que se evidenció cuando al añadirle agua, se dio forma de anillo; mientras que, el feldespato b) y la sílice c) presentaron una textura arenosa floja y separada que se evidenció cuando al añadirle agua se le dio forma de pirámide.

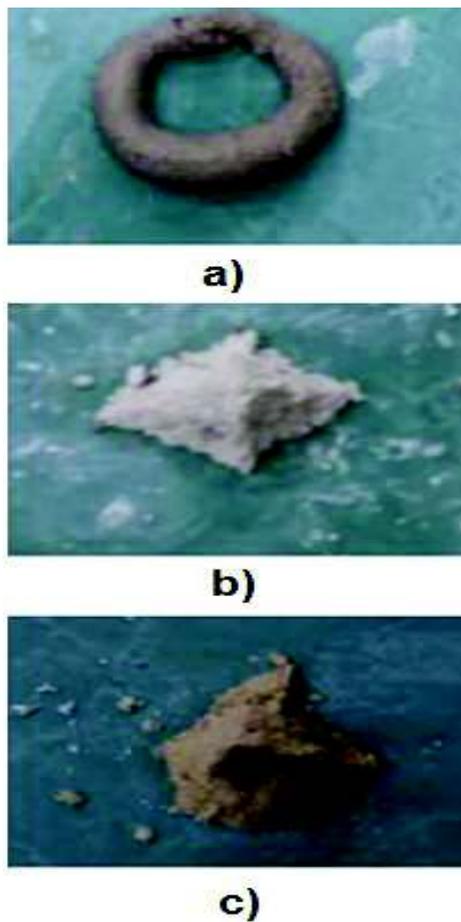


Figura 3.4. Textura de los minerales arcillosos seleccionados: a) AR-MO-17-01 b) FE-BO-17-02 y c) SI-NP-17-02

En la Figura 3.5 se muestra la coloración de los minerales seleccionados en estado natural y después de la quema a 950 °C; el tono indicó el color primario predominante en orden natural de matices: rojo (R), amarillo (Y), verde (G), azul (B) y morado (P) (ASTM, 2014-a). Los resultados anticiparon el contenido de hierro presente. La arcilla a) en estado natural presentó una coloración gris y después de la quema una coloración blanca hueso; el feldespato b) presentó una coloración blanca en estado natural y después de la quema; y la sílice c) presentó una coloración blanca en estado natural y rosa pálido después de la quema.

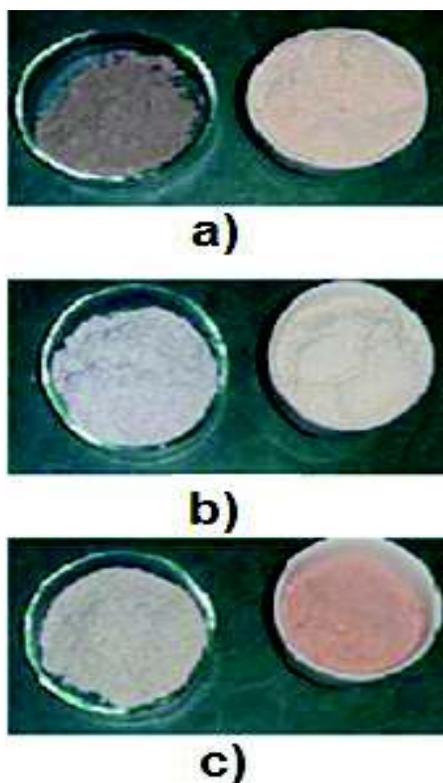


Figura 3.5. Coloración de los minerales arcillosos seleccionados: a) AR-MO-17-01 b) FE-BO-17-02 y c) SI-NP-17-02

Respecto a la presencia de impurezas, en la Tabla 3.4 y en la Figura 3.6 se observa que la arcilla a), feldespato b) y sílice c), no evidencian la presencia significativa de impurezas.



Figura 3.6. Presencia de impurezas de los minerales arcillosos seleccionados: a) AR-MO-17-01 b) FE-BO-17-02 y c) SI-NP-17-02

Finalmente en la Tabla 3.4 y en la Figura 3.7 se observa que la arcilla a), el feldespato b) y la sílice c) no presentaron evidencias de poseer cantidades

apreciables de materia orgánica pues no burbujearon cuando se añadió peróxido de hidrógeno. La materia orgánica merece especial atención por la aparición de manchas negras, disminución de la porosidad, roturas de secado, etc., en los productos cerámicos.

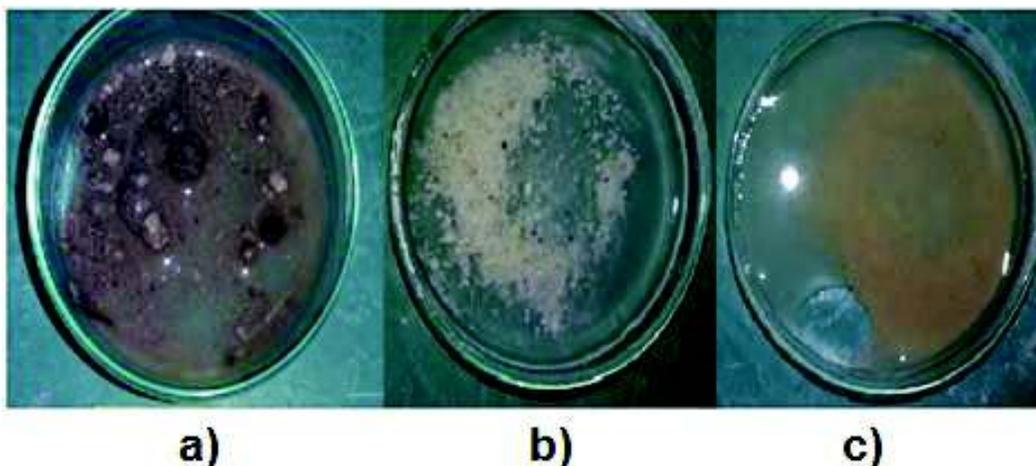


Figura 3.7. Presencia de materia orgánica de los minerales arcillosos seleccionados: a) AR-MO-17-01 b) FE-BO-17-02 y c) SI-NP-17-02

La caracterización física por variables incluyó la determinación de la humedad, densidad y tamaño promedio en estado inicial de la arcilla AR-MO-17-01, el feldespato FE-BO-17-02 y la sílice SI-NP-17-02 presentó los resultados mostrados en la Tabla 3.5 y Tabla 3.6.

Tabla 3.5. Caracterización física por variables de los minerales arcillosos seleccionados

Propiedad	AR-MO-17-01	FE-BO-17-02	SI-NP-17-02
Humedad (%)	2,00 ± 0,05	1,00 ± 0,01	0,03 ± 0,02
Densidad (g/cm ³)	2,53 ± 0,08	2,59 ± 0,05	2,58 ± 0,04
Materia orgánica (%)	5,30 ± 0,06	2,05 ± 0,06	0,69 ± 0,02

En la Tabla 3.5 se evidencia que la arcilla AR-MO-17-01, el feldespato FE-BO-17-02 y la sílice SI-NP-17-02 presentaron una humedad relativamente baja con respecto a la humedad inicial (10 %) que poseen los minerales arcillosos previo a la ejecución de los ensayos físico-químicos y cerámicos (Galán y Aparicio, 2005).

Por otra parte, en la Tabla 3.5 se observa que la arcilla AR-MO-17-01, el feldespato FE-BO-17-02 y la sílice SI-NP-17-02, presentaron valores de densidad real o absoluta dentro del orden correspondiente para minerales arcillosos cuyo valor es de aproximadamente $2,70 \text{ g/cm}^3$ (Osipov, 2012).

Finalmente, se observa que la arcilla AR-MO-17-01, el feldespato FE-BO-17-02 y la sílice SI-NP-17-02 presentaron una cantidad de materia orgánica inferior al 6 %, valores que no afectarán al tipo de piezas cerámicas a elaborar, produciéndose aspectos de falla como disminución de la porosidad, roturas de secado, etc., en los productos cerámicos terminados (Galán y Aparicio, 2005).

En la Tabla 3.6 se observa la distribución granulométrica que presentaron la arcilla, feldespato y sílice seleccionados. Se observa que la arcilla AR-MO-17-01 presenta una proporción de partículas superior al 80 % para tamaños de partícula inferiores a $45 \mu\text{m}$, lo que da una clara indicación de que está constituida en su mayoría por fracciones arcillosas. El feldespato FE-BO-17-02 y la sílice SI-NP-17-02 presentan una proporción de partículas inferior al 60 % para tamaños de partícula inferiores a $45 \mu\text{m}$, lo que indica que se pueden usar como material desengrasante en pastas usadas en la fabricación de piezas cerámicas de alfarería.

Tabla 3.6. Análisis granulométrico de los minerales arcillosos seleccionados

Malla ASTM		%Retenido en mallas ASTM		
No.	Diámetro (μm)	AR-MO-17-01	FE-BO-17-02	SI-NP-17-02
100	$\Phi > 150$	6,2	20,1	91,3
140	$150 > \Phi > 125$	1,1	5,7	4,8
200	$125 > \Phi > 75$	1,2	5,7	1,4
325	$53 > \Phi > 45$	1,8	9,0	0,9
Total retenido $\Phi > 45$		10,4	40,6	98,3
Total pasante $\Phi < 45$		89,6	59,4	1,7

3.2. DESARROLLO DE BARBOTINAS CERÁMICAS DE DISTINTA COMPOSICIÓN A PARTIR DE LA FORMULACIÓN DE MEZCLAS TRIAXIALES DE ARCILLA, FELDESPATO Y CUARZO

La arcilla AR-MO-17-01, el feldespato FE-BO-17-02 y la sílice SI-NP-17-02 se emplearon en la formulación de las barbotinas cerámicas de acuerdo con el proceso descrito en la Sección 2.2.2. Una vez que se obtuvieron las siete formulaciones de barbotinas experimentales, éstas fueron almacenadas durante 48 h y posteriormente caracterizadas. La barbotina comercial se caracterizó según el procedimiento descrito en la Sección 2.2.1.

3.2.1. CARACTERIZACIÓN DE LA BARBOTINA CERÁMICA COMERCIAL Y LAS BARBOTINAS CERÁMICAS EXPERIMENTALES

La caracterización física incluyó la determinación del contenido de sólidos, porcentaje de humedad, densidad y viscosidad de la barbotina comercial y de las barbotinas experimentales.

En la Tabla 3.7 se observa que el contenido de sólidos para las barbotinas experimentales varía entre 70-72 % correspondientes a densidades entre 1,75-1,77 g/cm³; mientras que la barbotina comercial posee un contenido de sólidos de 68 % con una densidad de 1,72 g/cm³.

Para barbotinas o pastas cerámicas se suele trabajar con porcentajes de sólidos entre 50-70 %, obteniéndose barbotinas cuyas densidades oscilan entre 1,5-1,8 g/cm³ (Portillo et al., 2011, p. 93).

La barbotina comercial se encuentra dentro del rango tanto para el contenido de sólidos como para la densidad y se pudo evidenciar cuando se obtuvo una pasta fácilmente moldeable; mientras que las barbotinas experimentales sobrepasaron

el límite en contenido en sólidos, esto se puede explicar por la posible evaporación del agua de las barbotinas durante su reposo, que se evidencia en el porcentaje de humedad menor al 46 % con respecto a la barbotina comercial.

Tabla 3.7. Caracterización física de la barbotina comercial y barbotinas experimentales

Formulaciones	Contenido de sólidos (%)	Humedad (%)	Densidad (g/cm ³)	Viscosidad (cP)
Barbotina Comercial	68,44 ± 0,05	46,11 ± 0,11	1,72 ± 0,01	131 ± 0,08
F₁	72,12 ± 0,08	38,66 ± 0,05	1,77 ± 0,06	415 ± 0,04
F₂	70,61 ± 0,04	41,62 ± 0,07	1,75 ± 0,03	364 ± 0,03
F₃	70,78 ± 0,03	41,28 ± 0,06	1,76 ± 0,05	271 ± 0,05
F₄	71,94 ± 0,02	39,01 ± 0,02	1,77 ± 0,07	297 ± 0,03
F₅	71,13 ± 0,04	40,59 ± 0,06	1,76 ± 0,08	228 ± 0,04
F₆	71,01 ± 0,05	40,82 ± 0,08	1,78 ± 0,10	382 ± 0,09
F₇	72,30 ± 0,08	38,32 ± 0,05	1,77 ± 0,03	160 ± 0,03

Por otra parte, las viscosidades de las barbotinas experimentales superaron el valor de 131 cP que presentó la barbotina comercial, sin embargo, estos valores no dificultaron el proceso de colado. La diferencia de viscosidad entre la barbotina comercial y las barbotinas experimentales puede deberse al uso de distintos defloculantes durante su preparación.

Para las barbotinas cerámicas experimentales se empleó silicato de sodio que es un defloculante inorgánico mientras que para barbotinas comerciales generalmente se emplean defloculantes orgánicos como: sales de poliacrilatos de distinta composición estructural (Ortega, 2013, p. 28).

En el caso de las barbotinas experimentales se empleó silicato de sodio al 1 % m/m, y para la barbotina comercial se empleó un defloculante posiblemente del

tipo orgánico como sales de poliacrilatos de distinta composición estructural (Ortega, 2013, p. 28), lo que se evidenció debido a que al dejarse en reposo presentaba hongos alrededor de su superficie y no sedimentaba rápidamente como lo hacían las barbotinas experimentales.

En la Tabla 3.8 se observa que la barbotina comercial presentó proporciones de partículas superiores al 80 % para tamaños de partícula inferiores a 45 μm , lo cual indica que posee en su mayoría fracciones de tipo arcillosas, mientras que las barbotinas experimentales presentan proporciones de partículas al 90% para tamaños de partícula inferiores a 45 μm , lo cual indica que si bien poseen predominantemente fracciones arcillosas; la reducción del tamaño de partícula se debe al proceso de molienda.

Tabla 3.8. Análisis granulométrico de la barbotina comercial y barbotinas experimentales

Malla ASTM		%Retenido en mallas ASTM							
No.	Diámetro (μm)	Barbotina comercial	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇
100	$\Phi > 150$	1,3	0,04	0,01	0,01	0,00	0,03	0,00	0,00
140	$150 > \Phi > 125$	1,7	0,10	0,01	0,01	0,00	0,06	0,04	0,12
200	$125 > \Phi > 75$	2,8	0,63	0,07	0,18	0,13	0,12	0,02	0,10
325	$53 > \Phi > 45$	4,7	2,88	0,21	1,24	1,30	1,06	0,45	1,60
Total retenido $\Phi > 45$		10,5	3,64	0,30	1,43	1,45	1,26	0,52	1,83
Total pasante $\Phi < 45$		89,5	96,36	99,70	98,57	98,55	98,74	99,48	98,17

En la Tabla 3.9 se observan los espesores obtenidos del ensayo de tiempo de secado para la barbotina comercial y las barbotinas experimentales a 5, 10, 15 y 20 minutos, y en el Anexo XIII se muestran las imágenes de los conos formados para cada espesor en los tiempos indicados.

El espesor de pared depende de los requerimientos de la industria, por ejemplo para productos industriales de porcelana vitrificada se requieren espesores entre 6,5 y 7,0 mm con un tiempo de secado de 1 h (Martini et al., 2017, p. 545) pero para productos cerámicos artesanales se puede trabajar con espesores entre 2 y 4 mm en un tiempo de secado de alrededor de 10 min.

La barbotina comercial presenta un espesor de 2,70 mm en un tiempo de 10 min que se considera adecuado para la elaboración de piezas cerámicas artesanales como floreros, vasijas, utensilios, etc.; mientras que para las barbotinas experimentales se tienen espesores entre 2 y 4 mm en tiempos correspondientes entre 5-10 minutos excepto para la formulación F₇, que sobrepasa los 4 mm de espesor a los 10 minutos, dado que contiene mayor contenido de sólidos.

Tabla 3.9. Tiempo de secado de la barbotina comercial en molde cónico

Formulación	Espesor a 5 min (mm)	Espesor a 10 min (mm)	Espesor a 15 min (mm)	Espesor a 20 min (mm)
Barbotina Comercial	1,75 ± 0,04	2,70 ± 0,03	3,25 ± 0,02	3,70 ± 0,08
F₁	2,20 ± 0,02	3,00 ± 0,01	3,85 ± 0,05	4,30 ± 0,07
F₂	2,25 ± 0,03	3,30 ± 0,02	5,70 ± 0,03	7,05 ± 0,06
F₃	2,45 ± 0,04	3,70 ± 0,05	4,30 ± 0,06	5,75 ± 0,09
F₄	3,25 ± 0,03	3,55 ± 0,02	4,95 ± 0,05	5,80 ± 0,08
F₅	3,50 ± 0,04	3,85 ± 0,08	6,25 ± 0,02	7,60 ± 0,04
F₆	2,80 ± 0,05	3,70 ± 0,04	4,60 ± 0,08	6,25 ± 0,03
F₇	3,50 ± 0,04	6,60 ± 0,05	7,80 ± 0,07	8,10 ± 0,05

En la Tabla 3.10 se muestran los resultados de las masas de las pastillas obtenidas del ensayo de rata de colada y los valores de rata de colada para la barbotina comercial y las barbotinas experimentales. En el Anexo XIII se muestra el ejemplo de cálculo para la rata de colada, considerando un tiempo de colado de 15 minutos.

La rata de colada es aproximadamente 4×10^{-4} g/s.cm² para barbotinas de sanitarios (Ochoa, Gutiérrez, Rendón y Rodríguez, 2017, pp. 267-268). En la Tabla 3.10 se observa que los valores de rata de colada para la barbotina comercial y las barbotinas experimentales se encuentra entre $2-3 \times 10^{-5}$ g/s.cm², menor que la rata de colada para barbotinas de sanitarios. Esto resulta conveniente dado que las aplicaciones de las barbotinas cerámicas artesanales son diferentes a las de la barbotina para la producción de sanitarios, ya que para esta última se requieren velocidades de colado mayores que brinden un espesor entre 6,5-7,0 mm.

Tabla 3.10. Rata de colada de la barbotina comercial en molde plano

Formulación	Masa de la pastilla (g)	Rata de colada (g/s.cm ²)
Barbotina comercial	4,58 ± 0,04	1,76 x 10 ⁻⁵
F₁	5,74 ± 0,24	2,21 x 10 ⁻⁵
F₂	4,30 ± 0,16	1,65 x 10 ⁻⁵
F₃	6,30 ± 0,26	2,42 x 10 ⁻⁵
F₄	6,92 ± 0,15	2,66 x 10 ⁻⁵
F₅	7,28 ± 0,19	2,79 x 10 ⁻⁵
F₆	7,47 ± 0,09	2,87 x 10 ⁻⁵
F₇	7,42 ± 0,24	2,85 x 10 ⁻⁵

En la Figura 3.4 y Figura 3.5 se muestran las curvas de viscosidad en función de la velocidad de cizalla para la barbotina comercial y barbotinas experimentales.



Figura 3.8. Curva de tixotropía para la barbotina comercial

En la Figura 3.4 se observa que la curva de viscosidad en función de la velocidad de cizalla para la barbotina comercial describe un comportamiento tixotrópico, típico de las barbotinas cerámicas, dado que la viscosidad disminuye cuando la velocidad de cizalla aumenta.

En la Figura 3.5 se observa que las curvas de viscosidad vs velocidad de cizalla para las barbotinas experimentales describen un comportamiento tixotrópico, típico de las barbotinas cerámicas, dado que la viscosidad disminuye cuando la velocidad de cizalla aumenta. Se observa que la curva con mayor pendiente es la correspondiente a la formulación F₁.

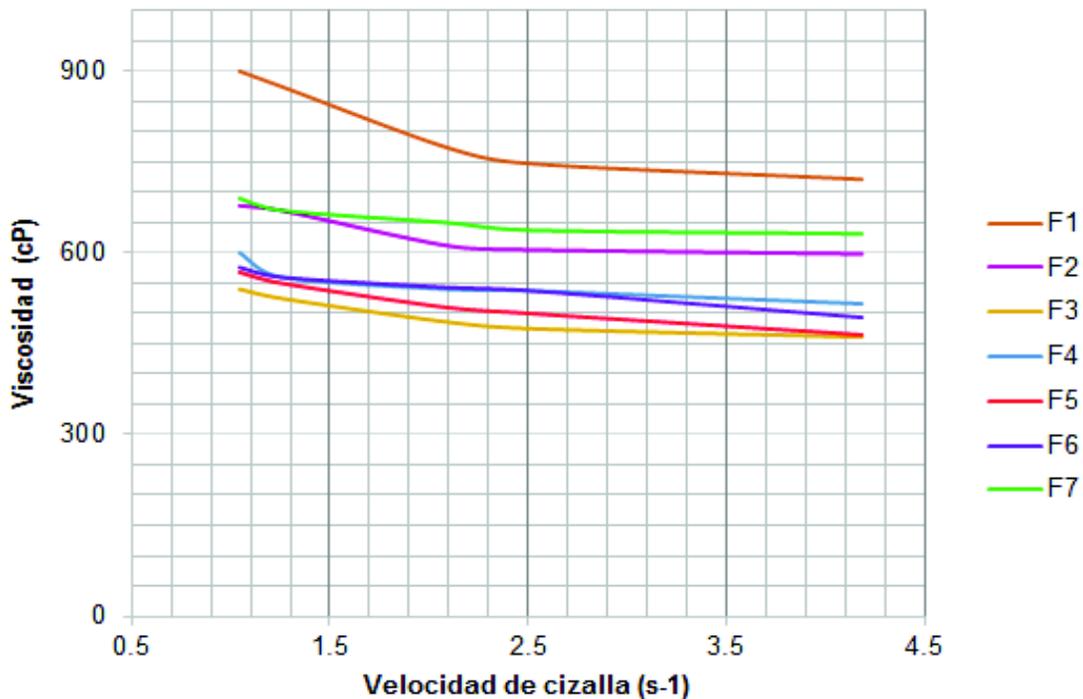


Figura 3.9. Curvas de tixotropía para las barbotinas experimentales

La barbotina comercial y las barbotinas experimentales presentan curvas de tixotropía distintas; la barbotina comercial se encuentra en el orden de 1000 cP mientras que las barbotinas experimentales se encuentran en el orden de 100 cP, esto puede deberse a que la barbotina comercial contiene en su composición algún compuesto orgánico como gelatina, almidón etc. que permitan mejorar su plasticidad .

3.2.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DE LA PASTA COMERCIAL Y PASTAS EXPERIMENTALES

Para la caracterización física y mecánica de las barbotinas comerciales se obtuvieron pastas a partir de las mismas. Las probetas se como se muestra en la Figura 3.10 y la Figura 3.11.



Figura 3.10. Formación de pasta en moldes de yeso-parte 1



Figura 3.11. Formación de pasta en moldes de yeso-parte 2

Previo a la extrusión se amasaron las pastas durante una semana como se muestra en la Figura 3.12.



Figura 3.12. Amasado de la pasta

Las pastas amasadas pasaron por la extrusora de abertura cuadrada como se muestra en la Figura 3.13.



Figura 3.13. Extrusión de probetas

Una vez obtenidas las probetas se colocó la marca de 10 cm sobre cada probeta y se identificaron considerando el orden en que fueron extruidas y la formulación a la que pertenecían, como se muestra en la Figura 3.14 y Figura 3.15.



Figura 3.14. Medición de la marca de 10 cm sobre las probetas



Figura 3.15. Probetas identificadas previas al secado

La caracterización física y mecánica de la barbotina comercial y las barbotinas experimentales se efectuó mediante ensayos de contracción al secado y, contracción total a la quema, absorción de agua, porosidad y resistencia a la flexión, mismos que se realizaron sobre probetas cocidas a 900, 1 000 y 1 100 °C.

Los resultados de contracción al secado, contracción a la quema y contracción total de las probetas correspondientes a la pasta cerámica comercial y pastas experimentales quemadas a 900 °C presentaron los resultados mostrados en la Tabla 3.11, Tabla 3.12 y Tabla 3.13. El ejemplo de cálculo de contracción al secado a 100 °C y contracción a la quema para las temperaturas de cocción de: 900, 1 000 y 1 100 °C se muestra en el Anexo XIV.

En la Tabla 3.11 se observa que la contracción al secado para la pasta comercial es aproximadamente 3,33 % y para las pastas experimentales se encuentra ente 1 y 2 %; esta diferencia en la contracción entre la barbotina comercial y las barbotinas experimentales puede deberse al tipo de arcilla con la que fueron elaboradas y la proporción de material desengrasante añadido.

Tabla 3.11. Contracción al secado a 110 °C y a la quema a 900 °C de las pastas comercial y experimentales

Formulación	% Contracción al secado a 110 °C	% Contracción a la quema a 900 °C	% Contracción total a 900 °C
Pasta comercial	3,30 ± 0,05	0,94 ± 0,07	4,23 ± 0,04
F₁	1,27 ± 0,06	0,16 ± 0,07	1,43 ± 0,1
F₂	1,30 ± 0,09	0,12 ± 0,08	1,42 ± 0,09
F₃	1,42 ± 0,08	0,08 ± 0,08	1,50 ± 0,08
F₄	1,42 ± 0,07	0,39 ± 0,14	1,81 ± 0,10
F₅	1,63 ± 0,08	0,14 ± 0,08	1,77 ± 0,08
F₆	1,46 ± 0,07	0,17 ± 0,07	1,63 ± 0,08
F₇	1,63 ± 0,06	0,20 ± 0,02	1,83 ± 0,06

Por otra parte la contracción de la quema a 900 °C es menor al 1 % lo que indica que durante el proceso de cocción los componentes fundentes de la arcilla no alcanzaron los valores de temperatura mínimos necesarios para activar el inicio de la sinterización en estado sólido. La menor contracción al secado se presenta en la formulación F₁ y la menor contracción a la quema a 900 °C se presenta en la formulación F₃.

La contracción total se obtuvo sumando la contracción al secado a 110 °C y la contracción de la quema a 900 °C; se esperaban valores comprendidos entre 5-18 %; sin embargo, tanto la barbotina comercial como las barbotinas experimentales no se encontraron dentro del rango establecido, y por tanto se puede afirmar que para la temperatura de cocción de 900 °C no existe una contracción apreciable de las piezas.

En la Tabla 3.12 se observa que la contracción al secado para la pasta comercial es similar a la contracción de las probetas de la Tabla 3.11 pero la contracción de la quema a 1 000 °C se encuentra entre 1 y 4 %, lo que indica que durante el proceso de cocción los componentes fundentes de la arcilla alcanzaron los valores de temperatura mínimos necesarios para activar el inicio de la sinterización en estado sólido (Restrepo, 2011, pp. 19). La menor contracción a la quema a 1 000 °C corresponde a la formulación F₅.

Por otra parte, la contracción total a la temperatura de cocción de 1 000 °C de la pasta comercial aumentó aproximadamente 2 % con respecto a la contracción total a la temperatura de cocción de 900 °C, lo que indica que se va perdiendo el agua de constitución y se van a obtener piezas cerámicas pequeñas.

Para las pastas experimentales la contracción total que se presentó a la temperatura de cocción de 1 000 °C aumentó aproximadamente 1 % con respecto a la contracción total a la temperatura de cocción de 900 °C, que es considerada como una ligera contracción con respecto a la de la pasta comercial.

Tabla 3.12. Contracción al secado a 110 °C y a la quema a 1 000 °C de las pastas comercial y experimentales

Formulación	% Contracción al secado a 110 °C	% Contracción a la quema a 1 000 °C	% Contracción total a 1 000 °C
Pasta comercial	3,31 ± 0,10	3,32 ± 0,14	6,63 ± 0,08
F₁	1,37 ± 0,07	1,45 ± 0,13	2,81 ± 0,09
F₂	1,20 ± 0,03	1,33 ± 0,05	2,53 ± 0,06
F₃	1,41 ± 0,10	1,02 ± 0,17	2,43 ± 0,09
F₄	1,43 ± 0,07	0,86 ± 0,07	2,29 ± 0,07
F₅	1,47 ± 0,08	0,67 ± 0,09	2,14 ± 0,05
F₆	1,51 ± 0,05	1,12 ± 0,04	2,63 ± 0,02
F₇	1,32 ± 0,06	1,13 ± 0,09	2,45 ± 0,09

En la Tabla 3.13 se observa que la contracción al secado para la pasta comercial es similar a la contracción al secado correspondiente a las probetas de la Tabla 3.11 y Tabla 3.12 pero la contracción obtenida a la temperatura de cocción de 1 100 °C se encuentra en el rango ente 5-18 %, excepto para las formulaciones F₄ y F₅, lo que indica que durante el proceso de cocción los componentes fundentes de la arcilla alcanzaron los valores de temperatura mínimo necesarios para activar el inicio de la sinterización en estado sólido. Sin embargo, se buscaba que la contracción sea menor al 2 %.

Por otra parte la contracción total a la temperatura de cocción de 1 100 °C para la barbotina comercial aumentó 5 % con respecto a su contracción en seco a 110 °C, lo cual es bastante considerable cuando se requieren hacer piezas cerámicas artesanales.

Las pastas experimentales presentan valores de contracción total a la temperatura de cocción de 1 100 °C entre 2-11 %, siendo la formulación F₅ la que menos contracción total presenta y la mayor contracción para la formulación F₂.

Tabla 3.13. Contracción al secado a 110 °C y a la quema a 1 100 °C de las pastas comercial y experimentales

Formulación	% Contracción al secado a 110 °C	% Contracción a la quema a 1 100 °C	% Contracción total a 1 100 °C
Pasta comercial	3,38 ± 0,09	5,04 ± 0,13	8,41 ± 0,05
F₁	1,28 ± 0,10	8,29 ± 0,15	9,57 ± 0,07
F₂	1,23 ± 0,03	9,36 ± 0,03	10,59 ± 0,05
F₃	1,48 ± 0,08	6,96 ± 0,11	8,44 ± 0,09
F₄	1,44 ± 0,07	2,44 ± 0,09	3,87 ± 0,07
F₅	1,43 ± 0,08	0,92 ± 0,11	2,35 ± 0,06
F₆	1,55 ± 0,08	5,21 ± 0,12	6,76 ± 0,04
F₇	1,36 ± 0,13	5,19 ± 0,18	6,55 ± 0,08

En la Tabla 3.14, Tabla 3.15 y Tabla 3.16 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de absorción de agua, porosidad abierta, porosidad cerrada y porosidad total que se realizaron sobre las probetas quemadas a los tres niveles de temperatura: 900, 1 000 y 1 100 °C. El ejemplo de cálculo se muestra en el Anexo XVII.

En la Tabla 3.14 se observa que las probetas quemadas a 900 °C, correspondientes a la pasta comercial, presentan valores aproximados al 24 % para la absorción de agua, 40 % para la porosidad abierta, 0 % para la porosidad cerrada y 40 % para la porosidad total. Esto indica que las piezas cerámicas obtenidas a partir de la pasta comercial y quemadas a 900 °C, van a tener una absorción de agua y porosidad considerables pero no tan lejanas al valor de 20 % en absorción de agua que se requiere para la fabricación de productos cerámicos porosos de quema blanca (Portillo et al., 2011, p.27).

Por otra parte se observa que las probetas quemadas a 900 °C para las pastas experimentales presentan valores entre 28 y 33 % para la absorción de agua, 42 y 47 % para la porosidad abierta, 0 % para la porosidad cerrada, 42 y 47 % para la porosidad total. Esto indica que las piezas cerámicas obtenidas a 900 °C van a

tener una alta absorción de agua y porosidad, lo cual indica que las pastas experimentales no pueden usarse en la producción de piezas cerámicas de quema blanca. Se observa que la formulación F₅ presenta la menor absorción de agua con un valor de 28,32 % y porosidad total 42,84 %.

Tabla 3.14. Absorción de agua, porosidad abierta, porosidad cerrada y porosidad total de la pasta comercial y pastas experimentales quemadas a 900 °C

Propiedad física	% Absorción de agua	% Porosidad abierta	% Porosidad cerrada	% Porosidad total
Barbotina comercial	23,69 ± 0,08	39,29 ± 0,07	0	39,29 ± 0,07
F₁	30,35 ± 0,10	45,68 ± 0,55	0	45,68 ± 0,55
F₂	30,46 ± 0,13	43,83 ± 0,35	0	43,83 ± 0,35
F₃	33,65 ± 0,09	46,90 ± 0,54	0	46,90 ± 0,54
F₄	28,79 ± 0,10	42,75 ± 0,36	0	42,75 ± 0,36
F₅	28,32 ± 0,13	42,84 ± 0,58	0	42,84 ± 0,58
F₆	28,94 ± 0,05	43,16 ± 0,27	0	43,16 ± 0,27
F₇	28,54 ± 0,11	42,38 ± 0,68	0	42,38 ± 0,68

Es importante considerar que la inexistencia de la porosidad cerrada se debe a que a una temperatura de cocción de 900 °C no se activa el inicio de la compactación de las piezas y por tanto la presencia de poros abiertos en la pieza es inevitable.

En la Tabla 3.15 se observa que las probetas quemadas a 1 000 °C, para la pasta comercial, presentan valores cercanos al 20 % para la absorción de agua, 33 % para la porosidad abierta, 0 % para la porosidad cerrada y 33 % para la porosidad total. Esto indica que las piezas cerámicas obtenidas a partir de la pasta comercial y quemadas a 1 000 °C, tienen una absorción de agua y porosidad menores a las probetas cocidas a 900 °C, y cercanas al valor de 20 % en absorción de agua y baja porosidad que se requiere para la fabricación de productos cerámicos de quema blanca.

Tabla 3.15. Absorción de agua, porosidad abierta, porosidad cerrada y porosidad total de la pasta comercial y pastas experimentales quemadas a 1 000 °C

Propiedad física	% Absorción de agua	% Porosidad abierta	% Porosidad cerrada	% Porosidad total
Pasta comercial	19,28± 0,10	33,34 ± 0,05	0	33,34 ± 0,05
F₁	27,45 ± 0,10	41,48 ± 0,28	0	41,48 ± 0,28
F₂	27,41 ± 0,11	41,20 ± 0,27	0	41,20 ± 0,27
F₃	25,20 ± 0,10	39,12 ± 0,91	0	39,12 ± 0,91
F₄	27,52 ± 0,08	41,63 ± 0,32	0	41,63 ± 0,32
F₅	27,33 ± 0,11	41,79 ± 0,27	0	41,79 ± 0,27
F₆	27,63 ± 0,11	41,82 ± 0,34	0	41,82 ± 0,34
F₇	25,55 ± 0,14	39,85 ± 0,35	0	39,85 ± 0,35

En la Tabla 3.16 se observan los resultados obtenidos de las pruebas de absorción de agua, porosidad abierta, porosidad cerrada y porosidad total, expresadas en tanto por ciento, de las probetas quemadas a la temperatura de cocción de 1 100 °C correspondientes a la pasta comercial y a las pastas experimentales.

Tabla 3.16. Absorción de agua, porosidad abierta, porosidad cerrada y porosidad total de la pasta comercial y pastas experimentales quemadas a 1 100 °C

Propiedad física	% Absorción de agua	% Porosidad abierta	% Porosidad cerrada	% Porosidad total
Barbotina comercial	13,09 ± 0,04	24,97 ± 0,11	0	24,97 ± 0,11
F₁	12,52 ± 0,12	23,84 ± 0,88	0	23,84 ± 0,88
F₂	11,41 ± 0,15	23,04 ± 0,54	0	23,04 ± 0,54
F₃	13,31 ± 0,08	25,40 ± 0,53	0	25,40 ± 0,53
F₄	4,77 ± 0,11	10,43 ± 0,26	0	10,43 ± 0,26
F₅	10,26 ± 0,10	19,92 ± 0,62	0	19,92 ± 0,62
F₆	9,34 ± 0,11	18,37 ± 0,50	0	18,37 ± 0,50
F₇	15,03 ± 0,10	27,35 ± 0,62	0	27,35 ± 0,62

Se observa que las probetas quemadas a 1 100 °C, para la pasta comercial, presentan valores aproximados al 13 % para la absorción de agua, 25 % para la porosidad abierta, 0 % para la porosidad cerrada y 25 % para la porosidad total. Esto indica que las piezas cerámicas obtenidas a partir de la pasta comercial y quemadas a 1 100 °C, presentan una baja absorción de agua y porosidad, y por tanto la pasta comercial puede usarse en la fabricación de productos cerámicos de quema blanca.

Por otra parte se observa que las probetas quemadas a 1 100 °C para las pastas experimentales presentan valores entre 4 y 15 % para la absorción de agua, 10 y 27 % para la porosidad abierta, 0% para la porosidad cerrada y 10 y 27 % para la porosidad total. Esto indica que las piezas cerámicas obtenidas a 1100 °C, al presentar baja absorción de agua y porosidad, pueden usarse en la producción de piezas cerámicas de quema blanca.

Finalmente, los resultados de caracterización física y mecánica se presentan en la Tabla 3.17 con los valores obtenidos para la resistencia mecánica a la flexión, expresadas en kg/cm^2 , de las piezas cerámicas quemadas a las temperaturas de cocción de: 900, 1 000 y 1 100 °C correspondientes a la pasta comercial y a las pastas experimentales. La resistencia mecánica fue cuantificada mediante el módulo de resistencia a la rotura.

En la Tabla 3.17 se observa que la resistencia mecánica a la flexión aumenta en todas las formulaciones con el incremento de la temperatura de cocción, y esto se debe a que al disminuir el porcentaje de absorción de agua para las piezas aumenta el grado de compactación o sinterización de las piezas.

Para la barbotina comercial el mayor valor de resistencia mecánica se obtiene a la temperatura de cocción de 1 100 °C y para la formulación F_2 se obtiene el mayor valor de resistencia mecánica, aproximadamente 302 kg/cm^2 , a la temperatura de cocción de 1 100 °C. Lo cual indica que se obtienen valores elevados de resistencia mecánica a la flexión cuando se trabaja a una temperatura de cocción cercana a 1 100 °C.

Tabla 3.17. Resistencia a la flexión de la pasta comercial y pastas experimentales quemadas a 900, 1 000 y 1 100 °C

Módulo de ruptura (kg/cm ²)	Temperatura de cocción			
	110 °C	900 °C	1 000 °C	1 100 °C
Pasta Comercial	23,2 ± 0,17	63,5 ± 1,13	126,3 ± 0,6	224,0 ± 3,04
F₁	12,1 ± 0,10	19,0 ± 0,13	53,9 ± 0,56	181,5 ± 3,25
F₂	11,0 ± 0,21	15,7 ± 0,44	52,9 ± 0,21	301,9 ± 2,25
F₃	12,0 ± 0,16	14,5 ± 0,32	51,3 ± 1,13	280,4 ± 7,12
F₄	7,3 ± 0,07	12,7 ± 0,21	25,8 ± 0,57	209,8 ± 8,48
F₅	8,9 ± 0,16	12,4 ± 0,18	28,6 ± 0,35	154,9 ± 3,99
F₆	7,6 ± 0,10	13,9 ± 0,24	30,9 ± 0,50	146,2 ± 3,82
F₇	6,4 ± 0,11	9,3 ± 0,13	24,5 ± 0,31	153,1 ± 4,93

Por tanto se concluye que para obtener piezas cerámicas de quema blanca se deben trabajar a una temperaturas de cocción de cercanas 1 100 °C y con formulaciones próximas a la formulación F₂ para obtener altos valores de resistencia mecánica a la flexión y bajos valores de absorción de agua y porosidad.

3.3. EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA COMPOSICIÓN Y TEMPERATURA DE COCCIÓN DE LAS BARBOTINAS EXPERIMENTALES SOBRE LA ABSORCIÓN DE AGUA, POROSIDAD Y RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

La evaluación de la influencia de la composición y la temperatura de cocción de las barbotinas experimentales sobre la absorción de agua, porosidad y resistencia a la flexión de las piezas obtenidas, se realizó mediante dos análisis estadísticos

de 95 % de confianza realizados empleando el software estadístico Statgraphics Centurion XVI.

El primer análisis consideró un diseño de mezclas, el cual permitió evaluar el efecto de la formulación de las barbotinas sobre la absorción de agua, porosidad y resistencia a la flexión sin variar la temperatura de cocción.

En la Figura 3.16 se muestra la superficie de respuesta de la absorción de agua sobre las siete formulaciones a la temperatura de cocción de 900 °C.

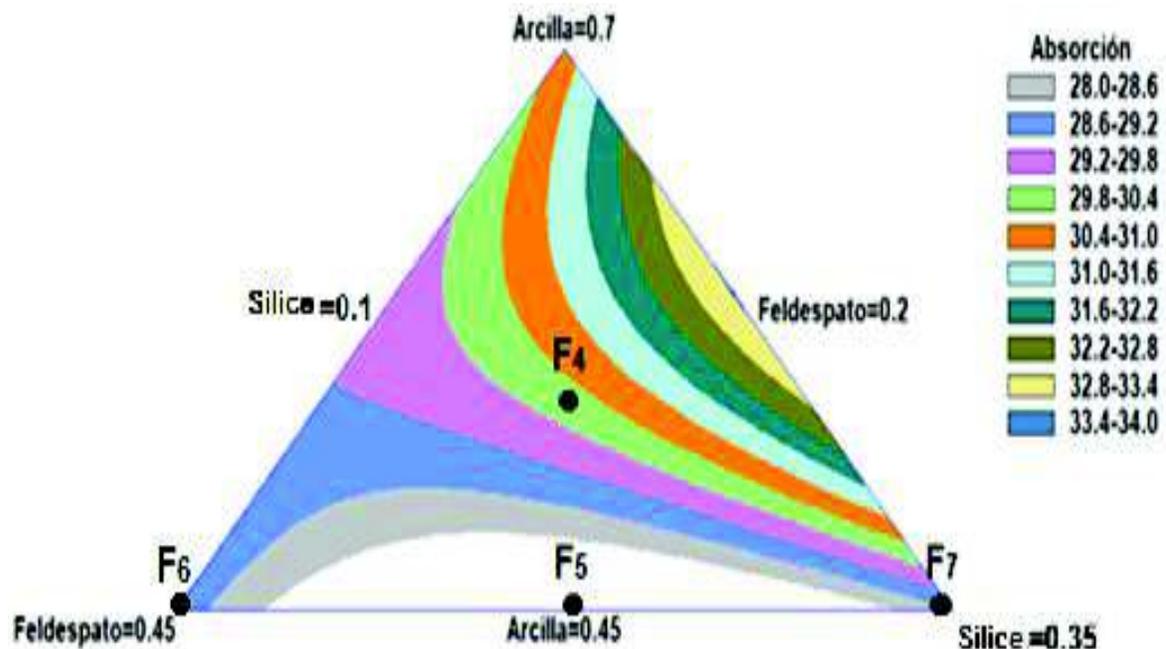


Figura 3.16. Triángulo de superficie de respuesta de la absorción de agua para las barbotinas experimentales a 900 °C

Se observa que la menor absorción de agua se obtiene para composiciones que se encuentran dentro de la superficie gris que contiene a las formulaciones F₅, F₆ y F₇; sin embargo el Valor-P, que se muestra en el Anexo XVII, obtenido del análisis es mayor a 0,05, por lo que no existe diferencia significativa entre las formulaciones sobre la absorción de agua a 900 °C. Esto se debe a que a la temperatura de cocción de 900 °C la pieza cerámica no alcanza a un grado de compactación o sinterización adecuada y por tanto se tienen altos valores de absorción de agua y porosidad.

En la Figura 3.17 se muestra el triángulo de superficie de respuesta para la porosidad, obtenido del diseño de mezclas para todas las formulaciones a la temperatura de cocción de 900 °C. Se observa que la menor porosidad se obtiene en puntos que se encuentran en la zona gris cercana a las formulaciones F₂, F₅ y F₆; sin embargo, el Valor-P obtenido del análisis es mayor a 0,05; por lo que no existe diferencia significativa entre las formulaciones sobre la porosidad a 900 °C.

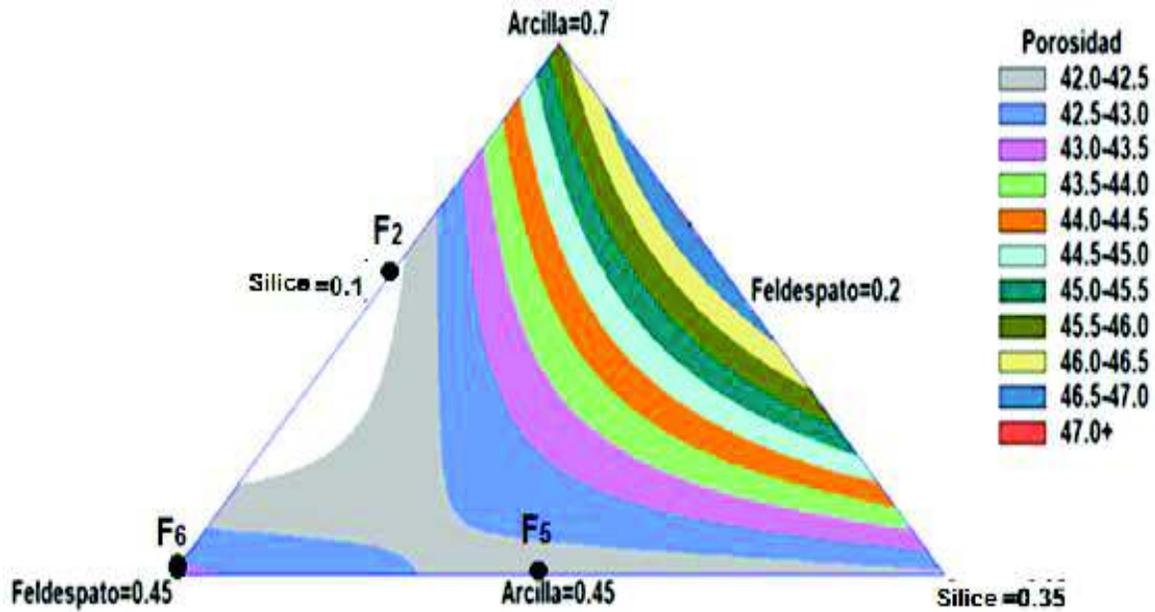


Figura 3.17. Triángulo de superficie de respuesta de la porosidad para las barbotinas experimentales a 900 °C

En la Figura 3.18 se muestra el triángulo de superficie de respuesta para la resistencia a la flexión, obtenido del diseño de mezclas, para todas las formulaciones a la temperatura de cocción de 900 °C. Se observa que la mayor resistencia se obtiene para las composiciones cercanas a la formulación F₁; para este análisis el Valor-P resultó ser menor a 0,05, lo cual indica que existe diferencia significativa entre las formulaciones y la resistencia a la flexión a la temperatura de cocción de 900 °C.

Por lo tanto, para se pueden formular barbotinas que contengan aproximadamente 70 % en arcilla, 20 % en feldespato y 10 % en sílice, para obtener piezas con resistencia a la flexión que se encuentren entre 9,2-10,2 kg/cm².

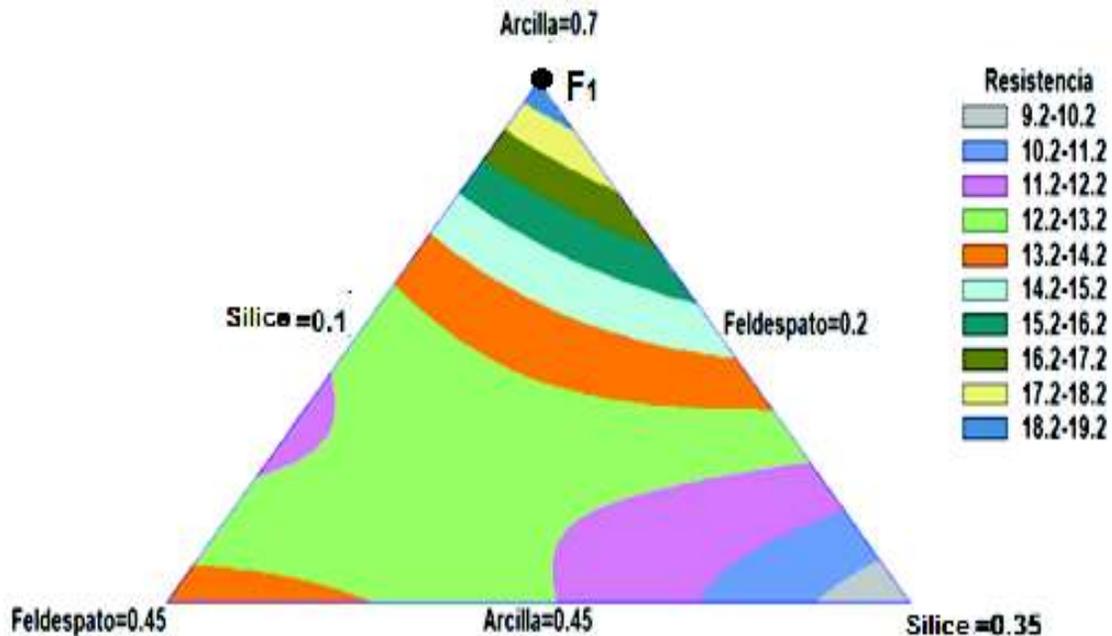


Figura 3.18. Triángulo de superficie de respuesta de la resistencia a la flexión para las barbotinas experimentales a 900 °C

En el Anexo XVIII se muestran las superficies de respuesta para la absorción de agua, porosidad y resistencia a la flexión para todas las formulaciones a las temperaturas de cocción de 1 000 °C y 1 100 °C. Estas superficies presentaron un Valor-P mayor a 0,05, por lo que se puede concluir que no existe diferencia significativa entre las formulaciones y las propiedades de absorción de agua, porosidad y resistencia a la flexión para las temperaturas de cocción de 1 000 °C y 1 100 °C.

Mientras que el segundo análisis se realizó considerando un diseño factorial 7x3, el cual permitió evaluar el efecto de las siete formulaciones y la temperatura de cocción sobre la absorción de agua, porosidad y resistencia a la flexión. Los valores-P del diseño de mezclas se encuentran en el Anexo XVIII.

Los resultados obtenidos del diseño factorial 2^3 mostraron la influencia de la composición y la temperatura de cocción sobre la absorción de agua, porosidad y resistencia a la flexión mediante diagramas de Pareto, gráficas de efectos principales e interacción entre variables y contornos de superficie de respuesta estimada.

En la Figura 3.19 se muestra el diagrama de Pareto para la absorción de agua, en donde se evalúa el efecto significativo de la composición y la temperatura de cocción sobre la absorción de agua. Se observa que la temperatura de cocción tiene un doble efecto significativo sobre la absorción, lo cual se confirma por el análisis previo de las Tablas 3.14, 3.15 y 3.16 en donde se observó que la absorción de agua disminuye con el incremento de la temperatura de cocción, mientras que la formulación no tiene efecto significativo. Por lo tanto, se concluye que la temperatura de cocción afecta significativamente a la absorción de agua.

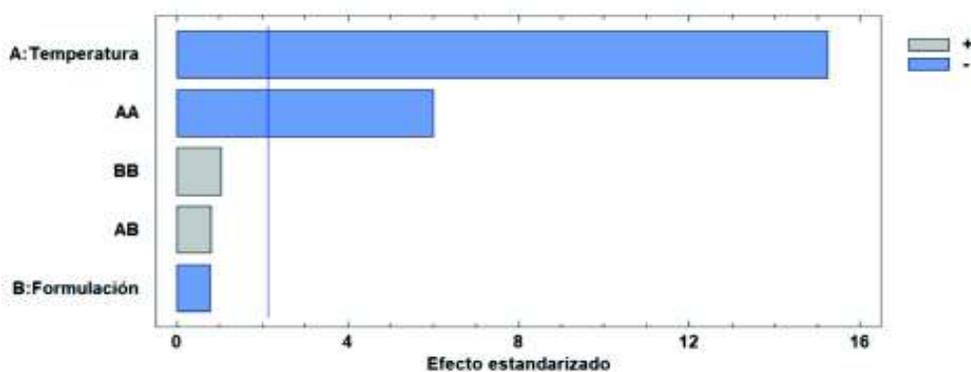


Figura 3.19. Diagrama de Pareto estandarizado para la absorción de agua

En la Figura 3.20 se muestra la gráfica de efectos principales para la absorción de agua en donde el cambio de -1 a 1 indica el aumento de temperatura de 900 °C a 1 000 °C, en el mismo se observa que al aumentar la temperatura de cocción la absorción de agua disminuye, mientras que para las formulaciones ente la F₁ y F₇ no se observa un efecto apreciable sobre la absorción de agua.

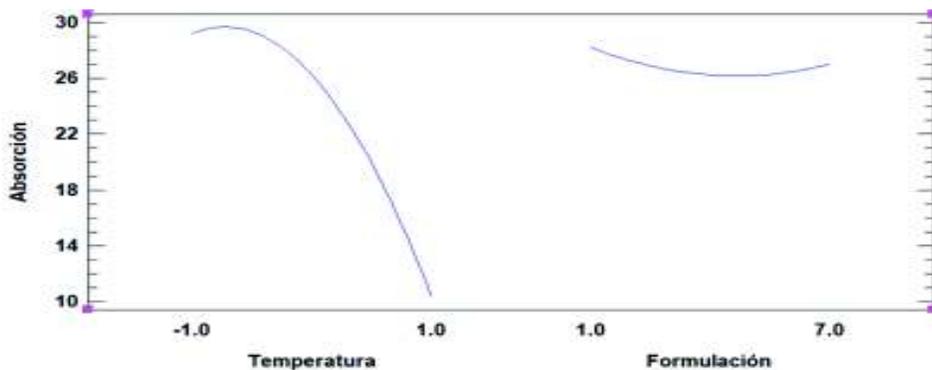


Figura 3.20. Gráfica de efectos principales para la absorción de agua

En la Figura 3.21 se muestra la gráfica de interacción para la absorción de agua, en donde se observa que la formulación no tiene efecto significativo sobre la absorción de agua, ya que con el aumento de la temperatura de cocción, la absorción disminuye pero las curvas entre formulaciones tienden a juntarse. Por tanto se concluye que no existe relación entre la formulación y la absorción de agua.

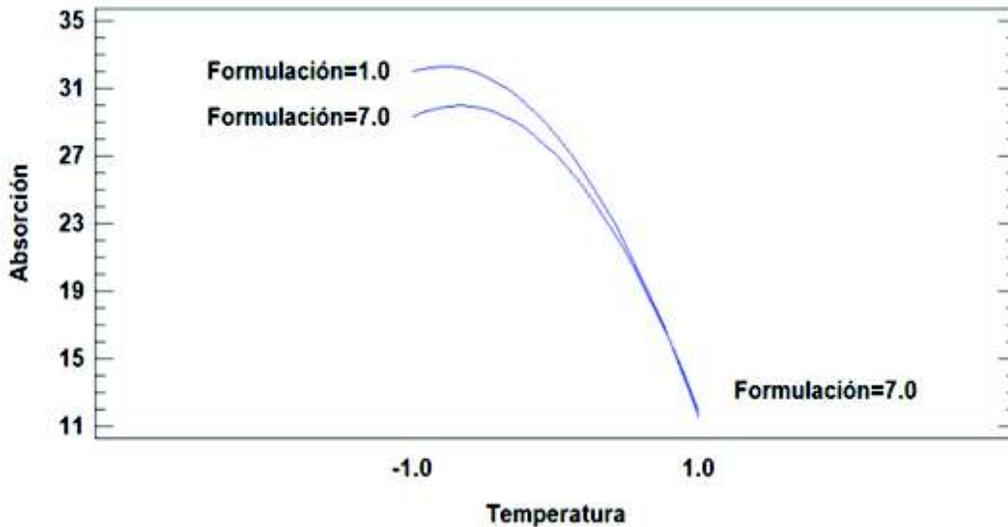


Figura 3.21. Gráfica de interacción para la absorción de agua

En el Anexo XVIII se muestran los diagramas de Pareto para la porosidad y la resistencia a la flexión en donde se observa que la temperatura tiene un doble efecto significativo sobre la porosidad y la resistencia, hecho que se demuestra del análisis realizado a las Tablas 3.14, 3.15 y 3.16 en donde se observó que la absorción de agua disminuye con el aumento de la temperatura de cocción, mientras que la resistencia a la flexión aumenta.

Por otra parte, las gráficas de efectos principales para la porosidad y resistencia a la flexión mostraron que la porosidad disminuye con el aumento de la temperatura de cocción, siendo la formulación 4 la que presenta menor porosidad; mientras que para la resistencia mecánica se observa que al aumentar la temperatura de cocción ésta aumenta, siendo la formulación F₁ la que posee mayor resistencia a la flexión.

Finalmente en el Anexo XVIII se muestran las gráficas de interacción para la porosidad y la resistencia a la flexión, en donde se observa que la formulación no tiene efecto significativo sobre la porosidad, mientras que sobre la resistencia mecánica a la flexión la formulación F_1 no tiene un efecto significativo, presentando la mayor resistencia mecánica a la flexión con el aumento de la temperatura de cocción.

En la Figura 3.22 se muestra la superficie de respuesta estimada para conocer los valores óptimos de absorción de agua, porosidad y resistencia a la flexión.

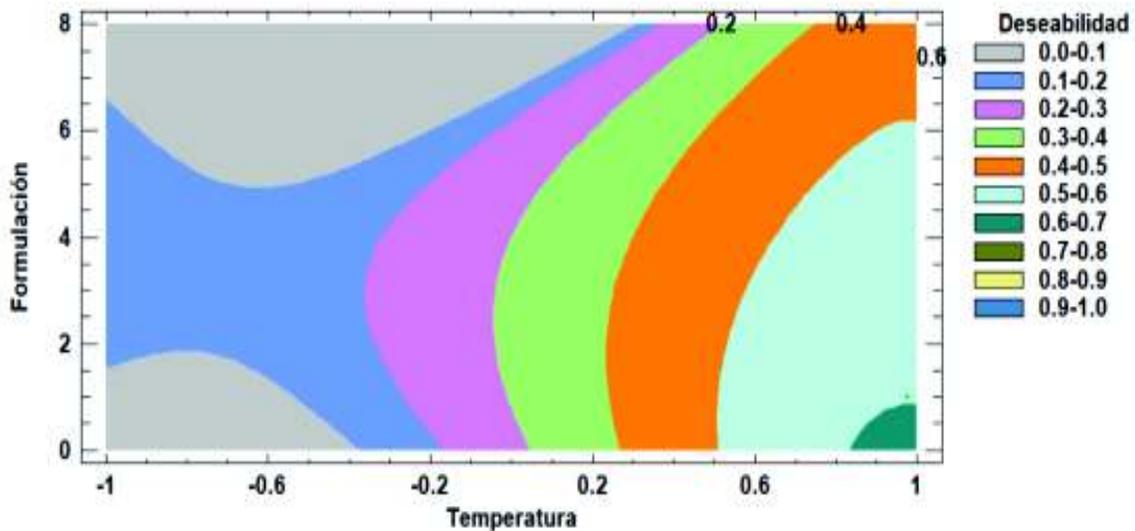


Figura 3.22. Gráfica de contornos de la superficie de respuesta estimada para las formulaciones, absorción de agua, porosidad, resistencia mecánica a la flexión y temperatura de cocción

Los valores óptimos sugeridos de la gráfica de contorno de superficie estimada fueron 12,12 % para la absorción de agua, 23,55 % para la porosidad total y 240,37 kg/cm² para la resistencia a la flexión a una temperatura de 1 100 °C, correspondientes a composiciones cercanas a la formulación F_1 y F_2

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

- La caracterización físico-química, mineralógica y cerámica de los minerales arcillosos evaluados evidenció en todos los casos, el uso potencial positivo como materias primas para la elaboración de piezas cerámicas. Distinguiéndose la arcilla AR-MO-17-01, el feldespato FE-BO-17-02 y sílice SI-NP-17-02 como materias primas para la elaboración de piezas blancas. Asimismo, la arcilla AR-AZ-17-01, el feldespato FE-BO-17-01 y sílice SI-NP-17-01, como materias primas para la elaboración de piezas rojas, debido a su alta proporción de óxidos de hierro.
- La formulación óptima para la obtención de la barbotina desarrollada a partir de un diseño experimental Simplex Centroide, correspondió con una mezcla 70 % en arcilla AR-MO-17-01, 20 % en feldespato FE-BO-17-02 y 10 % en sílice SI-NP-17-02. A partir de la cual se obtuvo una barbotina, con un 72 % de contenido de sólidos, 46 % de contenido en humedad, $1,77 \text{ g/cm}^3$ de densidad y 415 cP de viscosidad, valores que se corresponden con los utilizados en barbotinas comerciales. Asimismo, se determinó que con esta barbotina se pueden obtener piezas de 3 mm de espesor en un tiempo de 10 min de vaciado.
- Finalmente la investigación permitió determinar que a partir de los minerales arcillosos disponibles en el Ecuador, se pueden elaborar barbotinas cerámicas hasta con 72 % de concentración de sólidos, de los cuales se pueden obtener piezas con baja absorción de agua ($\approx 12 \%$), baja porosidad (≈ 10) y alta resistencia a la flexión ($\approx 240 \text{ kg/cm}^2$) a una temperatura de cocción de $1\ 100 \text{ }^\circ\text{C}$.

4.2. RECOMENDACIONES

- Evaluar el efecto del uso de distintos tipos de defloculantes en la reología de las barbotinas cerámicas desarrolladas a partir de minerales arcillosos del Ecuador, a fin de optimizar la suspensión de los minerales arcillosos.
- Evaluar el efecto de la granulometría de los minerales arcillosos sobre la absorción de agua, porosidad y resistencia mecánica a la flexión de pastas obtenidas a partir de barbotinas cerámicas de uso artesanal.
- Evaluar las propiedades físico-químicas de las arcillas del Ecuador en aplicaciones cerámicas artesanales.
- Estudiar el efecto de plastificantes en barbotinas cerámicas de uso artesanal.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abad M. (2013). *Guía del proceso industrial para la fabricación de baldosas cerámicas*. Recuperado de: <http://repositorio.uide.edu.ec/bitstream/37000/583/1/T-UIDE-0534.pdf>.
2. Afanador N., Ibarra A. y López C. (2013). Caracterización de arcillas empleadas en pasta cerámica para la elaboración de ladrillos en la zona de Ocaña, Norte de Santander. *Revista Épsilon*. 20(1), pp.101-109.
3. Alcócer S. y Gachet D. (2007). *Desarrollo de objetos utilitarios en cerámica, otorgándoles un valor agregado a través de nuevas propuestas tecnológicas y de diseño*. Recuperado de: <http://dspace.udla.edu.ec/handle/33000/410>.
4. Amorós J. (2004). Manual para el control de la calidad de materias primas arcillosas. Instituto de tecnología cerámica. Castellón-España. (Febrero, 2018)
5. Andrade F., Al-Qureshi H. y Hotza D. (2011). *Applied Clay Science*. Elsevier. 51(1), 1-7.
6. ASTM. (2005). *ASTM C1603-05a: Standard Test Method for Measurement of Solids in Water*. DOI: 10.1520/C1603-05A.
7. ASTM. (2006-a). *ASTM C373: Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products*. DOI: 10.1520/C0373-14A
8. ASTM. (2006-b). *ASTM C674 Standard Test Methods for Flexural Properties of Ceramic Whiteware Materials*. DOI: 10.1520/C0674-13.
9. ASTM. (2009-a). *D2488-09a Standard: Practice for Description and Identification of Soils (Visual-Manual Procedure)*. DOI: 10.1520/D2488-09A.
10. ASTM. (2009-b). *ASTM D7263: Standard Test Methods for Laboratory Determination of Density (Unit Weight) of Soil Specimens*. DOI: 10.1520/D7263-09.

11. ASTM. (2013). *ASTM D1475-13: Standard Test Method for Density of Liquid Coatings, Inks, and Related Products*. DOI: 10.1520/D1475.ASTM. (2014-a).
12. ASTM. (2014-a). *ASTM C325: Standard Guide for Wet Sieve Analysis of Ceramic Whiteware Clays*. DOI: 10.1520/C0136_C0136M-14.
13. ASTM. (2014-b). *ASTM D1535-14: Standard Practice for Specifying Color by the Munsell System*. DOI: 10.1520/D1535-14.
14. ASTM. (2014-c). *ASTM D2974-00: Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils*. DOI: 10.1520/D2974-00.
15. ASTM. (2014-d). *ASTM D1200-10: Standard Test Method for Viscosity by Ford Viscosity Cup*. DOI: 10.1520/D1200-10R14.
16. ASTM. (2015). *ASTM D2196-10: Standard Test Methods for Rheological Properties of Non-Newtonian Materials by Rotational (Brookfield type) Viscometer*. DOI: 10.1520/D2196-10.
17. ASTM. (2017). *D4318: Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. DOI: 10.1520/D4318-
18. BREF. (2011). *Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea: Sector de la fabricación cerámica*. Recuperado de: http://www.prtr-es.es/Data/images/MTD_Ceramica_ES.pdf. (Junio, 2017).
19. Cely L. y Bolívar R. (2015). Materia prima para la industria cerámica de Norte de Santander. II. Evaluación del comportamiento térmico y su incidencia en las propiedades tecnológicas. *Respuestas*. 20(1), 84-94.
20. CENDAR (Centro de Investigación y Documentación para la Artesanía). (2001). *Caracterización del Subsector de la Cerámica y Alfarería Artesanal*. Recuperado de: <http://repositorio.artesanasdecolumbia.com.co/bitstream/001/1832/1/INSTD%202001.%2023.pdf>. (Junio, 2017).
21. Correa A. y Cuenca Z. (2011). *Análisis del mercado de cerámica*

- artesanal ecuatoriana en Madrid-España*. Recuperado de: <http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/1047/3/658X4915.pdf>. (Junio, 2017).
22. Díaz L. y Torrecillas R. (2002). Arcillas cerámicas: una revisión de sus distintos tipos, significados y aplicaciones. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. 41(5), 459-470.
 23. Domínguez J, y Schifter I. (2003). *Las arcillas: El barro noble*. (2da ed., Vol. 109). Editorial Fondo de Cultura Económica de España. Madrid-España.
 24. Durán J., Montoya J., Silva P., Peralbo R. y Castro J. (2014). Validación de nuevos materiales cerámicos a partir de rocas de desecho de minería. Propiedades mecánicas. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. 53(6), 279-288.
 25. Edoziuno F., Iloghalu F., Akaeze M., Umeohia N., Nwaeju C. y Anene F. (2016). A study of casting characteristics of some Nigerian clay slips for industrial production. *International Journal of Advanced Scientific Research*. 1(2), 41-45.
 26. Euroconsultant. (1989). Agricultural Compendium for Rural Development in the Tropics and Subtropics. *Soil Science*. Volumen 137, 1era Edición. Elsevier.
 27. Evcin A. (2011). Investigation of the effects of different deflocculants on the viscosity of slips. *Academic Journals*. 6(11), pp. 2302-2305.
 28. Fajardo A. (2017). *Diseño de una planta de elaboración de pastas de moldeo y juguetes lúdicos con material arcilloso de Cotopaxi y Pastaza*. Recuperado de: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/17056/1/CD-7639.pdf>. (Junio, 2017).
 29. Fantozzi G., Nièpce J. y Bonnefont G. (2013). *Les Céramiques Industrielles. Propriétés, mise en forme et applications*. Dunod. Paris.
 30. Gajek M., Rapacz-Kmita A. , Dudek M. y Partyka J. (2016). Mechanical properties and microstructure fired clinker tiles based on Wierzbka I Raw Material. *Advances in Materials Science*, 16(1),

17-26. Doi: 10.1515/adms-2016-0002

31. Galán E, y Aparicio P. (2006). *Materias primas para la industria cerámica*. Sociedad Española de Mineralogía. Editorial SEM. Alicante.
32. García A. (1975). *Método de ensayo para la determinación de la capacidad de absorción de agua de los ladrillos*. Recuperado de: <http://materconstrucc.revistas.csic.es/>. (Junio, 2017).
33. Gil C., Peiró M., Gómez J., Chiva L., Cerisuelo E., Carda J.(2006). Estudio de la porosidad en soportes de gres porcelánico. *Qualicer*. 43-48.
34. Goodman H., Stirling C. y Shaw R. (1999). Process for producing clay composition for use un slip casting. United States Patent.
35. Grimán S., Lascano L., Rojas N. y Uribe R. (2015). Influencia de las variables de procesamiento tecnológico industrial en la aparición del defecto de eflorescencia en piezas de arcilla cocida. *Revista Escuela Politécnica Nacional*, 36 (3) 14-23.
36. Güeto J, (2005). *Tecnología de los Materiales Cerámicos*. Volumen 1. Editorial Díaz Santos. España.
37. Guzmán A., Torres J., Cedeño M., Delvasto S., Amigó V. y Sánchez E. (2013). Fabricación de gres porcelánico empleando ceniza de tamo de arroz en sustitución del feldespato. *Boletín de la Sociedad de Española de Cerámica y Vidrio*. 52(6), 283-290.
38. Lázaro A. Portillo G., De la Torre J y Bastida J. (2012). Características físicas y composicionales de pastas de gres porcelánico con arcillas de Teruel. *Boletín de la Sociedad de Cerámica y Vidrio*. 51(4), 201-210.
39. Manoharan C., Sutharsan P., Dhanapandian S. y Venkatachalapathy R. (2012). Characteristics of some clay materials from Tamilnadu, India, and their posible ceramic uses. *Cerámica*. 58(1), 412-418.
40. Martini E., Fortuna D., Fortuna A., Rubino G., Tagliaferri V. (2017). Sanitser, an innovative sanitary ware body, formulated with waste glass and recycled materials. *Cerâmica*. 63(1), 542-548.
41. Nepomucena T., Maciel da Silva A. y Cirillo M. (2013). Modelos ridge em

planejamentos de misturas: uma aplicação na extração da polpa de pequi. *Quim Nova*. 36(1), 159-164.

42. Noni A., Hotza D., Cantavella V., Sánchez E. (2009). Influence of composition on mechanical behaviour of porcelain tile. Part I: Microstructural characterization and developed phases after firing. *Materials Science and Engineering*. A527(2010). 1730-1735. DOI: 10.1016/j.msea.2009.10.057.
43. Ochoa R., Gutiérrez C., Rendón J. y Rodríguez J. (2017). Effect of preparation variables of plaster molds for slip casting of sanitary ware. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. 56(1), 263-272.
44. Ortega D. (2013). *Desarrollo de un modelo de mezclas minerales considerando variables de desempeño en dispersiones de uso cerámico*. Departamento de Materiales y Minerales. Medellín, Colombia.
45. Osipov V. (2012). Density of Clay Minerals. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 48(6), 231-240.
46. Parras J. (2001). *Alteración de pizarras: mineralogía, propiedades y aplicaciones en la industria cerámica*. Recuperado de: <http://www.sea-arcillas.es/publicaciones/Curso%20Materias%20primas%20de%20produccion-2001.pdf>. (Junio, 2017).
47. Parveen S. y Jahan S. (2010). Investigation on Physico-Chemical Properties of Vitreous China Sanitary Ware from Local Clays. *Bangladesh J. Sci. Ind. Res.* 45(4), 387-392.
48. Pilaguano Y. (2007). *Estudio de la prefactibilidad técnico económico para la elaboración de barbotina de uso cerámico artesana, a partir de lodos residuales de Edesa*. (Tesis) Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
49. Portillo C, Lázaro V. y García A. (2011). *Reología de Materiales Cerámicos. Reología Práctica y Aplicada*. Asociación Española de Científicos. Volumen 1. Valencia- España.
50. Rendtorff N., Garrido L. y Aglietti E. (2009). *Propiedades mecánicas y de*

fractura de compositos mullita zirconia zircón obtenidas por sinterización directa. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/280729147>.

51. Restrepo O. (2011). *Baldosas cerámicas y gres porcelánico: Un mundo en permanente evolución.* Centro Editorial Facultad de Minas. Primera Edición. Medellín, Colombia.
52. Richerson D. (2005). *Modern Ceramic Engineering: Properties, Processing, and Use in Design.* Tercera Edición. New York
53. SACMI. (2004). *Tecnología Cerámica Aplicada.* Volumen 1. Editorial Ibérica. Castellón- España.
54. Sancho L. (2013). *El uso de componentes orgánicos en pastas cerámicas: Aserrín, estiércol y comején.* Costa Rica. *Revista pensamiento actual.* 4(5) 67-74.
55. Santos J., Malagón P., y Córdoba E. (2011). *Caracterización de arcillas y preparación de pastas cerámicas para la fabricación de tejas y ladrillos en la región de Barichara.* Santander. *Dyna.* 78(167). 50-58.
56. Sarango M. (2011). *Estudio de la densificación de una colección de arcillas ecuatorianas en función del tamaño de partícula y de la temperatura de sinterización.* Recuperado de: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/3771/1/CD-3552.pdf> . (Junio, 2017).
57. SIBELCO EUROPE. (2010). *Multi-Mineral Knowledge: Casting Slip Control.* Recuperado de: <http://www.sibelco.eu/sites/www.sibelco.eu/files/Casting%20Slip%20Control.pdf>. (Junio, 2017).
58. Singer F, y Singer S. (1971). *Cerámica Industrial.* (9na Ed., Vol 1). Editorial Urmo S.A. Bilbao
59. Slattery J. (2010). *El artesano y la comercialización del patrimonio cultural del norte de Argentina.* Recuperado de http://digitalcollections.sit.edu/isp_collection/933. (Junio, 2017).
60. Solera E., Jardiel T., Villegas M. y Fernández J. (2002). *Influencia de las diferentes etapas de procesamiento sobre la microestructura de dispositivos multicapa basados en PZT.* *Boletín de la Sociedad*

Española de Cerámica y Vidrio. 41(1), 166-170.

61. The American Ceramic Society. (2015). *Ceramic Processing: Slip Casting. Ceramic and Glass Industry Foundation*. Recuperado de: <http://ceramics.org/wp-content/uploads/2014/04/Slip-Casting-Lesson-111.pdf>. (Febrero, 2018).
62. Tufiño G, Vieira N, Lascano L, y Guerrero V. 2012. *Propiedades térmicas de arcillas ecuatorianas para ser utilizadas como material refractario*. (Tesis) Escuela Politécnica Nacional. Quito-Ecuador.
63. Uribe, R. (2015). Investigaciones de Materias Primas Minerales No Metálicas en el Ecuador. *Revista Escuela Politécnica Nacional*. 36(3). 34-44.