



UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS

**“Dosificación de materias primas locales para la elaboración
de ladrillos refractarios”**

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de
INGENIERO EN MINAS**

Autor:

CRISTIAN RODRIGO BAUTISTA DOMÍNGUEZ

Director:

FERNANDO TULIO VALENCIA GUARICELA

CUENCA - ECUADOR

2021

DEDICATORIA

La tesis va dedicada a mi familia que siempre me brindó su apoyo y confió en mí por su ayuda en su valioso tiempo, en especial a mi padre Rodrigo que tiene una lucha constante con su salud y mi madre Carmen que siempre me empujaron a terminar mis estudios para así convertirme en una persona con ética y valores como profesionalmente correcta, de la misma forma para mis hermanos Franklin y Alejandro, que mediante su apoyo y tiempo me ayudaron en momentos difíciles y complicados.

AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento a la Universidad del Azuay al ser una gran institución y darme la oportunidad de terminar mis estudios de igual manera que profesores y compañeros, así también al personal de laboratorios.

De igual manera agradezco a mi tribunal conformado para dirigir mi tesis, especialmente a mi director de tesis Ing. Fernando Valencia y también al Dr. Juan Calderón, quienes siempre estuvieron dispuestos a ayudarme con su dirección, consejos y su gran trayectoria me han encaminado para culminar mis estudios con éxito.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE ANEXOS	x
RESUMEN	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN	3
CAPÍTULO I	4
MARCO TEÓRICO.....	4
1.1 Generalidades	4
1.1.1 Redes de Boltzmann.....	4
1.1.2 Estructura y propiedades de las cerámicas	5
1.1.3 Estructura de silicatos cristalinos	8
1.1.4 Imperfecciones y fallas mecánicas en las cerámicas.....	10
1.1.5 Deformación de los cerámicos a elevadas temperaturas	14
1.1.6 Cerámicos a base de arcilla	16
1.1.7 Características de la arcilla.....	17
1.1.8 Conformación, procesamiento y aplicaciones de productos de arcilla	18
1.1.9 Visión general y clasificación de los materiales refractarios	21
1.1.10 Materias primas utilizadas para la elaboración de refractarios	24
1.1.11 Propiedades de los materiales refractarios	25
1.1.12 Procedimientos empleados para la fabricación de refractarios	27
CAPÍTULO II.....	34

CONSIDERACIONES INICIALES Y PREPARACIÓN DE MATERIAS PRIMAS	34
2.1 Consideraciones de la metodología experimental aplicada en el estudio	34
2.2 Diagrama de flujo para elaboración de un ladrillo refractario	36
2.3 Preparación de materias primas empleadas en el procedimiento experimental	37
2.3.1 Secado del material	37
2.3.2 Conminución del material	38
2.3.3 Tamizado	40
2.3.4 Lavado de caolín	41
2.3.5 Secado del caolín pos lavado	46
2.3.6 Tamizado del caolín	46
2.3.7 Diseño de molde de matricería	46
CAPITULO III	48
DOSIFICACIÓN, IDENTIFICACIÓN Y NOMBRAMIENTO DE LAS MUESTRAS	48
3.1. Nombramiento e identificación de muestras	48
3.2. Dosificación de masa y agua	50
CAPITULO IV	53
ELABORACIÓN DE LOS LADRILLOS REFRACTARIOS Y PRUEBAS DE LABORATORIO	53
4.1 Elaboración de ladrillos refractarios	53
4.2 Valores de masa anterior a la quema	55
4.3 Volumen de las muestras anterior a la quema	56
4.4 Peso de las muestras anterior a la quema	58
4.5 Horno de quema	59
4.6 Proceso de quema de las muestras	61
4.6.1 Programas de quema	61

4.6.2	Valores pos quema	64
4.6.3	Volumen en mm ³ pos quema.....	65
4.6.4	Peso post quema	66
4.7	Proceso de pruebas de absorción.....	67
4.8	Determinación de la masa de la muestra una vez retiradas del agua	68
4.9	Cálculos de la absorción:.....	70
4.10	Interpretación de resultados	71
CONCLUSIONES		73
RECOMENDACIONES.....		76.
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Representación de una vacante y de un átomo intersticial	6
Figura 1.2 Estructura cristalina de cerámico (1) Perovskite, (2) Parte de celda de Corindón, (3) Parte de celda de Espinel, (4) Grafito.....	8
Figura 1.3 Estructura cristalina de la cristobalita.....	8
Figura 1.4 Estructura tetraédrica del Silicato.....	10
Figura 1.5 Representación de dislocación en borde.....	11
Figura 1.6 Representación del volumen de la porosidad	12
Figura 1.7 Perfil de la tensión que presenta la grieta.....	13
Figura 1.8 Efecto de la composición y temperatura en la viscosidad del vidrio	15
Figura 1.9 Pasos para el moldeo en barbotina	19
Figura 1.10 Secado de una pieza de cerámica	20
Figura 1.11 Representación del diagrama de fases (Al ₂ O ₃ – SiO ₂).....	23
Figura 1.12 Equipos utilizados para la molienda de materias primas.....	28
Figura 1.13 Prensa hidráulica para la elaboración de ladrillos refractarios.....	30
Figura 1.14 Fases del proceso de sinterizado.....	32
Figura 2.1 Diagrama de flujo de elaboración del refractario	37
Figura 2.2 Horno de secado y visualización de la sección de adecuación de temperatura	37
Figura 2.3 Molino de bolas y muestra de material de arcilla con tamaño de granos reducido.....	39
Figura 2.4 Molino de mandíbulas	39
Figura 2.5 Equipo de tamizado	40
Figura 2.6 Equipo de tamizado Humbol empleado para la arcilla.....	40
Figura 2.7 Equipo de tamizado Humbol empleado para la chamota	41
Figura 2.8 Proceso de lavado y celda de flotación Denver.....	43
Figura 2.9 Esquema de funcionamiento de un hidrociclón. 1) Alimento; 2) Rebose; 3) Descarga; 4) Torbellino secundario; 5) Núcleo de aire; 6) Torbellino Primerio	44
Figura 2.10 Equipo hidrociclón Krebs.....	45
Figura 2.11 Molde de matricería en la fabricación de muestras	47
Figura 3.1 Determinación de las cantidades de material para cada muestra según dosificación planteada.....	49

Figura 3.2 Preparado de la mezcla y herramienta de medición del volumen de agua añadido	50
Figura 4.1 mezcla de material y tacos de madera empleados para compactar la mezcla	53
Figura 4.2 Amasado de la mezcla	54
Figura 4.3 Mezcla de los diferentes materiales colocadas en los moldes	54
Figura 4.4 Determinación de las masas del material moldeado y secado a la intemperie empleando balanza digital.....	55
Figura 4.5 Representación gráfica de las diferentes masas en Kg determinadas para cada una de las muestras.....	56
Figura 4.6 Toma de las dimensiones de las muestras	57
Figura 4.7 Representación gráfica de los diferentes volúmenes en mm ³ determinados para cada uno de las muestras	57
Figura 4.8 Representación gráfica de los diferentes pesos en Kg m/s ² (Newtons), determinados para cada una de las muestras.....	58
Figura 4.9 Horno de quema	59
Figura 4.10 Muestras pre quema, 900 °C y 3 hr	62
Figura 4.11 Muestras pre quema, 1000 °C y 3 hr 20 min	62
Figura 4.12 Muestras pre quema, 1100 °C y 3 hr 40 min	63
Figura 4.13 Muestras pre quema, 1200 °C y 4 hr	63
Figura 4.14 Muestras pre quema, 1300 °C y 4 hr 20 min	64
Figura 4.15 Muestras pos quema y balanza digital.....	64
Figura 4.16 Representación gráfica de las diferentes las masas obtenidas en Kg para cada muestra pos quema.....	65
Figura 4.17 Representación gráfica de las diferentes las masas obtenidas en volumen en mm ³ pos quema	66
Figura 4.18 Representación gráfica de los diferentes pesos en Kg m/s ² pos quema ..	67
Figura 4.19 Absorción de agua pos quema.....	68
Figura 4.20 Muestras en reposo retiradas del agua.....	68
Figura 4.21 Medición de la masa en Kg de cada muestra posterior a ser sumergidas en agua por 24 hr.....	69
Figura 4.22 Representación gráfica de las masas de cada muestra en Kg que fueron sumergidas en agua por 24 horas	70
Figura 4.23 Representación gráfica de % de absorción.....	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Consideraciones generales del procedimiento experimental aplicado en el estudio	34
Tabla 2.2 Consideraciones generales del procedimiento experimental aplicado en el estudio	35
Tabla 2.3 Resultados de Recuperación de Al ₂ O ₃	42
Tabla 3.1 Mezclas, descripción general	48
Tabla 3.2	49
Tabla 3.3 Datos de las diferentes muestra, dosificación y proporciones de la mezcla para la elaboración de los ladrillos refractarios	51
Tabla 3.4 Tabla resumen de dosificaciones para muestras, tomando en cuenta su origen y si se aplicó o no proceso de lavado	52
Tabla 4.1 Tabla resumen con las masas obtenidos en Kg para cada muestra.....	55
Tabla 4.2 Tabla resumen con los volúmenes obtenidos en mm ³ para cada muestra ...	57
Tabla 4.3 Tabla resumen con los pesos en Kg m/s ² (Newtons) para cada muestra	58
Tabla 4.4 Tabla resumen con las masas obtenidas en Kg para cada muestra pos quema	65
Tabla 4.5 Tabla resumen con las masas obtenidas en volumen en mm ³ post quema ..	66
Tabla 4.6 Tabla resumen de los pesos en Kg m/s ² post quema	67
Tabla 4.7 Tabla resumen de las masas de cada muestra en Kg que fueron sumergidas en agua por 24 horas	69
Tabla 4.8 Tabla resumen de % de absorción	71

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Motor estacionario de molino de bolas	81
Anexo 2 Factura de pruebas de quema	81
Anexo 3 Silice utilizado para la limpieza de molino de bolas	82
Anexo 4 Tambor utilizado en el molino de bolas	82
Anexo 5 Envases utilizados para preparación y tratamiento de materiales	83
Anexo 6 Tanque de 55 Gl para recolección de arcilla Tarqui	83
Anexo 7 Posible horno de quema descartado temperatura máxima 800°C	83
Anexo 8 Material preparado O3 listo para adición de agua.....	84
Anexo 9 Muestra sumergida en agua O2a	84
Anexo 10 Horno utilizado para pruebas de quema	85
Anexo 11 Especificaciones del Horno utilizado para pruebas de quema	85
Anexo 12 Resumen de resultados de análisis químico	86

DOSIFICACIÓN DE MATERIAS PRIMAS LOCALES PARA LA ELABORACIÓN DE LADRILLOS REFRACTARIOS.

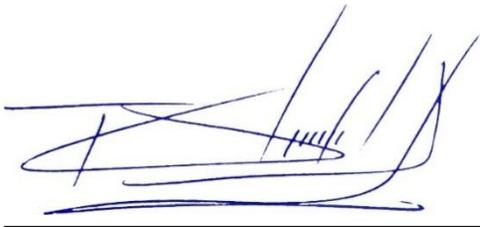
RESUMEN

El presente trabajo investigó una alternativa para realizar pastas que podrían ser utilizadas en la construcción de ladrillos refractarios a base de tres tipos de arcilla y caolines disponibles en la localidad. El procedimiento aplicado consideró las fases de secado, trituración, molienda y tamizado.

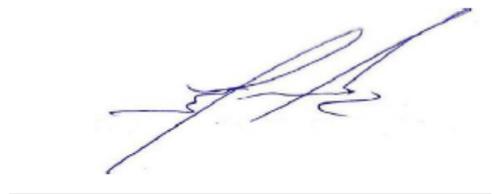
Se dosificó la arcilla y el caolín a diferentes proporciones, las diferentes muestras, fueron analizadas para verificar propiedades como absorción de agua, contracción pos quema, consistencia y resistencia térmica, así como otras asociadas al comportamiento del material dadas las condiciones en el moldeo y secado.

Como resultados destacados, se tuvo que, un proceso preliminar de lavado por hidrociclón favorece la preparación de mezclas generadoras de ladrillos refractarios con mayor resistencia térmica y que la pasta más óptima según su comportamiento y propiedades, es la que contienen arcillas de los sectores Susudel y Tarqui, las cuales poseen mejores condiciones para la fabricación de ladrillos refractarios.

Palabras clave: Dosificación, arcillas, caolines, ladrillo refractario.



Fernando Tulio Valencia Guaricela
Director del Trabajo de Titulación



Leonardo Aníbal Núñez Rodas
Coordinador de Escuela



Cristian Rodrigo Bautista Domínguez

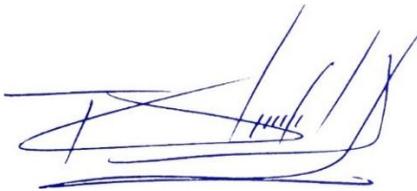
Autor

DOSAGE OF LOCAL RAW MATERIALS TO MANUFACTURE REFRACTORY BRICKS

ABSTRACT

This research investigated an alternative to make pastes to be used in the construction of refractory bricks based on three types of clay and kaolin available in the area. The procedure applied considered the phases of drying, crushing, grinding and sieving. Clay and kaolin were dosed at different proportions, the different samples were analyzed to verify properties such as water absorption, post-burn contraction, consistency and thermal resistance, as well as others associated with the behavior of the material given the conditions in molding and drying. As outstanding results, a preliminary hydrocyclone washing process favors the preparation of generating mixtures of refractory bricks with greater thermal resistance and that the most optimal paste according to its behavior and properties, is the one containing clays from the Susudel and Tarqui, which have better conditions to manufacture refractory bricks.

Keywords: Dosage, clays, kaolin, firebrick.



Fernando Tulio Valencia Guaricela
Director of the Degree Work



Leonardo Aníbal Núñez Rodas
School Coordinator



Cristian Rodrigo Bautista Domínguez
Author

Translated by



Cristian Bautista

Cristian Rodrigo Bautista Domínguez

Trabajo de Titulación

Ing. Fernando Valencia Guaricela

Enero, 2021.

DOSIFICACIÓN DE MATERIAS PRIMAS LOCALES PARA LA ELABORACIÓN DE LADRILLOS REFRACTARIOS.

INTRODUCCIÓN

Los materiales refractarios disponen de una gran importancia para un significativo grupo de industrias, procesos asociados a las empresas del vidrio, siderúrgica y la cerámica, se soportan en estos derivando productos de gran utilidad. Debido a esta relevancia, el presente estudio plantea una evaluación de diferentes composiciones con base en materias primas locales que permitan la generación de ladrillos refractarios funcionales y con propiedades óptimas, que además representen una disminución de costos al reducir la importación de materia prima de otras naciones o localidades y por lo tanto los costos de fabricación.

En la provincia de Azuay, se dispone de posibles materiales refractarios, por ejemplo algunas variedades de arcilla y caolín, las cuales son mezclados en diferentes proporciones y es analizada sus propiedades térmicas y mecánicas, para identificar la de mejor comportamiento y que pueda servir como materia prima para ladrillos refractarios.

Los materiales locales no han sido estudiados a profundidad, la escasa información y análisis han hecho que no se le haya brindado la posibilidad de ser un recurso importante en la fabricación de pastas para generar ladrillos refractarios. En tal sentido, en este trabajo se expone una evaluación sustentada en un procedimiento científico riguroso que asegura resultados fiables y replicables.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 Generalidades

Los materiales cerámicos se definen como compuestos químicos, que contienen elementos metálicos y no metálicos, utilizados en una variada gama de tecnologías tales como; bujías, refractarios, sensores, medios de grabación magnética, entre otros. Estos materiales generalmente son frágiles y duros; gracias a enlaces covalentes o iónicos, los mismos poseen baja conductividad térmica y eléctrica, alto grado de resistencia a la compresión, punto de fusión alto y óptima estabilidad térmica y química. Otra forma en que los materiales cerámicos aparecen en la naturaleza; es como elementos naturales o en forma de óxido.

Los materiales refractarios son aquellos que poseen elevada resistencia, alta estabilidad mecánica; además son inertes químicamente cuando son sometidos a temperaturas que superan los 1400 °C. Estos materiales además presentan resistencia a la fluencia y actúan como aislantes térmicos debido a que, tienen baja conductividad térmica. Compuestos por un enlace covalente, iónico o mixto.

1.1.1 Redes de Boltzmann

La denominada ecuación de Boltzmann es utilizada para describir dentro de un sistema termodinámico el comportamiento estadístico del mismo sin considerar el equilibrio termodinámico. Esta ecuación está representada mediante un fluido que posee gradientes de temperatura libres, originando corrientes de calor que van desde las zonas más calientes hacia las más frías, producido por el desplazamiento de las características que contiene el sistema de partículas. En este orden, las redes de Boltzmann se refieren por lo general a ecuaciones cinéticas usadas para describir el proceso evolutivo de cantidades macroscópicas comprendidas dentro de un sistema termodinámico, referidos al número de partículas, carga y energía (Florez, Peña, & Laguado, 2015).

Esta ecuación no proviene de los análisis estadísticos de las partículas de los fluidos, sino que se deriva de la probabilidad de que una determinada cantidad de partículas invada un lugar pequeño perteneciente al espacio donde se encuentran. También son aplicadas debido a que permiten comprender la evolución de diversas cantidades físicas como la temperatura, la energía, etc., además de propiedades elementales de los fluidos entre ellos la conductividad térmica, eléctrica y la viscosidad (Florez, Peña, & Laguado, 2015).

1.1.2 Estructura y propiedades de las cerámicas

La clasificación de los materiales sólidos según Callister (2020) se debe a la regularidad en la que se encuentran ubicados los iones y átomos. En el caso de los materiales cristalinos, los átomos están en forma periódica y repetitiva, dispuestos en diferentes distancias o trayectos atómicos, lo cual significa que existe amplio orden y extenso alcance, de manera tal que el material al ser solidificado, sus átomos se sitúan de acuerdo al modelo tridimensional repetitivo, donde los átomos son conectados con los que se encuentran más cercanos. Muchas de las propiedades que presentan los sólidos cristalinos están dadas por la estructura cristalina presente en el material con respecto al orden de los iones, átomos y moléculas. Existe una variedad de estructuras cristalinas donde cada una de ellas posee una ordenación atómica de extenso alcance; dichas estructuras pueden variar desde las más simples correspondientes a los metales hasta las más complejas representadas por los materiales poliméricos y cerámicos.

En este sentido, Callister (2020) reseña que las imperfecciones o defectos cristalinos consisten en una anomalía de red, donde varias de sus dimensiones están dispuestas en un diámetro atómico. Estas irregularidades pueden ser clasificadas de acuerdo a la superficie y geometría del defecto, siendo la denominada “vacante” una de las más simples, en la que el lugar que es ocupado normalmente por un átomo ahora el mismo se encuentra ausente. (Ver figura 1.1). Este tipo de imperfecciones se originan durante el proceso de solidificación y también son producto de las vibraciones, en una determinada cantidad de material, el número de vacante “N” va a depender de la temperatura. Asimismo, los defectos de tipo auto intersticial; se refiere a un átomo cristalino el cual sufre un desplazamiento a un área intersticial, es decir, a un lugar desocupado de tamaño pequeño.

Este tipo de imperfectos presentan separaciones extensas alrededor de la red, debido a que los átomos son más grandes que los lugares intersticiales donde se ubican. En efecto, la formación de este tipo de defectos es poco probable ya que existen en concentraciones reducidas, y son significativamente mínimos en comparación con las vacantes.

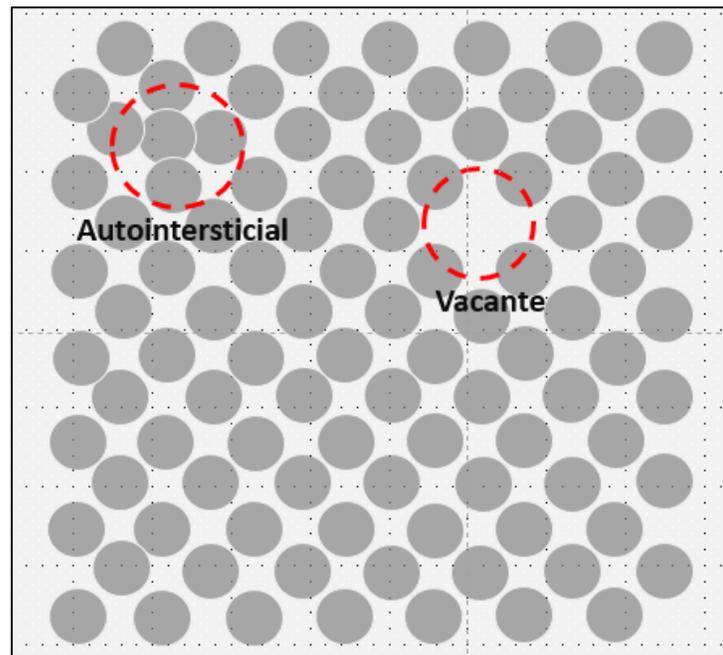


Figura 0.1 Representación de una vacante y de un átomo intersticial

Fuente: Callister (2020)

En las estructuras cristalinas para materiales que presentan enlaces iónicos, Askeland, Fulay, & Wright (2011) refieren que las celdas unitarias ocupan espacios que proveen una óptima coordinación y garantizan la obtención de un equilibrio de cargas. Por lo general, los cerámicos presentan estructuras cristalinas complejas. En cuanto a los tipos de estructuras (ver figura 1.2), se encuentran:

Perovskite: esta celda unitaria se encuentra en diversos e importantes cerámicos eléctricos como SrTiO_3 (titanato de estroncio) y BaTiO_3 (titanato de bario). En ellos se encuentran contenidos tres tipos de iones. Los iones de bario se hallan en las esquinas del cubo, mientras que, los iones de oxígeno ocupan la parte central de las caras y los iones de titanio se ubican en el centro del cubo. En efecto, se produce una señal eléctrica causada

por la deformación de la celda unitaria, esto genera que algunos titanatos actúen como transductores (Askeland et al., 2011).

Corindón: la alúmina (Al_2O_3) posee este tipo de estructura, la cual es semejante a la hexagonal compacta, no obstante cada celda unitaria tiene dieciocho iones de oxígeno y doce de aluminio. La alúmina es un tipo de material utilizado como aislante eléctrico y refractario. Elementos cerámicos como; Cr_2O_3 (óxido crómico III) y Fe_2O_3 (óxido de hierro III) también presentan esta estructura (Askeland et al., 2011).

Espinel: la forma estructural característica de espinel para el MgAl_2O_4 (espinela de aluminio de magnesio) presenta celda cúbica unitaria, la cual puede ser vista como una asociación de ocho cubos pequeños, cada uno de ellos concentra iones de oxígeno localizados en la red del cubo que se encuentra en el centro de las caras. Por lo general, los iones bivalentes (Mg^{2+}) que constituyen el espinel normal, ocupan espacios tetraédricos y los trivalentes (Al^{3+}) los octaédricos. Mientras que, en el caso de espineles de tipo inverso, tanto los iones trivalentes como los bivalentes están ubicados en los octaédricos, al respecto, diversos cerámicos magnéticos y eléctricos poseen esta forma estructural (Askeland et al., 2011).

Grafito: constituye una de las diferentes representaciones cristalinas del carbono, en ocasiones es considerado como material cerámico, cabe destacar que no es una composición de átomos metálicos y no metálicos sino un elemento. El grafito, debido a su forma hexagonal es utilizado como fibra, lubricante y material refractario (Askeland et al., 2011).

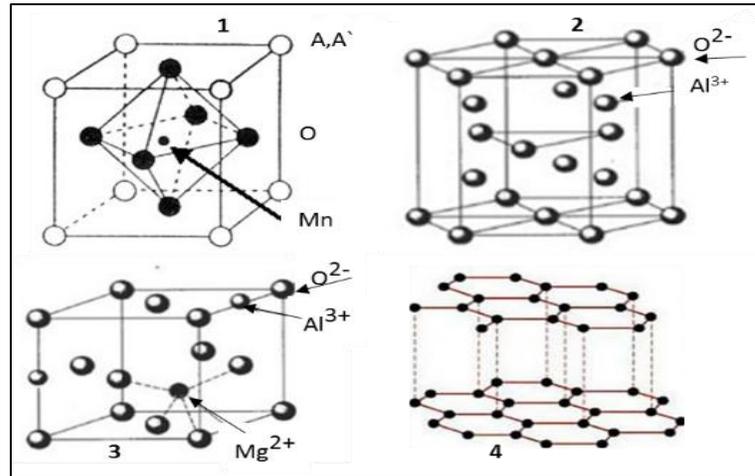


Figura 0.2 Estructura cristalina de cerámico (1) Perovskite, (2) Parte de celda de Corindón, (3) Parte de celda de Espinel, (4) Grafito.

Fuente: Askeland et al., (2011)

1.1.3 Estructura de silicatos cristalinos

Algunos de estos materiales poseen enlaces covalentes; como ejemplo es posible mencionar, la forma cristobalita del sílice (SiO_2), la cual es un elemento fundamental para la obtención de productos cerámicos. La manera como están dispuestos los átomos dentro de la celda unitaria provee una adecuada coordinación, además da equilibrio a la carga y garantiza que no se altere la dirección de los enlaces covalentes (Ver figura 1.3) (Callister, 2020).

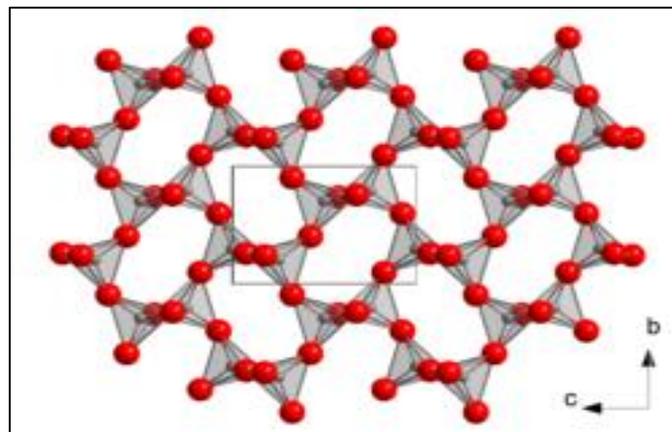


Figura 0.3 Estructura cristalina de la cristobalita.

Fuente: Callister (2020)

El enlace covalente del sílice se caracteriza por cuatro átomos de oxígeno adyacentes, creando un modelo estructural tetraédrico que serán las unidades principales del sílice. Estos actúan como conjuntos iónicos, por ende, los iones de oxígeno presentes en las esquinas de la estructura son atraídos por diferentes iones, no obstante, varios iones de oxígeno se pueden combinar con dos grupos tetraédricos, con el propósito de compensar el equilibrio de las cargas (Callister, 2020).

Compuestos de silicatos

Los dos iones (Mg^{2+}) al estar disponibles para ser combinados con un tetraedro, generan un compuesto denominado Forsterita (Mg_2SiO_4). Estos dos iones proporcionan la carga requerida y ofrecen equilibrio a los iones de forsterita, de igual manera originan un modelo estructural cristalino con tres dimensiones (Callister, 2020).

Estructura de anillo y cadena

Al ser compartidos dos vértices de tetraedro con otros grupos iguales, se originan cadenas y anillos con la fórmula $SiO_3^{2-}_n$, donde n expresa la cantidad de grupos SiO_3^{2-} que tiene la cadena o anillo. Una gran variedad de materiales cerámicos posee la estructura del metasilicato (Callister, 2020).

Estructuras laminares (arcillas)

Cuando se presenta una composición ideal, tres de los átomos de oxígeno de los tetraedros se posicionan en el mismo plano, dando origen a un modelo hexagonal, por su parte, los átomos de silicio se ubican en un segundo plano siguiendo el mismo modelo que los anteriores. Asimismo, el cuarto átomo de oxígeno se presenta en el tercer plano, considerando que, los dos últimos átomos se encuentran iónicamente conectados con otro conjunto de átomos dando paso a la formación de materiales tales como; talco, mica y arcilla (Callister, 2020).

Sílice

Cuando el tetraedro comparte sus cuatro esquinas con otros iguales, se origina la cristobalita, compuesto que también puede estar presente en diversas formas alotrópicas. A medida que aumenta el nivel de temperatura, el sílice se transforma de cuarzo “ α ” a “ β ”, también a líquido y a cristobalita β . La variación entre el cuarzo α y el β está dada por un cambio general en los espacios del sílice (Callister, 2020). (Ver figura 1.4)

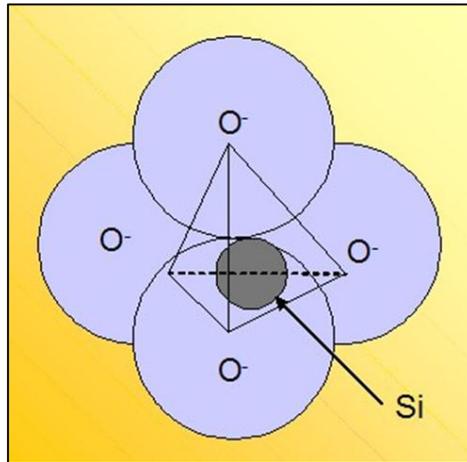


Figura 0.4 Estructura tetraédrica del Silicato

Fuente: Universidad Politécnica de Valencia (2020)

1.1.4 Imperfecciones y fallas mecánicas en las cerámicas

Las formas estructurales de los materiales cerámicos al igual que los metales, según Callister (2020) tienen variadas imperfecciones, en cuanto a la conductividad eléctrica, que constituye una propiedad física, se presentan desperfectos específicos que resultan importantes. Entre las imperfecciones de las cerámicas, se mencionan:

Imperfecciones puntuales

Los sistemas como NiO-MgO, Al_2O_3 - Cr_2O_3 y MgO-FeO tienen un conjunto integral de soluciones de sustitución y representaciones de fases isomorfas. De igual forma, $(Mg, Fe)_2SiO_4$ llamadas olivinas, están conformadas por un nivel completo de solubilidad, donde los iones Mg^{2+} y Fe^{2+} se sustituyen entre ellos dentro de la forma estructural del silicato. Las soluciones de tipo sólido, generan propiedades físicas poco comunes; como ejemplo se tiene que la mezcla de Cr_2O_3 con Al_2O_3 genera el rubí, el cual funciona como un láser.

Cuando se agregan iones de solución sólida, es difícil que exista un equilibrio entre la distribución de cargas, no obstante, para los materiales cerámicos los excesos de cargas o deficiencias pueden ser acomodados (Callister, 2020).

Dislocaciones

Los materiales cerámicos como el Al_2O_3 (zafiro), LiF (fluoruro de litio) y MgO (óxido de magnesio) presentan dislocaciones; pero éstas son difíciles de mover, a causa de la presencia de sistemas de deslizamiento y vectores de Burgers. Por consiguiente, al no ocurrir un deslizamiento las aberturas no aumentan, debido a la deformación del material encontrado en el inicio de la abertura, en efecto, el material cerámico es considerado frágil. Sin embargo, las dislocaciones se pueden mover con más facilidad al ser sometidas a altas temperaturas, donde es probable que suceda una deformación por medio de procesos como deslizamiento de granos y bordes y a causa del flujo viscoso que poseen las fases vítreas (Callister, 2020). (Ver figura 1.5)

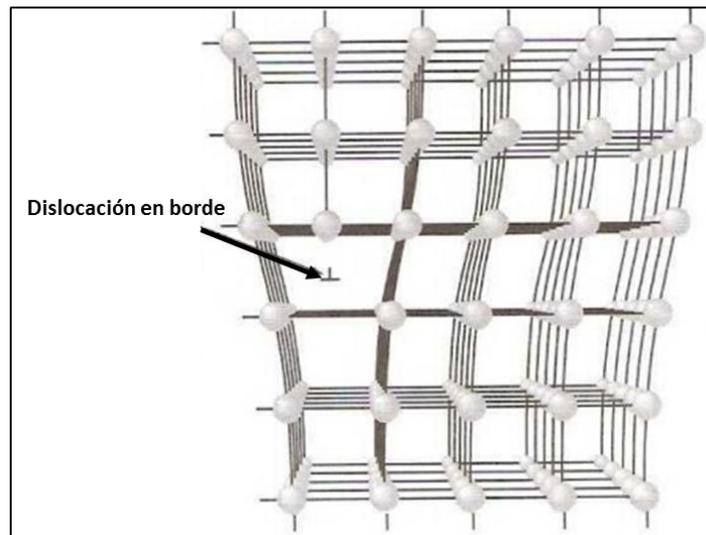


Figura 0.5 Representación de dislocación en borde

Fuente: Nebot (2015)

Deformaciones superficiales

Tanto las superficies de las partículas como los límites de grano, representan defectos de tipo superficial, esenciales en los cerámicos. Normalmente, los cerámicos que tienen grano fino, son quienes presentan mayor rango de resistencia que los compuestos por

granos gruesos. Debido a que, los granos finos contribuyen en la reducción de esfuerzos que se forman en los bordes, causados por la prolongación y el encogimiento anisotrópico. Para la producción de los granos finos se debe utilizar desde el inicio materias primas cuyas partículas sean finas (Callister, 2020).

Porosidad

Los poros representan un defecto de tipo superficial, pues en la composición del material cerámico éstos se encuentran interconectados o cerrados. Para ello, la porosidad aparente se encarga de medir los poros interconectados, determinando su permeabilidad, de esta manera predice la facilidad con la que los gases y otros fluidos pasan por medio del componente cerámico (Callister, 2020). (Ver figura 1.6)

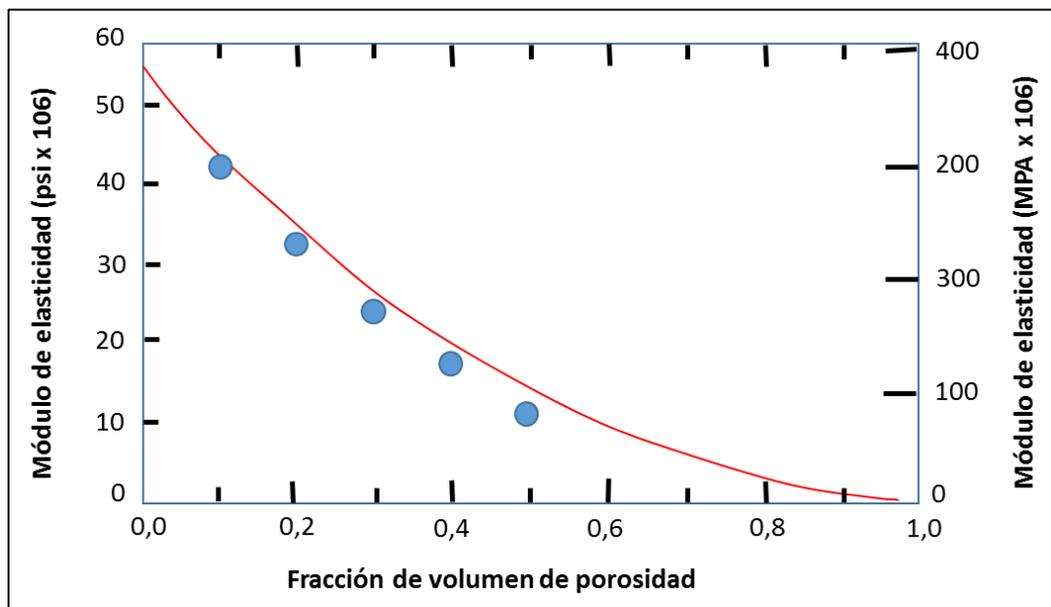


Figura 0.6 Representación del volumen de la porosidad

Fuente: Callister (2020)

Fallas mecánicas

En cuanto a las fallas mecánicas que se presentan en los materiales cerámicos; cabe destacar que éstos son muy frágiles, tanto los de tipo cristalinos como los no cristalinos, específicamente, cuando son sometidos a bajas temperaturas. Este problema se incrementa en los casos donde los materiales cerámicos presentan desperfectos (inclusiones extrañas,

porosidad, tamaños grandes de los granos o fases cristalinas); los cuales afectan el proceso de elaboración. Al respecto, los daños causados pueden variar en la forma, tamaño u orientación, bien sea dentro de un único componente como también de un componente a otro.

La fractura frágil es considerada como una grieta o desperfecto que restringe la capacidad que posee cualquier producto cerámico para resistir esfuerzos a tensiones. Lo cual, es producido por el denominado “defecto de Griffith”, el mismo centraliza el esfuerzo aplicado haciendo que aumente. En la figura 1.7 está representado el perfil de la tensión mediante la sección que presenta la grieta (Askeland et al., 2011).

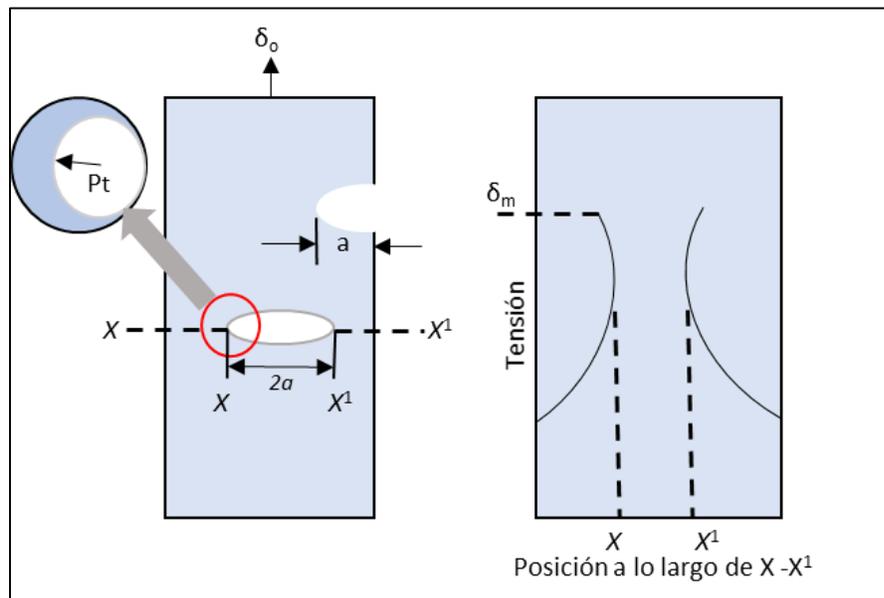


Figura 0.7 Perfil de la tensión que presenta la grieta

Fuente: Askeland et al., (2011)

En este mismo orden de ideas; el tratamiento estadístico de la fractura frágil debe efectuarse considerando que, las propiedades de los materiales cerámicos obedecen a la geometría y tamaño de los imperfectos existentes en ellos. En efecto, los elementos cerámicos que se producen a partir de materiales y mecanismos de producción equivalentes suelen fallar a diferentes cargas aplicadas. Con el propósito de crear elementos estructurales empleando cerámicos, debe ser tomada en cuenta la probabilidad de que se origine una deformación bajo algún esfuerzo que ocasione rupturas. Para ello,

se deben utilizar métodos que permitan mejorar la tenacidad, a fin de generar mayor nivel de resistencia y de esfuerzos, uno de los métodos comúnmente aplicados, radica en cubrir las partículas frágiles con un material que posea suavidad y tenacidad (Askeland et al., 2011).

Otra solución, consiste en la creación de compuestos de matriz de cerámica (CMC) agregando aglomerados o fibras cerámicos en esta matriz; dada la situación que una grieta pretenda extenderse dentro de ésta, se encuentra con la interfase entre la fibra cerámica y la matriz; donde la interfase contribuye a bloquear la continuidad de la grieta. Algunos materiales cerámicos pueden ser endurecidos mediante el proceso de transformación. La absorción reduce de manera efectiva el crecimiento y facilita que la fase metaestable se convierta en una forma estable, asimismo origina que la grieta se cierre. Para mejorar la tenacidad es esencial que, el producto cerámico sea procesado, por ende, los métodos utilizados que originan cerámicos con granos extremadamente finos, densos y de alta pureza; incrementan la tenacidad y resistencia (Askeland et al., 2011).

1.1.5 Deformación de los cerámicos a elevadas temperaturas

Las dislocaciones en los materiales cerámicos no presentan movimiento a temperaturas bajas, tampoco se observan deformaciones plásticas relevantes. Cuando existen altas temperaturas, tanto el flujo viscoso como el deslizamiento de bordes de grano se transforman en elementos de deformación significativos. Al respecto, el flujo viscoso sucede en cerámicos y vidrios que poseen una composición de ciclos cristalinos y vítreos, por su parte el movimiento de bordes de grano transcurre en cerámicos que por lo general, son cristalinos. Un vidrio sufre una deformación a causa del flujo viscoso en condiciones de elevadas temperaturas, donde al aplicar el esfuerzo cortante “ τ ” ocasiona que fluya el líquido a velocidades que pueden variar de acuerdo a la posición. Al estar cerca el líquido de la zona donde se aplicará “ τ ”, éste fluye con mayor rapidez y si por el contrario, se encuentra lejano al punto entonces lo hará de manera lenta. En efecto, se genera un gradiente de velocidad (dv/dz) (Askeland et al., 2011).

En el vidrio cerámico, los conjuntos de átomos tales como; cadenas de silicatos, anillos o islas, se desplazan uno al lado del otro como respuesta del esfuerzo, facilitando la deformación, la cual brinda resistencia al esfuerzo cortante que se aplica. La resistencia tiende a ser muy baja cuando se encuentra por encima del punto de fusión del vidrio, por lo que el vidrio líquido puede vaciarse y fluye de acuerdo a su peso. El rango de viscosidad del mismo normalmente es menor a los 500 poises, lo que significa que presenta mayor viscosidad que el agua, sin embargo, tiene la capacidad de fluir fácilmente. A medida que la temperatura se reduce, la viscosidad aumenta, ocasionando que el vidrio sea más difícil de sufrir deformaciones. En la figura 1.8, se pueden observar los efectos de la composición y viscosidad del vidrio (Askeland et al., 2011).

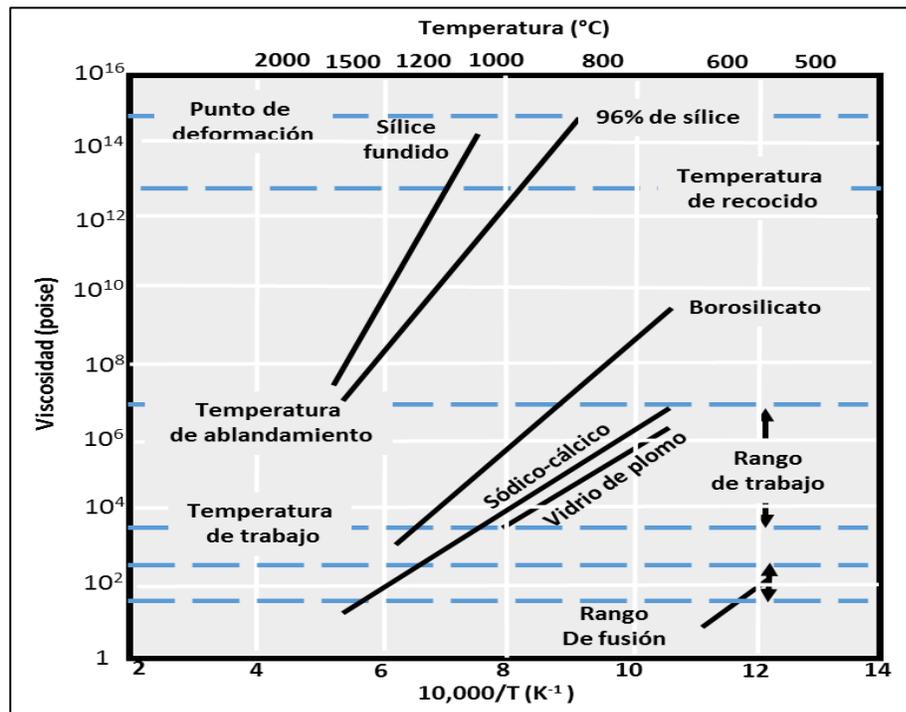


Figura 0.8 Efecto de la composición y temperatura en la viscosidad del vidrio

Fuente: Askeland et al., (2011)

En relación a la termofluencia en los cerámicos, se considera una propiedad relevante, por lo general, los cerámicos son diseñados para soportar temperaturas elevadas, por ello, los de tipo cristalino poseen buena resistencia a la termofluencia, debido a los altos niveles de fusión y la elevada fuerza de activación. En ocasiones los cerámicos pueden conservar

el nivel de resistencia a temperaturas que superen los 1200°C. Este fenómeno de la termofluencia, es causado por el desplazamiento de los bordes de grano. Conforme se deslizan los granos uno sobre otros, se originan las grietas formando las fallas. Existen diversos factores responsables del deslizamiento, en consecuencia reducen la resistencia, entre los que destacan el tamaño de grano, por cuanto los de tamaños pequeños aumentan la tasa de termofluencia, de esta manera se producen más bordes de grano facilitando el deslizamiento de bordes. La porosidad es otro elemento; pues al ser incrementada en el cerámico reduce la sección transversal y hace que aumente el esfuerzo presente en este producto para una determinada carga, también, los poros propician el deslizamiento de los bordes, originando el incremento en los niveles de termofluencia (Askeland et al., 2011).

Muchos cerámicos están formados por una combinación de fases cristalinas y vítreas, en este proceso se origina una fase vítrea entre los fragmentos cristalinos que las une entre sí y produce la forma adecuada. Una vez que se calienta el cerámico, el flujo viscoso que posee la fase vítrea inicia el desplazamiento de los bordes de grano, reduciendo la resistencia a las elevadas temperaturas y a la termofluencia. Es necesario considerar que, a una fase cristalina precipitar dentro de una vítrea, la viscosidad de ésta aumenta y mejora la resistencia a la termofluencia, esta es una ventaja que se utiliza en los vidrios cerámicos (Askeland et al., 2011).

1.1.6 Cerámicos a base de arcilla

La arcilla es considerada una de los materiales con mayor uso y puede encontrarse en grandes cantidades de manera natural, frecuentemente es utilizada tal como se extrae. Otro elemento importante, se debe a la facilidad que brinda este material para conformar sus productos, pues al ser mezclada con agua en cantidades correctas, se origina una masa plástica que permite ser modelada, luego la pieza obtenida pasa por un proceso de secado a fin de eliminar la humedad. Posteriormente, es sometida a altas temperaturas para incrementar su nivel de resistencia mecánica (Callister, 2020).

Los productos a base de la arcilla pueden ser clasificados en; estructurales de arcilla y porcelanas. Dentro de los primeros, se incluyen los ladrillos para construcción, tuberías de aguas residuales, baldosas y otras aplicaciones donde se considere esencial la integridad estructural. Las porcelanas, requieren de una fase de cocción a elevadas temperaturas para adquirir el color blanco característico. Dentro de este grupo también clasifican vajillas, porcelana fina, productos de alfarería, artículos sanitarios, entre otros. Algunos de ellos poseen compuestos no plásticos, que inciden en las variaciones generadas a través de las fases de secado y cocción (Callister, 2020).

1.1.7 Características de la arcilla

Los minerales contenidos en la arcilla cumplen objetivos elementales en la elaboración de productos cerámicos; principalmente al ser combinada con el agua, se genera una masa plástica, propiedad conocida como hidroplasticidad, la cual es de significativa importancia en los procesos de conformado. También, este material permite ser fundido a varios niveles de temperaturas, por tanto, una cerámica fuerte y densa se puede obtener mediante la etapa de cocido sin fusión manteniendo la forma. El período de temperatura de fusión va a depender de los componentes de la arcilla. Las arcillas están formadas por aluminosilicatos que contienen alúmina y sílice, ambos tienen agua químicamente enlazadas, también poseen una variada gama de propiedades físicas, estructuras y combinaciones químicas. La formación estructural cristalina de los minerales de arcilla, son algo complejas, no obstante, tienen en común una estructura en capas. En consecuencia, entre los minerales de la arcilla que poseen amplio interés para la industria se encuentra la caolinita ($Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$) (Callister, 2020).

No solo las arcillas, sino también las porcelanas contienen compuestos no plásticos. Entre los minerales no arcillosos se encuentra, el feldespato, sílex o cuarzo, el cual es utilizado principalmente como material para relleno, debido a que es económico, químicamente no reactivo y algo duro. Además, experimenta escasas variaciones durante las operaciones a altas temperaturas, ya que presenta un elevado punto de fusión y al ser fundido origina el vidrio. Cuando un fundente como el feldespato; es combinado con arcilla produce un vidrio que posee un punto de fusión bajo (Callister, 2020).

1.1.8 Conformación, procesamiento y aplicaciones de productos de arcilla

Para la conformación de productos a base de la arcilla, se emplean dos técnicas: conformación hidroplástica; ésta produce que los minerales de la arcilla al ser combinados con agua se hagan flexibles y plásticos, lo que permite que sean moldeados sin riesgo de fisuración, aunque pueden presentar resistencia a la tracción. La consistencia de la mezcla hidroplástica debe tener un nivel de resistencia que sea suficientemente elevado como para facilitar que la pieza conformada conserve la forma durante el proceso tanto de manipulación como de secado (Callister, 2020).

La extrusión, es considerada la técnica más comúnmente utilizada para la conformación hidroplástica, en ella una masa de cerámica de consistencia espesa es forzada mediante la abertura de una matriz, la cual posee las dimensiones de la sección que se desea, este procedimiento es semejante al que se aplica en los metales. Al respecto, bloques cerámicos, tuberías y ladrillos son fabricados a partir de la conformación hidroplástica. Por lo general, la masa plástica de cerámica forzada a atravesar la matriz por medio de un “husillo” que tiene forma de espiral, operado a través de un motor, donde frecuentemente el aire se elimina en una cámara de vacío a fin de incrementar la densidad (Callister, 2020).

Otra técnica de conformación aplicada para las composiciones a base de arcilla, es el moldeo en barbotina; que consiste en una suspensión de materiales no plásticos y arcilla en agua. Al ser, vertida en un molde poroso elaborado con yeso, el agua de la suspensión es absorbida, dejando en las paredes internas del molde una capa sólida, donde el grado de espesor va a depender del tiempo. Este procedimiento puede seguir hasta que la cavidad se solidifique o también puede ser finalizado cuando la capa de las paredes tenga el espesor que se desea. (Ver figura 1.9). Conforme la pieza se vaya secando, se reduce y separa del molde; de esta manera se desmonta el molde y la pieza puede ser retirada (Callister, 2020).

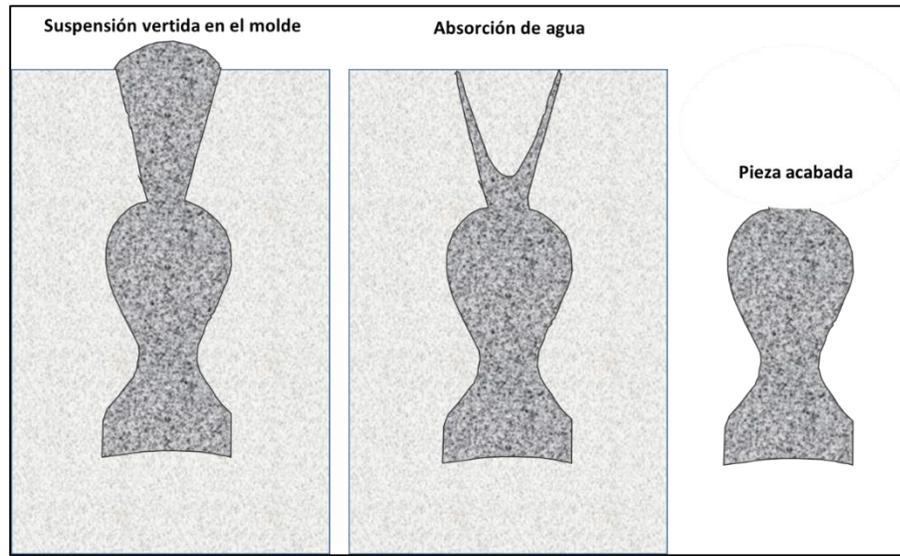


Figura 0.9 Pasos para el moldeo en barbotina

Fuente: Callister (2020)

El procedimiento de suspensión es fundamental, éste debe ser colable y fluido, además de poseer un alto peso. Dichas características van a depender de la relación entre el sólido y el agua, así como de otros elementos que sean agregados. Es fundamental que la velocidad de moldeo sea elevada. También, la pieza debe tener baja contracción durante el proceso de secado, libre de burbujas y alto grado de resistencia a la tracción. Es importante destacar que, las propiedades del molde constituyen un factor influyente en la calidad del moldeo, para ello se debe utilizar un molde de yeso, el cual es fácil de construir, se puede reutilizar y es económico. Entre las cerámicas que pueden ser elaboradas mediante esta técnica es la sanitaria, piezas de laboratorio y objetos de arte (Callister, 2020).

Luego del proceso de conformado, las piezas cerámicas según Callister (2020) siguen presentando fragilidad, presencia de agua, porosidad y otros lubricantes; por ende, es fundamental el secado y horneado. Debido a que, la etapa de secado ayudará a eliminar el exceso de humedad, en la fase inicial el volumen de agua que se acumula en las plaquetas o entre las partículas de la arcilla se evapora y origina contracción. Posteriormente al evaporarse el agua contenida en los poros, ocurre un pequeño cambio dimensional, en tal sentido, para lograr que la pieza se seque de manera uniforme, es necesario que la

temperatura y humedad sean controladas cuidadosamente, para evitar agrietamiento, distorsión y esfuerzos (Ver figura 1.10).

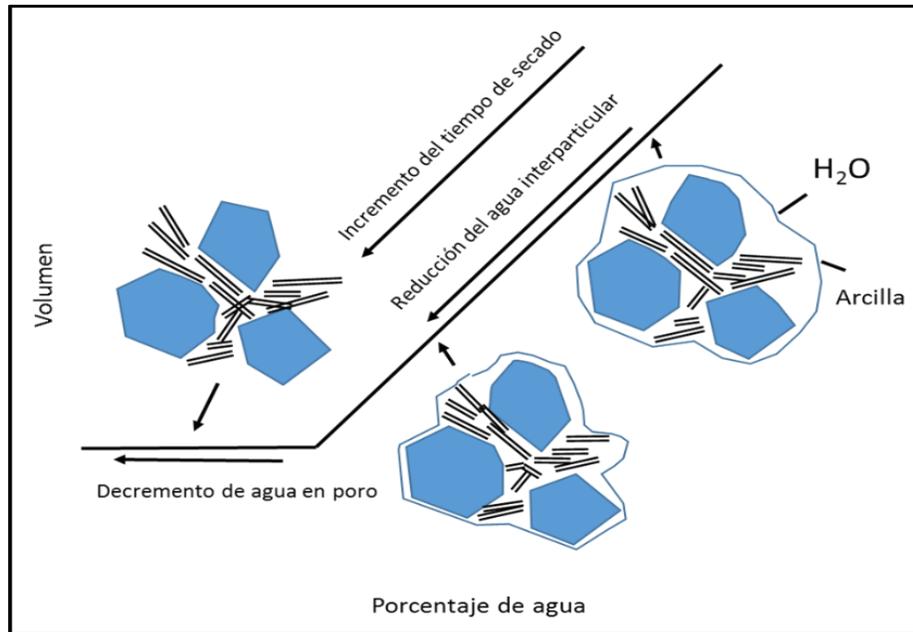


Figura 0.10 Secado de una pieza de cerámica

Fuente: Callister (2020).

La fase de horneado también es esencial, pues proporciona a la pieza cerámica resistencia y rigidez, además la arcilla durante el calentamiento se deshidrata, debido a que elimina el agua, la cual forma parte de la estructura cristalina de la caolinita dando inicio a la fusión o vitrificación. Tanto el agente fundente como las impurezas reaccionan con (SiO_2) partículas cerámicas y con la arcilla, esto produce una fase líquida con un punto de fusión bajo en las superficies de grano. Por cuanto, el líquido contribuye a la reducción de la porosidad y tras el enfriamiento se transforma en vidrio rígido que sirve para unir las partículas de cerámica. Al respecto, la fase vítrea provoca la unión cerámica causando en el cuerpo de ésta una contracción total (Callister, 2020).

Gran cantidad de los productos de arcilla y loza son producidos a través de los procesos previamente mencionados, las losetas y ladrillos utilizados en la construcción son elaborados por extrusión o compresión y llevan una fase de secado y horneado cuyo fin es provocar la unión cerámica. Las partículas pequeñas o elevadas temperaturas de

horneado proporcionan mayor nivel de vitrificación, alta densidad y menor porosidad, por ende, una densidad alta contribuye al mejoramiento de las propiedades mecánicas, sin embargo, minimiza la calidad aislante de la loseta o ladrillo (Callister, 2020).

1.1.9 Visión general y clasificación de los materiales refractarios

Las cerámicas refractarias también constituyen otra clase importante usadas en grandes cantidades; Nicolás (2017) refiere que, estos materiales gracias a sus propiedades tienen la capacidad de resistir elevadas temperaturas sin descomponerse o fundirse, también pueden permanecer inertes ante la exposición a medios agresivos. La capacidad de aislamiento térmico es otra de las características importantes que posee este tipo de material refractario, el cual tiene diferentes formas de comercialización, sin embargo los ladrillos son los más comunes. La composición de una cerámica refractaria determina su comportamiento, entonces, existen diversas clasificaciones como refractarios de arcilla, especiales y básicos. Las materias primas empleadas para la elaboración de productos comerciales, por lo general, son partículas de tamaño grande y pequeño cuyas composiciones son distintas.

En la etapa de cocción, las partículas pequeñas tienen una función importante y responsables en la formación de una fase, esto ocasiona que se incremente la resistencia del ladrillo, dicha fase puede ser cristalina o vítrea. La porosidad se presenta como una variable microestructural, la cual tiene que ser controlada, para así crear un ladrillo refractario firme y resistente. Por consiguiente, al ser reducida la porosidad; la resistencia a la corrosión que pueden generar otros materiales y la resistencia mecánica tienden a aumentar. De igual manera, las características tanto de resistencia al choque como de aislamiento térmico disminuyen, por lo que, una porosidad óptima va a depender de las condiciones como se aplique el proceso de cocción (García A. , 2015).

Según Askeland et al., (2011) señalan que los refractarios están divididos en cuatro grupos: refractarios de arcilla, de sílice, básicos y especiales.

De arcilla

Están constituidos principalmente por una combinación de este material refractario, con alto nivel de pureza en sílice y alúmina entre un 25 a 45%, siendo 1587 °C la temperatura más elevada a alcanzar para que no se forme líquido, ya que, inferior a este nivel las fases producidas son sílice y mullita. A lo largo de la vida de servicio del refractario, puede ser permitida una mínima cantidad de fase líquida, esto no afectaría la integridad mecánica, si la temperatura supera los 1587° C, entonces la cantidad de líquido va a depender de la composición del refractario, en efecto, si el porcentaje de alúmina aumenta la temperatura de servicio también se incrementará, facilitando la permanencia de una cantidad pequeña de líquido. Los ladrillos refractarios a base de arcilla, son utilizados principalmente para la fabricación de hornos, confinamiento de atmósferas calientes, y como aislamiento térmico ante elevadas temperaturas (Askeland et al., 2011).

De sílice

Su componente esencial es el sílice y son también conocidos como refractarios ácidos. Este material posee capacidad estructural a altas temperaturas, normalmente son utilizados en los techos de los hornos empleados para la elaboración de vidrio y acero donde las temperaturas alcanzan los 1650° C. Bajo estas condiciones una mínima sección del ladrillo estará en forma líquida, donde la existencia de una pequeña cantidad de alúmina produce un efecto adverso a las prestaciones de los refractarios, debido a que la composición de 7,7% en peso de Al_2O_3 está próxima al borde de sílice en el diagrama de fases, por ello las concentraciones de alúmina deben permanecer bajas, preferiblemente entre 0,2 y 1,0%. Estos materiales resisten ante escorias ácidas; es decir que contienen sílice, por lo cual son utilizados como depósitos para almacenarlas, sin embargo, pueden ser atacados fácilmente por escorias compuestas de altas cantidades de MgO y CaO, de forma tal que debe evitarse el contacto con estos óxidos (Askeland et al., 2011).

Básicos

Son refractarios con alto contenido de periclasa; es decir magnesia calcinada, también presentan compuestos de hierro, cromo y calcio. La existencia de sílice resulta adversa

para condiciones de elevadas temperaturas, este tipo de refractarios resultan resistentes ante el riesgo a escorias conformadas por altas cantidades de CaO y MgO (Askeland et al., 2011). (Ver figura 1.11)

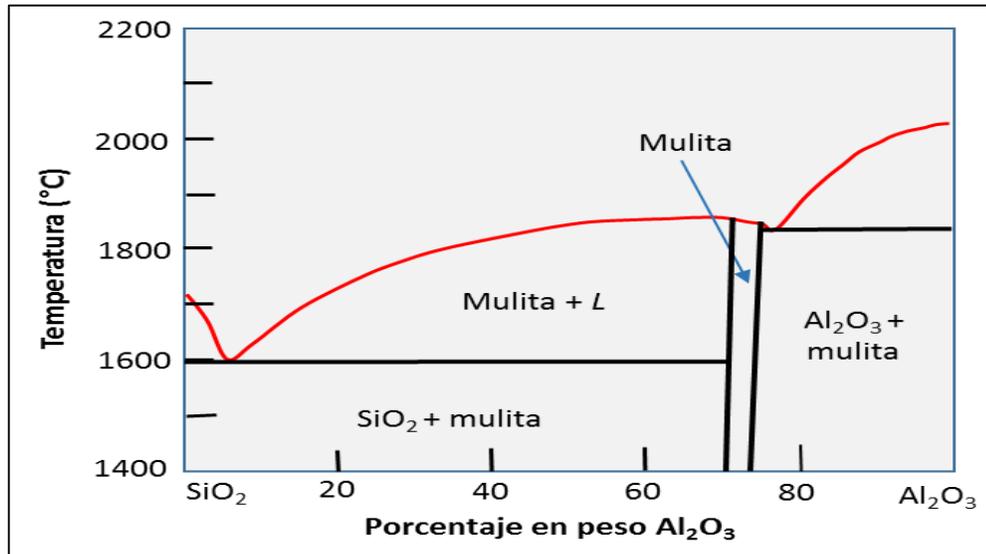


Figura 0.11 Representación del diagrama de fases ($\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$)

Fuente: Askeland et al., (2011)

Especiales

Están constituidos por otros materiales cerámicos utilizados también en aplicaciones especiales de tipo refractario. Algunos de éstos son óxidos que poseen alta pureza y pueden ser producidos con baja porosidad, entre los que se encuentra la magnesia, sílice, alúmina, circona, óxido de berilio y mullita. Otro tipo de refractarios están compuestos por grafito, carbono y carburos; éste último ha sido aplicado para resistencias eléctricas de calefactores, así como para dispositivos internos de hornos y crisoles. Cabe mencionar que, el grafito y carbono son altamente refractarios, sin embargo sus aplicaciones son limitadas ya que, son débiles a la oxidación en temperaturas mayores a los 800°C , por estos motivos resultan relativamente costosos (Askeland et al., 2011).

1.1.10 Materias primas utilizadas para la elaboración de refractarios

Para la elaboración de ladrillos refractarios los principales componentes utilizados son mineral de cromo y óxido de magnesio o magnesia, éstos presentan características importantes debido a su alta refractariedad, elevada resistencias mecánicas y al choque térmico. Son conocidos como refractarios básicos porque están constituidos con materias primas tales como magnesita y cal, las cuales reaccionan con fundentes a temperaturas altas y escorias ácidas. Al respecto, la magnesia consiste en un óxido metálico de tipo alcalino (MgO) que tiene un punto de fusión equivalente a $2820^{\circ}C$, por este motivo es considerada como una de las materias primas con mayor importancia, la misma resulta de la sinterización originada por la descomposición térmica del carbonato de magnesio, sin embargo, también se puede obtener de forma sintética a partir de depósitos salinos y el agua del mar (Cuichán & Llano, 2013).

En este sentido, el mineral de cromo o cromita posee una alta resistencia a la corrosión y es neutro químicamente, está constituido básicamente por dos estructuras, una altamente refractaria de solución sólida de espineles identificados por $(XO.Y2O3)$, en la que tanto X como Y pueden representar $(Mg,Fe)O.(Cr,Al,Fe)2O3$. La segunda estructura, tiene menor grado de refractariedad y está compuesta fundamentalmente por silicato de magnesio hidratado o serpentina, considerados como impureza (Cuichán & Llano, 2013).

La elaboración de ladrillos refractarios ácidos requiere de la aplicación de óxidos de silicio y de aluminio, son denominados ácidos debido a que, tienen altas cantidades de sílice y pueden ser reactivas ante escorias básicas y fundentes a temperaturas elevadas. En este mismo orden de ideas, la alúmina como corindón; se basa en un óxido de aluminio cuyo punto de fusión es de $2050^{\circ}C$, algunas cantidades del corindón son explotadas, sin embargo, una parte significativa de la alúmina utilizada para la fabricación de ladrillos es obtenida mediante la electrofusión o la calcinación de las formas hidratadas como el diásporo y la bauxita. Para el caso del sílice, éste consiste en un óxido representado por un punto de fusión de $1732^{\circ}C$, este material se presenta en tres formas particulares; cristobalita, cuarzo y tridimita. Asimismo, su aplicación resulta difícil para la elaboración de productos refractarios, motivado a que se necesita de elevadas temperaturas para

alcanzar el máximo nivel de conversión a formas estables, para ello existen mecanismos establecidos que permiten la elaboración de ladrillos de sílice (Cuichán & Llano, 2013).

1.1.11 Propiedades de los materiales refractarios

Entre las propiedades fundamentales que evalúan a los materiales refractarios, Zapata (2015) señala que destacan; las físicas, térmicas, químicas y mecánicas, a continuación cada una de ellas serán descritas de manera integral:

Propiedades físicas

En ellas se efectúan mediciones de porosidad, densidad y abrasión. Para determinar la porosidad y densidad deben realizarse bajo las normas ASTM D-20, donde los cálculos generados son utilizados para predecir o recomendar el tipo y uso de los refractarios. En casos donde la densidad es considerada muy elevada, se obtiene una porosidad baja. Tanto la permeabilidad del gas como la abrasión son propiedades que generalmente se encuentran vinculadas con la porosidad y densidad del refractario, de igual manera el grado de resistencia a la abrasión se debe a una medida de desgaste de éste material que se produce al entrar en contacto las partículas a velocidades altas con la superficie del refractario, por lo general ésta propiedad es utilizada mayormente en la industria petroquímica para la elaboración de ladrillos refractarios, donde las partículas pequeñas generan daños en la superficie del refractario a temperaturas y velocidades elevadas (Zapata, 2015).

Propiedades térmicas

Entre ellas se encuentra la expansión térmica, la valoración de esta medida proporciona información relativa a la estabilidad lineal del refractario al ser sometido a altas temperaturas y enfriadas a temperatura ambiente. En el proceso de instalado de los refractarios a temperatura ambiente, la forma estructural de este varía su volumen al ser calentado, generando una contracción. Si por el contrario, la temperatura es más elevada que la de reblandecimiento del sistema, la forma estructural del material tiende a colapsar o deformarse; por ende, el sistema refractario deberá diseñarse de manera que la

temperatura máxima alcanzada sea menor a la de fusión o reblandecimiento (Zapata, 2015).

El choque térmico también forma parte de las características térmicas; ya que es una propiedad que poseen los refractarios y sirve para reflejar el nivel de cambios bruscos de temperaturas que pueden soportar los materiales, ya sea de frío a caliente o viceversa. Los sistemas contruidos con defectos o microgrietas han evidenciado tener una mejor resistencia ante choques térmicos, en comparación con sistemas de mayor rigidez. Al respecto, la conductividad térmica representa otra de las propiedades de los materiales refractarios que posee la capacidad de orientar el calor desde el punto caliente hasta el frío (Zapata, 2015).

Propiedades químicas

Se presentan cuando los materiales refractarios se encuentran ante líquidos corrosivos cuyas temperaturas son elevadas, donde el nivel de corrosión y erosión depende de otros factores correspondientes al enlace del sistema refractario. Los elementos de la corrosión pueden ser causados por la disolución en contacto con una fase sólida, líquido o vapor/líquido, los cuales es posible que sean evaluados a través de normas establecidas para este propósito. Una de las propiedades más relevantes de los materiales refractarios es el nivel de resistencia tanto a la corrosión como a la erosión; la forma de prueba consiste en exponer al refractario a altas temperaturas por un determinado período, con presencia de metal fundido o de escorias. Dicha prueba representa una simulación de las condiciones que experimenta el refractario en uso (Zapata, 2015).

Propiedades mecánicas

Este tipo de propiedades pueden ser evaluadas en frío y caliente y así medir su resistencia a la compresión en frío y de ruptura en presencia a ambas temperaturas; lo cual es denominado como refractariedad bajo carga. Los esfuerzos de compresión en frío, permiten conocer el grado de fragilidad de un refractario para su instalación y manipulación, además indica la resistencia del sistema de unión.

En cuanto al módulo de ruptura en frío, se refiere a la tensión máxima de rotura que se aplica a un material capaz de ser soportado; antes de romperse a temperatura ambiente. Esta técnica es conocida como prueba de tres puntos, su nombre deriva de los dos puntos de apoyo sobre los cuales se encuentra ubicada la probeta y el punto que proporciona la carga. Esta prueba por lo general, es aplicada para control de calidad y manejo de materiales refractarios. En este sentido, el módulo de ruptura en caliente es usado bajo los mismos criterios que el ensayo anterior; el cual es concebido como la tensión máxima que una muestra es capaz de soportar ante una prueba de flexión de tres puntos hasta llegar al quiebre o ruptura, en este proceso se emplean temperaturas de 1500°C (Zapata, 2015).

1.1.12 Procedimientos empleados para la fabricación de refractarios

La elaboración de ladrillos refractarios, está basada en el conocimiento adecuado en cuanto a la mezcla de elementos minerales y químicos los cuales producen refractariedad, expansión, estabilidad térmica y resistencia a la corrosión. Es importante que las materias primas sean combinadas con agua, moldeadas según la forma que se desee, secadas y cocinadas en un horno, los refractarios se originan de dos maneras principales ya sean como ladrillos, moldeables o granulados. Tal como refiere Gómez (2013) existen diversas maneras para obtener materiales refractarios, dependiendo del proceso de elaboración, a continuación se detalla el procedimiento de fabricación para la obtención de ladrillos refractarios con forma:

- a) **Selección de materias primas:** son de origen natural provenientes de alguna mina; una vez que es extraída debe ser lavada, a fin de excluir materias solubles que posiblemente puedan actuar como fundentes originando una reducción de las propiedades refractarias del material a elaborar (Gómez, 2013).
- b) **Molienda o trituración:** Los elementos más importantes para la selección adecuada del equipo son la maleabilidad y la dureza del material que se va a moler, la forma del grano, nivel de fragmentación prevista, así como otros aspectos similares. El tamaño de granos y la forma deseada van a depender de la intensidad aplicada en el proceso de molienda. El fraccionamiento por criba; es

un proceso efectuado a la materia prima con cribas oscilantes ya sean de una sola criba o con un paquete completo, de acuerdo a la cantidad de fracciones que se desee obtener (Gómez, 2013).

- c) **Mezclado de materias:** para la elaboración de la mezcla a moldear, es necesario la combinación de los elementos en un mezclador, de acuerdo a la materia prima seleccionada y fórmula de granulometría; debido a que los factores físicos de materiales refractarios son determinados principalmente por la forma granular. Entonces, se debe agregar un aglomerante y seguidamente proceder a la homogeneización la cual es llevada a cabo mediante mezcladores discontinuos. (Ver figura 1.12) (Gómez, 2013).

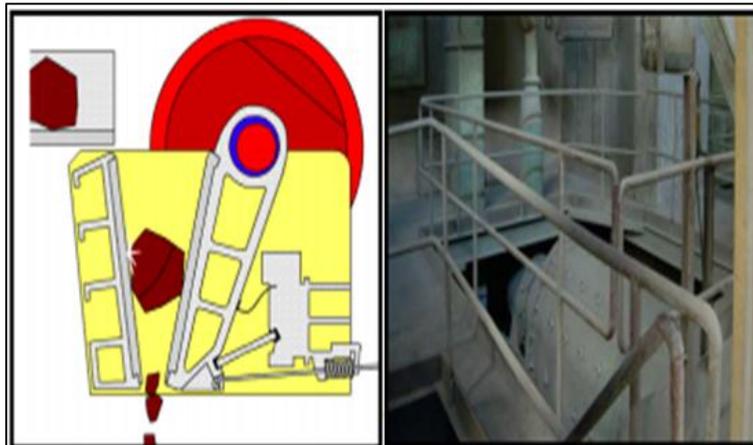


Figura 0.12 Equipos utilizados para la molienda de materias primas

Fuente: Gómez (2013)

Se requiere de dos fracciones granulométricas, una para ser usada como base y la otra que funcione para rellenar los orificios dejados, con el propósito de obtener un material denso luego de la fase de sinterizado. Actualmente en condiciones normales, se combinan cuatro porciones de granulado fino e impalpable, medio y grueso, para conseguir las características óptimas para el ladrillo, donde el tamaño base de las partículas incide en la resistencia mecánica y térmica de la pieza. Por lo general, al aumentar el tamaño base la resistencia a temperaturas iguales o superiores a 1500°C sin reblandecer o fundirse, además, proporciona mayor nivel de porosidad y menor resistencia mecánica (Gómez, 2013).

La dosificación y combinación de fracciones granulométricas, tienen como principio la distribución de estas para que exista en menor proporción huecos entre ellos, luego del proceso de compactación a través del prensado. Mientras existe mayor compactación el volumen de huecos será menor, por consiguiente menos porosidad, la cual en el proceso de cocción será fácil de eliminar y así determinar la porosidad final. Al obtenerse las cantidades requeridas de los diferentes intervalos granulométricos y con el propósito de alcanzar el empaquetamiento máximo de los granos, es esencial que pasen por un intenso amasado, proceso que es efectuado por un mezclador (Gómez, 2013).

Aditivos

Utilizados como un aglomerante o ligante, brinda homogeneidad en la distribución de granos finos dentro de la mezcla, también proporcionan más cohesión y conceden plasticidad la cual contribuye al proceso de conformado. En algunas situaciones el ligante empleado es agua, debido a que facilita la suspensión de las partículas, generando mejor distribución y homogeneidad a la masa. Cuando no se puede utilizar agua, entonces se añaden aglomerantes bien sea, orgánicos o inorgánicos, cuidando que estos no afecten ni contaminen la estructura química del material. Entre los aglomerantes más utilizados, destaca el sulfato de magnesio, cal, silicato sódico, ácido fosfórico y cemento refractario. Entre los orgánicos se encuentra el almidón, alquitrán y melazas (Gómez, 2013).

Conformado

Este proceso es realizado en piezas cuyas masas presentan un nivel de humedad menor a 10%, por lo que son denominadas como secas, siendo posible efectuarlo en prensas, lo cual no aplica para las masas plásticas cuya humedad es mayor a 10%, debido a que la incomprensibilidad del agua sería un impedimento. La fase de prensado no solo hace posible la conformación de piezas, también contribuye a disminuir la porosidad la cual en ciertos casos reduce hasta en un 20%. La pieza que se obtiene mediante este procedimiento es conocida como “pieza en verde”, ya que no ha sido sometida a temperaturas. El prensado uniaxial, es aplicado para compactar la mezcla usando un molde rígido al cual se le ejerce presión unidireccionalmente a través de un pistón, embolo o punzón rígido; esta técnica es fácil de automatizar y eleva la capacidad de producción (Gómez, 2013).



Figura 0.13 Prensa hidráulica para la elaboración de ladrillos refractarios

Fuente: Gómez (2013)

Prensado

Las fases generales que conlleva el proceso de prensado son; llenado de molde, compactación y conformado, extracción de la pieza. Para el prensado en seco la presión máxima a aplicar oscila entre 20 a 200 Mpa. La alimentación se basa en, agregar el material granular en el orificio que tiene el molde, esto se efectúa por medio de un mecanismo de deslizamiento dosificado de forma volumétrica. Cuando se llena el molde con el polvo cerámico que contiene las propiedades necesarias, se da inicio a la fase de compactación o conformado, donde el pistón superior ejerce movimientos descendentes ingresando a la cavidad del molde para precomprimir el polvo y a su vez, se elimina el aire. A medida que se va desarrollando el prensado, los pistones superior e inferior actúan comprimiendo el polvo debido al movimiento que estos realizan de manera sincronizada e independiente (Gómez, 2013).

Compactación

El proceso final de compactación le proporciona a la pieza tensiones residuales de compresión que le dan soporte en el orificio del molde, luego se procede a retirar el pistón

superior y el inferior es quien remueve la pieza del molde por medio del empuje generado, el cual es mayor que las tensiones residuales de compresión.

- a) **Proceso de secado:** tiene la función de eliminar el agua contenida en la mezcla cruda que se incorpora en la preparación de materias primas. Para pasar al proceso de secado; es fundamental que las piezas estén completamente secas para que puedan cocerse sin riesgos de quiebre o agrietamientos; esta fase se efectúa en secadores tipo túnel a una temperatura mayor a los 100°C. El agua que es eliminada de la pasta y que se encuentra libre de ella, se denomina agua de poro e intergranular; la eliminación mediante el secado afecta el volumen de la pieza en verde. Por consiguiente, el agua de poro se debe eliminar a temperaturas cercanas a las de ebullición, si la misma es extraída en la fase de sinterización o cocción, entonces la alta temperatura superficial de la pieza junto con la pequeña conductividad térmica originará que la fracción final de humedad sea excluida mediante una capa de material ya sinterizada, produciendo un porcentaje alto de porosidad en la pieza (Gómez, 2013).

- b) **Sinterización:** consiste en el procedimiento térmico de un compactado cerámico, metálico o de un polvo, el cual, es efectuado a una temperatura inferior a la que presenta la fusión de la mezcla, con el propósito de aumentar la resistencia y fuerza de la pieza mediante la creación de enlaces entre partículas. Este es un proceso que calienta las materias primas precalcadas a elevadas temperaturas, para conseguir la producción de algunas reacciones químicas y así se formen los componentes requeridos para consolidar las partículas. La resistencia del compactado o conformado de los polvos se desarrolla mediante un procedimiento a elevadas temperaturas conocido como sinterizado; utilizado para acoplar las partículas entre sí dentro de forma sólida y coherente (Gómez, 2013).

El sinterizado no se origina hasta que la temperatura del producto haya excedido al menos $1/2$ o $2/3$ de la temperatura de fusión, siendo capaz de crear una significativa difusión

atómica sobre el sinterizado ya sea en estado sólido. Las fases del sinterizado se pueden observar en la figura 1.8 consta de ceración de cuellos, variaciones en la geometría y contracción del compactado, poros aislados y eliminación de porosidades (Ver figura 1.14).

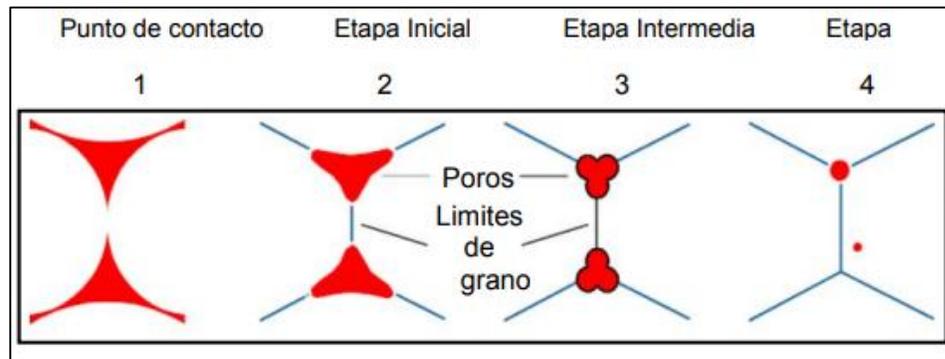


Figura 0.14 Fases del proceso de sinterizado

Fuente: Gómez (2013)

Las diferentes temperaturas de sinterización se clasifican de acuerdo a los grupos de materias más relevantes: ladrillos de chamota entre 1250 a 1500°C, ladrillos de sílice entre 1450 a 1500°C, ladrillos aluminosos entre 1500 a 1800°C y ladrillos de magnesia entre 1500 a 1800°C.

Temperizado

El temperizado es un tratamiento térmico, por lo general aplicado en los refractarios cuya composición es a base de dolomita combinada con alquitrán, para que posean mayor resistencia ante ataques químicos originado por escoria. El proceso de temperizado, tiene el propósito de distribuir el alquitrán de manera uniforme dentro del refractario, y así convertirlo en un producto carbonoso que puede cerrar los poros presentes en el interior del refractario. Las temperaturas normalmente varían entre los 300 y 350°C, esto depende del grado de temperatura a la que el alquitrán alcance los 250 poises (Gómez, 2013).

Empaquetado

Los materiales refractarios son previamente inspeccionados a fin de realizar una correcta clasificación y reciclar o desechar los materiales que poseen alguna deformación o defecto. En este proceso, el material refractario es organizado cuidándolos de la

exposición al medio ambiente y aislándolos de la humedad, para ello se emplean bolsas especiales a las que se les retira el aire, formando vacío (Gómez, 2013).

Conminución

La conminución indica la reducción de tamaño de un material de dimensiones de partícula promedio a un tamaño de partícula más pequeño o requerido para un tratamiento u objetivo, este proceso de conminución se realiza mediante la trituración, chancado, molienda y otros (Zumarán, 2017).

La primera etapa de la conminución empieza desde el momento que se utiliza una pala, pico o voladura si fuese necesaria para extraer el material de la mina o cantera. La operación de trituración es la primera etapa mecánica de la conminución y por lo general se realiza en seco y en etapas sucesivas de acuerdo a la clasificación que fuese necesaria. Industrialmente, se utilizan diferentes tipos de máquinas de trituración y suelen clasificarse de acuerdo a las etapas en que se emplean y el tamaño de material tratado (Parra, 2019).

Según Zumarán (2017) la conminución es medida como la razón de reducción (R_r), dicha variable se determina a través de la ecuación:

$$R_r = \frac{\text{Tamaño inicial o tamaño del alimento}}{\text{Tamaño final o tamaño del producto}}$$

CAPÍTULO II

CONSIDERACIONES INICIALES Y PREPARACIÓN DE MATERIAS PRIMAS

2.1 Consideraciones de la metodología experimental aplicada en el estudio

El objetivo de la investigación es determinar la dosificación óptima para la elaboración de ladrillos refractarios. En este sentido, se ha propuesto un experimento mediante el cual se ha desarrollado 45 dosificaciones diferentes con las materias primas de las localidades de Susudel, Cumbe y Tarqui.

El proceso de dosificación considera como materia prima de fabricación de los ladrillos refractarios es el caolín, chamota y las arcillas. A partir de estos insumos se evalúan varias configuraciones o dosificaciones. De igual manera se definieron las siguientes condiciones experimentales:

Tabla 0.1 Consideraciones generales del procedimiento experimental aplicado en el estudio

Consideraciones del proceso experimental aplicado	Observación
Materiales a emplear	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 3 tipos arcillas de Capillapamba, Susudel y Tarqui ▪ 3 tipos de caolín (Susudel, Cumbe y Tarqui). ▪ Chamota (molienda, tamizado, clasificación)
Temperatura de quemado	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 900 °C a 1300 °C (específicamente 900°C, 1000°C, 1100°C, 1200 °C y 1300 °C)
Proceso para precisar tamaño de las partículas de materia	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Molino de mandíbulas ▪ Molino de bolas ▪ Tamizado tamiz 10 y 40
Procesos de lavado	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Manual ▪ Hidrociclón

Fuente: Elaboración propia

En el caso de la temperatura se destaca que se definió el rango de 900°C a 1300 °C, debido a que en la población de Cuenca solo existe un horno con este intervalo de operación y no hay con capacidades superiores. A manera de disponer de condiciones controladas entre este intervalo de temperatura se sometió las muestras a temperaturas de 900°C, 1000°C, 1100°C, 1200 °C y 1300 °C. Con relación a proceso de lavado se toma en cuenta los dos procesos aplicados de manera común en la elaboración de ladrillos (manual e hidrociclón). La selección de proceso reducción de tamaños de las partículas de los materiales a través del molino de mandíbulas y el molino de bolas, es para buscar uniformidad en las dimensiones de los materiales a ser mezclado, no obstante apoyados por las deducciones hechas en investigaciones tomadas como referencia como es el caso de Vergara (2019) que demostró que un proceso de tamizado con malla 10 y 40 genera resultados óptimos en el proceso de mezcla de materiales para generar ladrillos.

En cuanto a los parámetros a medir de cada uno de los ladrillos generados con las diferentes dosificaciones, se indica en la tabla 2.2

Tabla 0.2 Consideraciones generales del procedimiento experimental aplicado en el estudio

Mediciones involucradas en el proceso experimental	Observación
Volumen en mm³	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Volumen de los diferentes bloques elaborados con las dosificaciones establecidas (pre y post quema)
Masa en kg	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Conocer la masa de los ladrillos (45 dosificaciones) una vez sumergidas en agua por 24 hr
Peso en kg m/s²	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Conocer la variación de peso pre y post quema
Absorción de agua (%)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Evaluar el nivel de agua que absorben los bloques la ser sumergidos en esta
Contracción de muestras pos quema	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Para evaluar la variación de las dimensiones de los diferentes ladrillos (todas las dosificaciones)
Resistencia calorífica	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Para precisar la resistencia térmica de los bloques

Fuente. Elaboración propia

Como fases del procedimiento experimental se plantea:

- a) **Preparación de material:** esta involucra actividades de adecuación del material, desde su condición original, el cual es sometido a proceso de conminución, llevando el mismo a dimensiones de partículas que faciliten la mezcla y tomando en cuentas las sugerencias emitidas por investigadores. Los procesos a ser aplicados para el acondicionamiento de la materia prima involucran las etapas de selección, el secado, selección, conminución, tamizado y lavado. Cada una de estas fases son elementales en el proceso de fabricación de ladrillos y serán aplicadas, bajo condiciones controladas, formando parte del procedimiento de trabajo.

- b) **Dosificación:** el experimento considera 45 dosificaciones, de los cuales se obtienen igual número de muestras (bloques de ladrillo) los cuales serán sometidos a diferentes condiciones controladas de temperatura y se evaluarán diferentes propiedades. Los criterios de dosificación se exponen al detalle en el capítulo III, no obstante a manera de síntesis se considera para la elaboración de las pastas con las que se produjeron los ladrillos, variaciones de la cantidad de arcilla, chamota y caolín, las proporciones se muestran en la tabla 3-3, se introduce como variantes el proceso de lavado del material, si fue por hidrociclón o lavado manual.

2.2 Diagrama de flujo para elaboración de un ladrillo refractario

El proceso de elaboración de los ladrillos incluyó una serie de etapas las cuales se sintetizan en el siguiente diagrama:

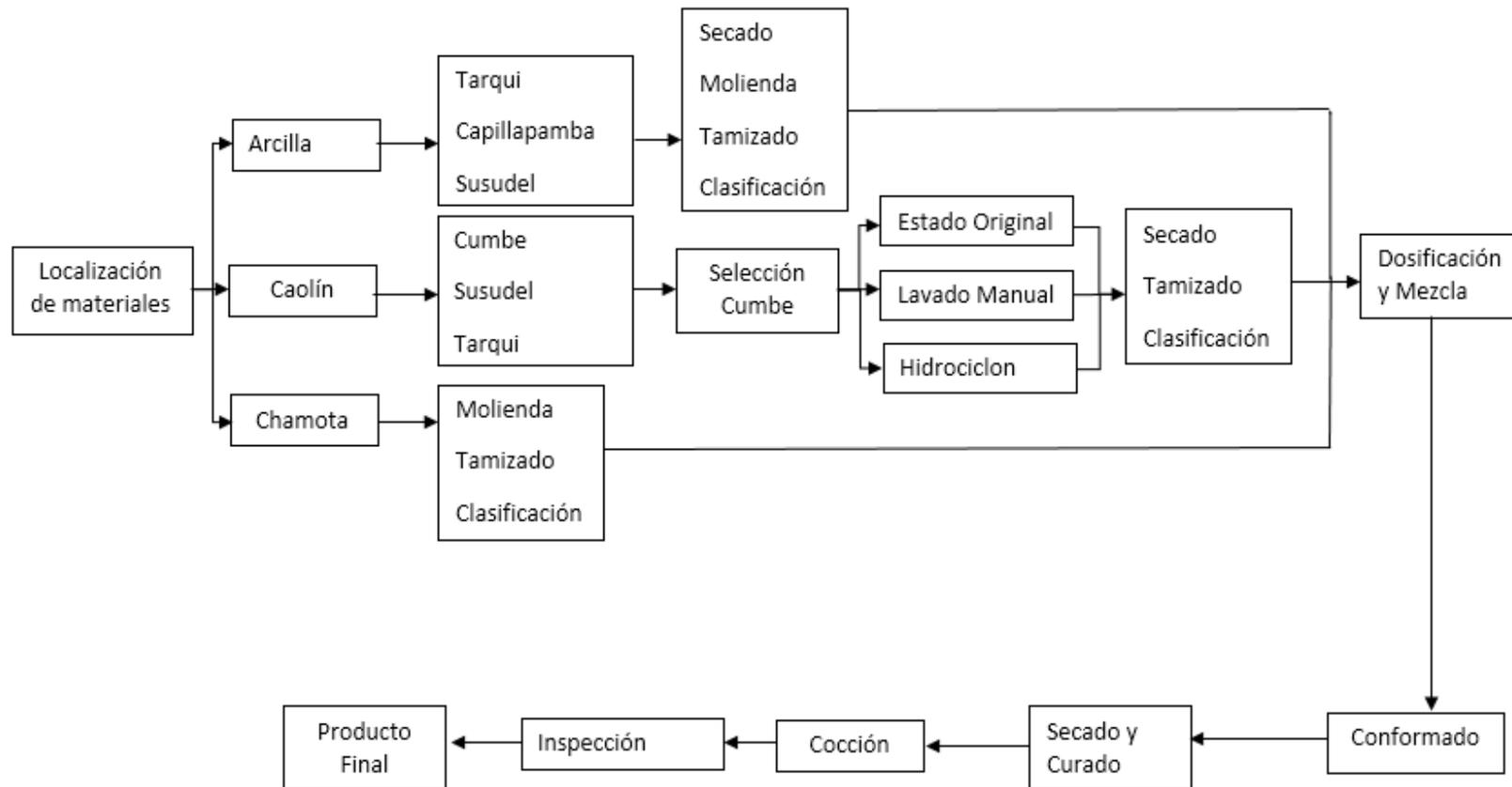


Figura 0.1 Diagrama de flujo de elaboración del refractario

Fuente: Elaboración propia

2.3 Preparación de materias primas empleadas en el procedimiento experimental

2.3.1 Secado del material

Se procedió al secado del material para así eliminar la humedad contenida, esto se realizó tanto de las arcillas como en los caolines utilizando el horno del laboratorio a una temperatura de 125 grados centígrados, el tiempo de exposición a estas condiciones fue de 12 horas. A partir de este período se evaluaba la humedad con un medidor de humedad absoluta PCE-PMI 2, teniéndose posterior a este tiempo valores de 5% al 10 %. Se mantuvo por 6 horas más asegurando que este no presentara humedad. En la figura 2.1 se aprecia el horno de secado empleado en el proceso.

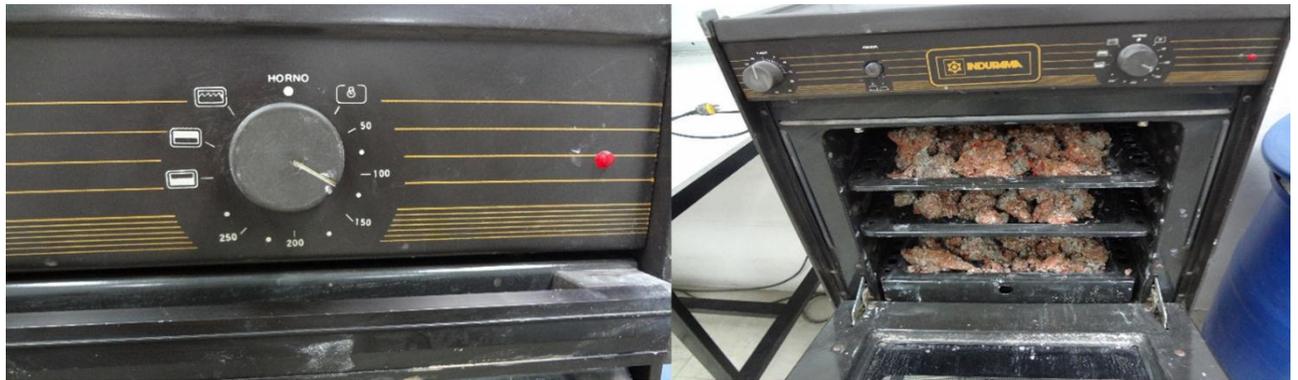


Figura 0.2 Horno de secado y visualización de la sección de adecuación de temperatura

Fuente: Elaboración propia

Para la Chamota se determinó el nivel de humedad precisándose que este era de 0 %, motivo por el cual no se requirió proceso de secado. Se procedió a realizar la trituration haciéndolo pasar en primer lugar por el molino de mandíbula y posteriormente a través del molino de bola. Con base en el estudio de Vergara (2019), se tomaron en referencia los resultados arrojados en relación al caolín. Se destaca que en dicha investigación, se realizó un análisis de laboratorio a este material, pasando por una etapa de clasificación granulométrica, secado y estudio por fluorescencia de rayos X para establecer el contenido

de Al_2O_3 y SiO_2 . Esto permitió descartar, a partir de los valores de referencia y coloración, los caolines de Susudel y Tarqui al no ser puros.

El proceso de secado de las arcillas, facilitó que la variable humedad no tuviera incidencia en el proceso. El objetivo central es evaluar el tipo de arcilla y proporción en la mezcla con los otros componentes como el caolín. De igual manera se toma en cuenta si estas fueron pasadas por un tipo de lavado manual, por hidrociclón o simplemente sin ningún tratamiento previo.

2.3.2 Conminución del material

Esta fase buscó la disminución del tamaño de materia que será empleado en el proceso dosificación y mezcla. La conminución se aplicó tanto a la arcilla como a la chamota.

2.3.2.1 Conminución de la arcilla

Una vez ya seca la arcilla, se procedió a la reducción del tamaño de las partículas del material de dimensiones promedio a uno más pequeño. Debido a que el tamaño inicial de las partículas era posible ser procesado por el molino de bola, no fue necesario pasarlo previamente por el molino de mandíbulas; en este equipo se procesó la arcilla para reducir el tamaño de las partículas por espacio de tiempo de 20 minutos. Este tiempo es necesario para lograr disminuir el tamaño del material, ya que por experiencia, a períodos de tiempo mayores a este, la arcilla tiende a adherirse a las paredes del tabor del molino de bola, dificultando su extracción. Los tres tipos de arcilla que se consideraron en este estudio fueron sometidos al mismo intervalo de tiempo para su conminución.



Figura 0.3 Molino de bolas y muestra de material de arcilla con tamaño de granos reducido

Fuente: Elaboración propia

2.3.2.2 Conminución de la chamota

En el caso de la chamota, dado que el material inicial era de dimensiones mayores, se procedió a ingresar el ladrillo de chamota directamente en el molino de mandíbulas. A través de este equipo se redujo el tamaño de las partículas, las cuales posteriormente fueron pasadas por el molino de bola por un período de 20 minutos. El nivel de llenado de molino fue de un 30%, esto para evitar atascamiento y asegurar un buen proceso de disminución de tamaño del material.



Figura 0.4 Molino de mandíbulas

Fuente: Elaboración propia

2.3.3 Tamizado

A través del tamizado se buscó separar las partículas de diferentes tamaños al pasarlas por un tamiz con filtro o malla de alambre, las partículas pequeñas pasan por los orificios del colador y las de mayor tamaño quedan retenidas. Este proceso se aplicó para la arcilla y la chamota.



Figura 0.5 Equipo de tamizado

Fuente: Elaboración propia

2.3.3.1 Tamizado de las arcillas

Se procedió a tomar los tres tipos de arcillas ya secas y posteriormente molidas, para pasarlas por el tamiz 40 (número estandarizado de malla) y tener una muestra uniforme para su posterior tratamiento.



Figura 0.6 Equipo de tamizado Humboldt empleado para la arcilla

Fuente: Elaboración propia

2.3.3.2 Tamizado de la chamota

El material que fue molido a través del molino de mandíbulas y posteriormente por el molino de bolas, fue tamizado empleando una malla 10 (número estandarizado de malla).



Figura 0.7 Equipo de tamizado Humboldt empleado para la chamota

Fuente: Elaboración propia

2.3.4 Lavado de caolín

El proceso de lavado se efectuó solo al caolín tomando como sugerencia las emitidas por Vergara (2019) en el cual se indica que el material es de cabeza de 24,4% de Al_2O_3 con un 46,2 % de sílice. Se sabe que el mayor porcentaje de alúmina, está presente tanto en su estado original 26,8% de Al_2O_3 en partículas mayores de 5mm con alta recuperación, lavado manual 32,5 % de Al_2O_3 en partículas mayores de 5mm y una recuperación del 38,52%, el lavado por hidrociclón con 31,4 % de Al_2O_3 en partículas mayores de 5mm y con una recuperación de 20,89 % aunque en algunos casos se obtienen altas recuperaciones, dejando de un lado el lavado en espiral que presentó bajo porcentaje de concentración de alúmina Al_2O_3 en partículas mayores de 5mm, niveles muy por debajo del porcentaje de alúmina deseado, para tener una dosificación de buena refractariedad y recuperación.

Tabla 0.3
Resultados de Recuperación de Al₂O₃

Descripción	Al ₂ O ₃ Recuperación		FM (%)
	(%)	(%)	
Material de cabeza	24.4		
LAVADO			
M1 - tamaño mayor a malla #40	32.5	38.52	51.30
M1 - tamaño menor a malla #40 y mayor que malla #100	25.4	11.35	11.81
M1 - tamaño menor a malla #100	26.3	64.87	69.92
M2 - tamaño mayor a malla #40	31.4	40.15	51.67
M2 - tamaño menor a malla #40 y mayor que malla #100	27.5	11.00	12.40
M2 - tamaño menor a malla #100	16.4	39.68	26.67
ESPIRAL			
Salida 1			
M2 - tamaño mayor a malla #40	20.3	3.45	2.87
M2 - tamaño menor a malla #40 y mayor que malla #100	25.3	2.34	2.42
M2 - tamaño menor a malla #100	23.9	2.75	2.69
Salida 2			
M2 - tamaño mayor a malla #40	31.9	5.33	6.97
M2 - tamaño menor a malla #40 y mayor que malla #100	28.7	0.95	1.11
M2 - tamaño menor a malla #100	23.1	2.72	2.58
Salida 3			
M2 - tamaño mayor a malla #40	32.7	8.78	11.77
M2 - tamaño menor a malla #40 y mayor que malla #100	30.1	1.98	2.45
M2 - tamaño menor a malla #100	24.2	77.11	76.48
HIDROCICLÓN			
Descarga			
M2 - tamaño mayor a malla #40	31.4	20.89	26.88
M2 - tamaño menor a malla #40 y mayor que malla #100	27.5	4.24	4.78
M2 - tamaño menor a malla #100	25.2	5.79	5.98
Rebose			
M2 - tamaño mayor que malla #100	26.4	1.42	1.53
M2 - tamaño menor a malla # 100	22	65.90	59.42

Fuente: Elaboración propia

2.3.4.1 Lavado manual

Este proceso se efectuó para permitir la liberación de las impurezas de la caolinita y de esta manera lograr una adecuada distribución de las partículas, ya que las de menor tamaño, que en este caso corresponden a las impurezas, flotan, facilitando la separación.

El procedimiento, parte desde la introducción del material en un balde de 5 galones, se colocó la mitad de caolín y se le agregó agua hasta un 80% del volumen del recipiente. La dispersión de las partículas se logró con un sistema de agitación de una celda de flotación Denver.

El proceso de agitación de la mezcla tuvo una duración de 5 min a 1300 rpm y luego de este proceso se esperó 10 segundos para su decantación. Seguidamente el material es pasado por un tamiz número 40, para así retener las partículas mayores a 5mm, representada por la alúmina y que tiene como característica mayor densidad. Por otro lado, mediante el lavado, las partículas de sílice y arcilla pasarían a depositarse en otro valde, y se obtendría como resultado una separación y concentración del material de interés.



Figura 0.8 Proceso de lavado y celda de flotación Denver

Fuente: Elaboración propia

2.3.4.2 Lavado por hidrociclón

Con el apoyo del hidrociclón se buscó la separación de los sólidos, tomando en consideración su principio de funcionamiento, en el cual el flujo entra al equipo y los sólidos son separados en dos fracciones, una que se le denomina descarga, en el cual están los sólidos más gruesos y la otra que contiene los sólidos más finos conocida como rebose.

El flujo que alimenta al equipo, entra a presión de manera tangencial en la parte cilíndrica formando una especie de torbellino, este efecto, hace que las partículas más gruesas por influencia de la aceleración vayan cercanas a la pared y luego son expulsadas a través de una boquilla en forma de pulpa espesa. Debido a las reducidas dimensiones de dicha boquilla, solamente se descarga una parte de la suspensión, creándose en el vértice inferior un “torbellino secundario” de trayectoria ascendente, que es donde se produce la separación al generarse en este punto las mayores aceleraciones tangenciales. Esta corriente arrastra hacia el rebose las partículas finas junto con la mayor parte del líquido, que se descarga a través de un tubo central situado en el cuerpo cilíndrico superior del hidrociclón

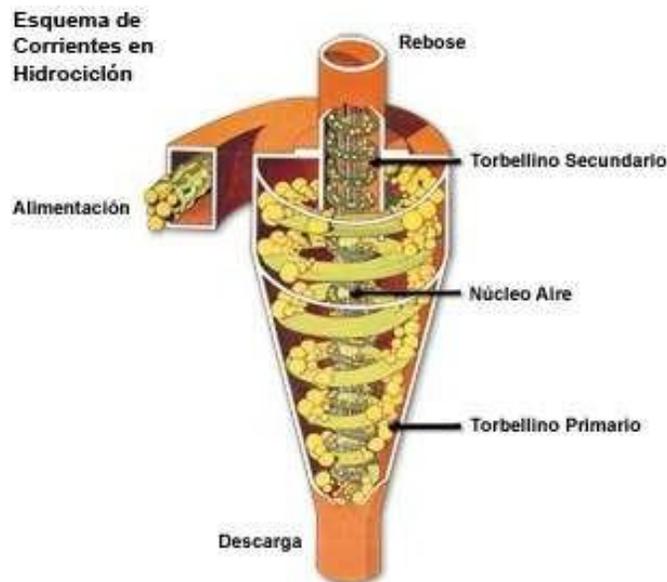


Figura 0.9 Esquema de funcionamiento de un hidrociclón. 1) Alimento; 2) Rebose; 3) Descarga; 4) Torbellino secundario; 5) Núcleo de aire; 6) Torbellino Primerio

Fuente: Ampmineral, 2017

Tomando en consideración el principio de funcionamiento de hidrociclón, se procedió a realizar el lavado del caolín con este equipo. Es importante resaltar que el empleo del hidrociclón permite disponer de un material con las siguientes características un porcentaje de alúmina de 31,4 % en partículas mayores de 5 mm, para ello se utiliza un hidrociclón Krebs modelo D3B. Esta prueba se realizó con 12,86 Kg de muestra de caolín con una pulpa del 24% en fracción de sólidos y un tiempo de recirculación por hidrociclón de 30 minutos aproximadamente. Para la concentración de alúmina, estos valores se mantienen a los análisis realizados para no modificar su porcentaje de alúmina.



Figura 0.10 Equipo hidrociclón Krebs

Fuente: Ordoñez (2017).

Se calculó un caudal para la descarga de 45.75 l/min y para el rebose un caudal de 17.24 l/min. Posteriormente se recogieron los 2 productos del hidrociclón (descarga y rebose), haciéndolo pasar a través del tamiz #40, tomando en cuenta que este se caracteriza por

presentar mayor porcentaje de retención de alúmina. El material se procedió a colocarlo en un recipiente y sobre un plástico para su secado.

2.3.5 Secado del caolín pos lavado

Se procedió a secar el caolín procedente de Cumbe luego de los lavados tanto por hidrociclón y lavado manual, para ello se colocó en un plástico a la intemperie por 5 días. De la misma manera el caolín en su estado original fue puesto a secar a la intemperie por un lapso de 3 días, aunque no presentaba humedad y se encontraba aparentemente seco el momento de su extracción.

2.3.6 Tamizado del caolín

Para el tamizado del caolín, se procedió tomando en cuenta las deducciones de Vergara (2019) donde los datos obtenidos por los análisis de laboratorio evidenciaron que la mayor cantidad de alúmina se encuentra en las partículas de dimensiones superiores a 5mm, en consecuencia se tomó lo que queda en la maya 40, más no las que atraviesan el tamiz.

2.3.7 Diseño de molde de matricería

Para el diseño de moldes de matricería se estableció un estándar de placas de 10 cm de lado de forma cuadrada y 2 cm de espesor. Estas son desarmables y sirvieron de horma de las muestras o pastas de acuerdo a su tipo de dosificación. Las mezclas contenidas en las placas quedaron en reposo por dos días hasta su secado a condiciones ambientales.

Se utilizaron placas gruesas de 4mm de grosor, para que el momento de su ajuste no sufriera deformación. Estas estaban compuestas por dos placas de 2 cm de alto en forma de L y 2 pernos, con tuerca soldados en cada extremo siendo estos de cabeza 6, caras tipo hexágono 13mm M8x18mm DIN933 acero galvanizado C18958. Todo esto se coloca sobre una placa cuadrada de 18 cm y 4 mm de espesor



Figura 0.11 Molde de matricería en la fabricación de muestras

Fuente: Elaboración propia

2.3.7.1 Cálculo dimensional del molde

Para el establecimiento de las medidas del molde, se tomaron en cuenta el factor de sobredimensionamiento y el volumen real antes de la contracción, en este sentido se aplicaron las siguientes ecuaciones:

Factor de sobredimensionamiento = f_s

Volumen Real antes de la contracción = $VR1$

A = ancho del ladrillo

L = largo del ladrillo

E = espesor del ladrillo

F_s = Factor de sobredimensionamiento

$$VR1=(A.f_s)(L. f_s)(E. f_s)$$

$$VR1=(A.L.E. f_s^3)$$

$$VR1=(A.L.E. f_s^3)$$

$$VR1=(20. 100. 100. 1^3)$$

$$VR1=200000\text{mm}^3$$

$$f_s^3= \frac{VR1}{A.L.E}$$

$$f_s= \sqrt[3]{\frac{VR1}{A.L.E}} = \sqrt[3]{\frac{200000}{20.100.100}} = 1$$

CAPITULO III

DOSIFICACIÓN, IDENTIFICACIÓN Y NOMBRAMIENTO DE LAS MUESTRAS

En esta sección se precisan la secuencia de actividades asociadas a la identificación, nombramiento y dosificación para el desarrollo de las diferentes muestras que serán sometidas a evaluaciones.

3.1. Nombramiento e identificación de muestras

Los diferentes materiales fueron empleados para la elaboración de varios tipos de pasta. Se consideró como elementos de interés el tipo de lavado al que fueron sometidos (hidrociclón o lavado manual), si recibieron tratamientos que constituyen un material puro (ejemplo caolín puro). Cada mezcla y proporciones de ingredientes, fueron nombradas para facilitar su identificación y estudio. Se generaron nueve tipos de mezcla y de cada una se crearon cinco muestras, siendo un total de 45. Dichas muestras fueron sometidas a variadas condiciones de temperatura. Para efectos de control las muestras serán llamadas como O1, O2, O3, M1, M2, M3, H1, H2 y H3. El tipo de material se aprecia en la tabla número 3-1

Tabla 0.1

Mezclas, descripción general

O1	MEZCLA(Chamota Guapán, Arcilla Susudel, Caolín San Antonio de Cumbe estado Original)
O2	MEZCLA(Chamota Guapán, Arcilla Tarqui, Caolín San Antonio de Cumbe estado Original)
O3	MEZCLA(Chamota Guapán, Arcilla Capillapamba, Caolín San Antonio de Cumbe estado Original)
M1	MEZCLA(Chamota Guapán, Arcilla Susudel, Caolín San Antonio de Cumbe estado Lavado Manual)
M2	MEZCLA(Chamota Guapán, Arcilla Tarqui, Caolín San Antonio de Cumbe estado Lavado Manual)
M3	MEZCLA(Chamota Guapán, Arcilla Capillapamba, Caolín San Antonio de Cumbe estado Lavado Manual)
H1	MEZCLA(Chamota Guapán, Arcilla Susudel, Caolín San Antonio de Cumbe estado Lavado por Hidrociclón)
H2	MEZCLA(Chamota Guapán, Arcilla Tarqui, Caolín San Antonio de Cumbe estado Lavado por Hidrociclón)
H3	MEZCLA(Chamota Guapán, Arcilla Capillapamba, Caolín San Antonio de Cumbe estado Lavado por hidrociclón)

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 0.2

Mezclas y nombres establecidos para cada una de las muestras

ITEM	Descripción
O1	cinco muestras O1a, O1b, O1c, O1d, O1e
O2	cinco muestras O2a, O2b, O2c, O2d, O2e
O3	cinco muestras O3a, O3b, O3c, O3d, O3e
M1	cinco muestras M1a, M1b, M1c, M1d, M1e
M2	cinco muestras M2a, M2b, M2c, M2d, M2e
M3	cinco muestras M3a, M3b, M3c, M3d, M3e
H1	cinco muestras H1a, H1b, H1c, H1d, H1e
H2	cinco muestras H2a, H2b, H2c, H2d, H2e
H3	cinco muestras H3a, H3b, H3c, H3d, H3e

Fuente: Elaboración propia

Las muestras, fueron sometidas a 5 temperaturas distintas en un horno cerámico de alta temperatura de la empresa Samo Thermal. A estas se les evaluó su comportamiento físico-químico a dichas condiciones, con especial interés en su refractariedad o resistencia a la quema.

Se parte de un conocimiento general en la fabricación de ladrillos refractarios de 5kg chamota, 5kg de caolín y 2kg de Arcilla. Con la ayuda de una balanza digital, se pesó las cantidades necesarias de cada material (arcilla, caolín y chamota), tomando en cuenta las dosificaciones establecidas para las muestras. Es de destacar que se realizaron cinco muestras de cada dosificación.

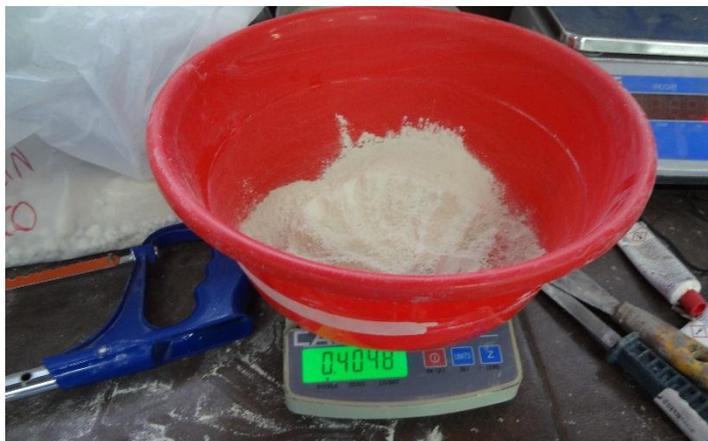


Figura 0.1 Determinación de las cantidades de material para cada muestra según dosificación planteada

Fuente: Elaboración propia

3.2. Dosificación de masa y agua

Una vez determinada las proporciones de material (chamota, caolín y arcilla) con las que se desarrollarían las muestras, se procedió a agregar agua con el objeto de generar la mezcla base. A fin de crear una mezcla homogénea y consistente, se fue añadiendo porciones de agua las cuales eran medidas con la ayuda de una probeta y registrándose el volumen para cada mezcla.

Los valores de cada tipo de material y las proporciones de agua están registrados en las tablas 3.3 y 3.4.



Figura 0.2 Preparado de la mezcla y herramienta de medición del volumen de agua añadido

Fuente: Elaboración propia

Tabla 0.3

Datos de las diferentes muestra, dosificación y proporciones de la mezcla para la elaboración de los ladrillos refractarios

Muestra	Cantidad de Muestras	Cantidad de Chamota (kg)	Cantidad de Caolín (kg)	Cantidad de Arcilla (kg)	Total de la pasta mezclada (kg)	Cantidad de agua agregada (ml)	Cantidad de agua por proporción de peso
O1	05	0.83	0.83	0.83	1.99	350	Por cada 0.005685 kg se agrega 1ml de agua
O2	05	0.83	0,3	0.33	1.99	410	Por cada 0.004853 kg se agrega 1ml de agua
O3	05	0.83	0.83	0.33	1.99	505	Por cada 0.003940 kg se agrega 1ml de agua
M1	05	0.83	0.83	0.33	1.99	350	Por cada 0.005685 kg se agrega 1ml de agua
M2	05	0.83	0.83	0.33	1.99	410	Por cada 0.004853 kg se agrega 1ml de agua
M3	05	0.83	0.83	0.33	1.99	505	Por cada 0.003940 kg se agrega 1ml de agua
H1	05	0.83	0.83	0.33	1.99	350	Por cada 0.005685 kg se agrega 1ml de agua
H2	05	0.83	0.83	0.33	1.99	410	Por cada 0.004853 kg se agrega 1ml de agua
H3	05	0.83	0.83	0.33	1.99	505	Por cada 0.003940 kg se agrega 1ml de agua

Fuente: Elaboración propia

Tabla 0.4

Tabla resumen de dosificaciones para muestras, tomando en cuenta su origen y si se aplicó o no proceso de lavado

	Caolín Original			Caolín Lavado Manual			Caolín Lavado por hidrociclón		
	A. Susudel	A. Tarqui	A. Capillapamba	A. Susudel	A. Tarqui	A. Capillapamba	A. Susudel	A. Tarqui	A. Capillapamba
Materia Prima	O1	O2	O3	M1	M2	M3	H1	H2	H3
Chamota	0.83 Kg	0.83 Kg	0.83 Kg	0.83 Kg	0.83 Kg	0.83 Kg	0.83 Kg	0.83 Kg	0.83 Kg
Caolín	0.83 Kg	0.83 Kg	0.83 Kg	0.83 Kg	0.83 Kg	0.83 Kg	0.83 Kg	0.83 Kg	0.83 Kg
Arcilla	0.33 Kg	0.33 Kg	0.33 Kg	0.33 Kg	0.33 Kg	0.33 Kg	0.33 Kg	0.33 Kg	0.33 Kg
Total Pasta 5 muestras	1.99 Kg	1.99 Kg	1.99 Kg	1.99 Kg	1.99 Kg	1.99 Kg	1.99 Kg	1.99 Kg	1.99 Kg
Agua por el Total de Pasta	350 ml	410 ml	505 ml	350 ml	410 ml	505 ml	350 ml	410 ml	505 ml
Kg en 1 ml de agua	0.005685 Kg	0.004853 Kg	0.003940 Kg	0.005685 Kg	0.004853Kg	0.003940 Kg	0.005685 Kg	0.004853 Kg	0.003940 Kg

Fuente: Elaboración propia

CAPITULO IV

ELABORACIÓN DE LOS LADRILLOS REFRACTARIOS Y PRUEBAS DE LABORATORIO

El proceso de fabricación o elaboración de un ladrillo refractario conlleva una serie de procedimientos y procesos mecanizados o manuales, que se ordenan o desarrollan en una serie de etapas sucesivas. Los materiales considerados son la arcilla, caolín y chamota, estos fueron utilizados para la fabricación de bloques, que posteriormente fueron cocidos y sometidos a pruebas en el laboratorio.

4.1 Elaboración de ladrillos refractarios

El proceso de elaboración de los ladrillos refractarios, inició con la dosificación de los materiales y agua. Se procedió a la fabricación de las muestras. Sobre los moldes se colocó diésel para que sea más cómodo su liberación al momento del desarmado de las placas. Seguidamente, se colocó la dosificación de material con una espátula y con tacos de madera se ejerció presión sobre este para comprimir y compactarlo, luego se coloca en una mesa para su posterior secado por 48 horas en la intemperie.



Figura 0.1 mezcla de material y tacos de madera empleados para compactar la mezcla

Fuente: Elaboración propia

Se procedió al amasado y compactado de material con las manos hasta obtener una pasta homogénea. El proceso de amasado se toma un tiempo aproximado de 10 minutos en cada muestra o dosificación.



Figura 0.2 Amasado de la mezcla

Fuente: Elaboración propia

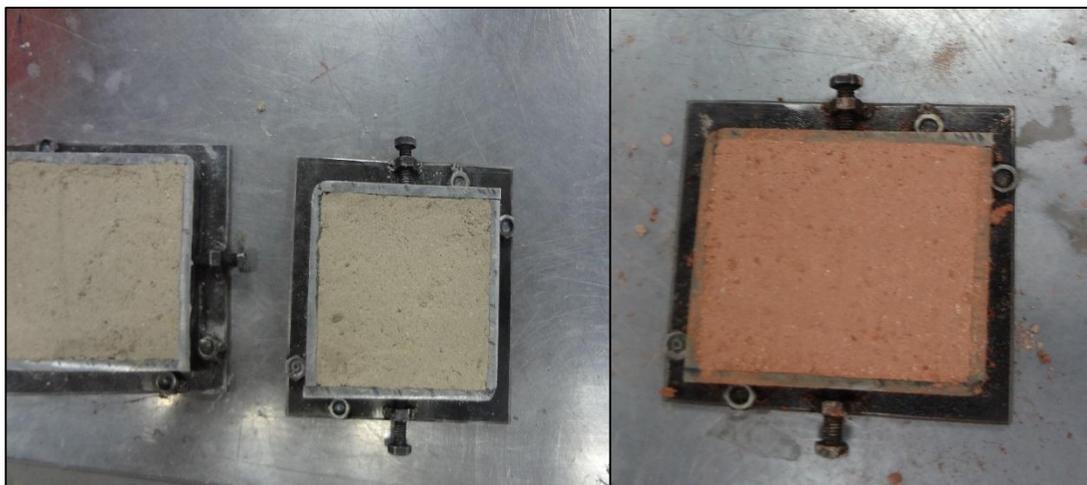


Figura 0.3 Mezcla de los diferentes materiales colocadas en los moldes

Fuente: Elaboración propia

4.2 Valores de masa anterior a la quema

Se procedió a la toma de valores de la masa de todas las muestras para luego proceder a realizar una comparación pre y pos quema. Se determinaron los valores de las masas secadas a la intemperie y expuestas 48 horas después en un lugar seco sin humedad. Su valor fue tomado en kg, para ello se usó una balanza digital.



Figura 0.4 Determinación de las masas del material moldeado y secado a la intemperie empleando balanza digital

Fuente: Elaboración propia

Tabla 0.1

Tabla resumen con las masas obtenidos en Kg para cada muestra

MUESTRA	O1	O2	O3	M1	M2	M3	H1	H2	H3
a	0.3193	0.3367	0.3113	0.3342	0.3213	0.3145	0.346	0.3382	0.3118
b	0.3356	0.3418	0.3168	0.3232	0.3309	0.3203	0.3282	0.3489	0.3259
c	0.3631	0.3215	0.2908	0.3282	0.3453	0.3253	0.3447	0.3295	0.306
d	0.3581	0.3168	0.3016	0.3335	0.3328	0.3141	0.3422	0.3527	0.3163
e	0.3251	0.3177	0.3022	0.3251	0.3473	0.3195	0.3541	0.3341	0.3199

Fuente: Elaboración propia

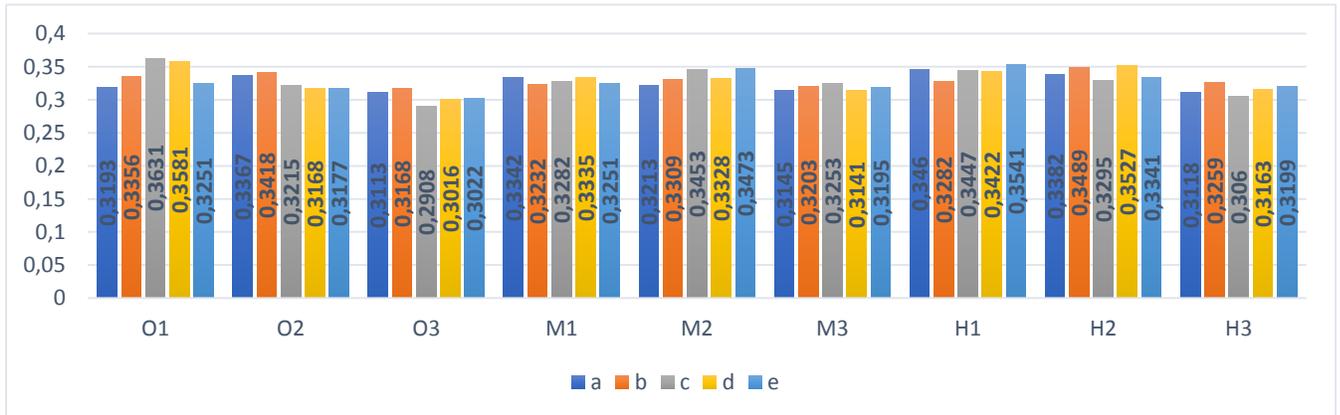


Figura 0.5 Representación gráfica de las diferentes masas en kg determinadas para cada una de las muestras

Fuente: Elaboración propia

4.3 Volumen de las muestras anterior a la quema

Se procedió a tomar las medidas en mm de las placas luego de encontrarse expuestas al ambiente y dejadas secando por 48 horas. Las dimensiones fueron tomadas con un calibrador o llamado pie de rey. A partir de los datos de largo, ancho y alto se calculó el volumen en mm^3 . Se manejó en estas unidades ya que si se transforma en m^3 los valores serían muy bajos y no se lograría visualizar la diferencia.

Volumen: referencial inicial 200000 mm^3

Fórmula : $\text{alto} \times \text{ancho} \times \text{largo}$



Figura 0.6 Toma de las dimensiones de las muestras

Fuente: Elaboración propia

Tabla 0.2

Tabla resumen con los volúmenes obtenidos en mm³ para cada muestra

MUESTRA	O1	O2	O3	M1	M2	M3	H1	H2	H3
a	186219	196000	194000	192000	186240	182457	180480	190080	188160
b	190000	192060	194040	186240	194040	186240	192000	190080	194040
c	200000	186200	176400	186200	194000	190000	192000	182400	188180
d	198000	186200	184338	194000	190080	180614	192060	184320	184300
e	200000	194040	182457	186240	186240	188160	186200	184240	190080

Fuente: Elaboración propia

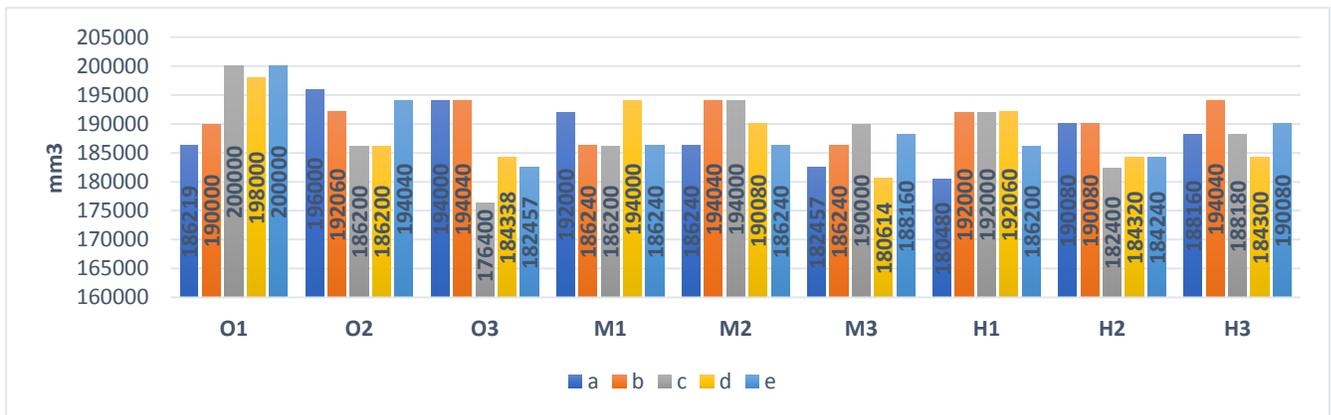


Figura 0.7 Representación gráfica de los diferentes volúmenes en mm³ determinados para cada uno de las muestras

Fuente: Elaboración propia

4.4 Peso de las muestras anterior a la quema

Se procede a sacar el peso de cada muestra anterior a la quema, esto se obtiene ya una vez tomados los valores de la masa en la balanza digital y mediante la fórmula del peso se obtienen los resultados mostrados en la tabla 4-3

$$W=m*g$$

Donde:

W= peso en newtons (kg m/s²)

m= masa (kg)

g=gravedad (9,81m/s²)

Tabla 0.3

Tabla resumen con los pesos en kg m/s² (Newtons) para cada muestra

MUESTRA	O1	O2	O3	M1	M2	M3	H1	H2	H3
a	3.132333	3.303027	3.053853	3.278502	3.151953	3.085245	3.39426	3.317742	3.058758
b	3.292236	3.353058	3.107808	3.170592	3.246129	3.142143	3.219642	3.422709	3.197079
c	3.562011	3.153915	2.852748	3.219642	3.387393	3.191193	3.381507	3.232395	3.00186
d	3.512961	3.107808	2.958696	3.271635	3.264768	3.081321	3.356982	3.459987	3.102903
e	3.189231	3.116637	2.964582	3.189231	3.407013	3.134295	3.473721	3.277521	3.138219

Fuente: Elaboración propia

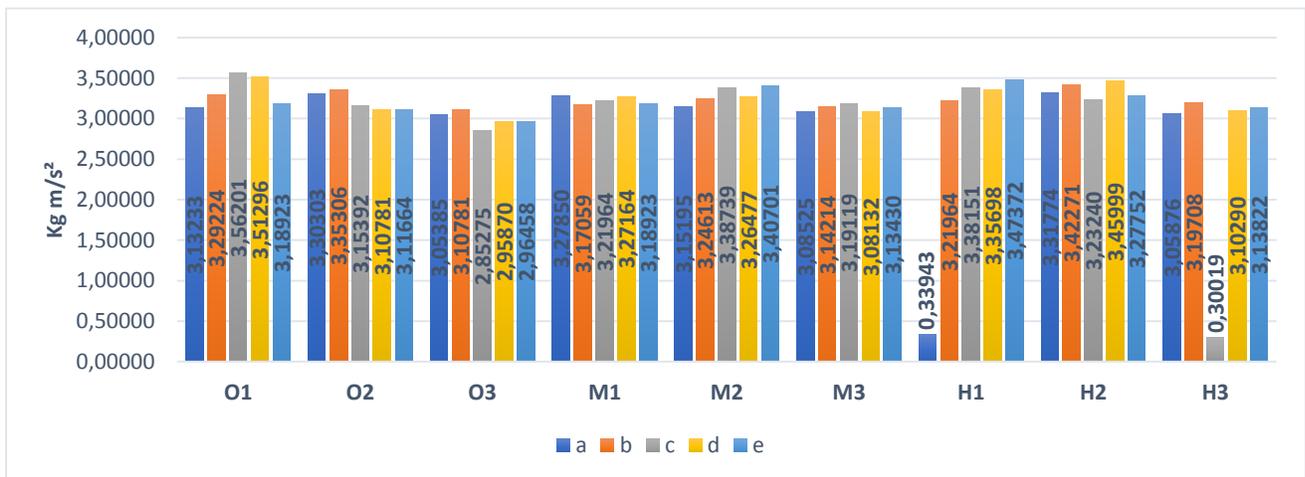


Figura 0.8 Representación gráfica de los diferentes pesos en kg m/s² (Newtons), determinados para cada una de las muestras

Fuente: Elaboración propia

4.5 Horno de quema

Se realizó una indagación y búsqueda de un horno de altas temperaturas en la provincia del Azuay, localizándose la empresa Samo Thermal, especializada en la fabricación de hornos de altas temperaturas. La compañía se encuentra ubicada en San Joaquín en la calle del Retorno y la vía Cuenca-Molleturo-Naranjal.



Figura 0.9 Horno de quema

Fuente: Elaboración propia

El equipo que la empresa fabrica y que fue empleado en este estudio dispone de unas especificaciones técnicas las cuales se mencionan a continuación:

Control digital

Programador electrónico americano con capacidad de almacenaje de 4 programas de 6 segmentos cada uno con control de velocidad de rampas de temperatura y tiempo de mantenimiento. También tiene programas pre-cargados de quema directa de cono para cerámica.

Medidas de cámara interna:

Alto: 15 cm

Ancho: 20 cm

Profundidad: 17 cm

Medidas externas:

Alto: 46 cm

Ancho: 33 cm

Profundidad: 40 cm

Material de cámara interna: ladrillos refractarios de alta alúmina (soporta temperaturas hasta 1400°C).

Temperatura máxima: 1300°C

Temperatura continua: 1100°C

Voltaje: 110V (220V opcional)

Amperaje: 15A

Potencia: 1700 Watts

Número de fases: 1

Termopar: Tipo K con revestimiento cerámico.

Elementos calefactores: alambre espiral de aleación tipo Kanthal A1(niquelinas).

Variación en medida de temperatura: $\pm 1^\circ\text{C}$

Switch: Consta de un switch con luz incorporada que indica el encendido y apagado de los elementos calefactores.

Instrumento para medir la temperatura: Controlador electrónico BARTLETT modelo 3k y un sensor de temperatura o denominado termopar tipo k con revestimiento cerámico.

Termopar

Constituye un tipo de sensor empleado para medir y regular la temperatura en el equipo. Por lo general compuesto de dos metales de diferente naturaleza y calibraciones que se unen en un extremo. Cuando dicha unión se enfría o calienta, se genera una tensión que es proporcional a la temperatura. Entre los termopares más comunes se tiene las calibraciones tipo T, J y K, siendo este último es de mayor popularidad dado a su bajo costo y operatividad en un amplio rango de temperaturas (Omega Engineering, 2020).

4.6 Proceso de quema de las muestras

La quema de las muestras se efectuó con el objeto de evaluar el comportamiento de estas y determinar la dosificación con mayor resistencia a las condiciones expuestas de temperatura. La prueba de quema se realizó en las instalaciones de la empresa Samo Thermal y empleando el horno cuya capacidad máxima es de 1300°C. Las muestras secas se sometieron a cinco diferentes valores de temperatura. Como tratamiento preliminar a la quema se realizó un curado a 500 °C. Para tomar la temperatura se utilizó un instrumento de medición denominado controlador electrónico BARTLETT modelo 3k y un sensor de temperatura tipo k con revestimiento cerámico incorporado en el horno.

Es importante mencionar que aunque existieron imprevistos como piezas rotas por la manipulación, estas fueron remplazadas por otras de la misma composición y volumen asegurando de este modo que no existan variaciones en las condiciones del procedimiento y las muestras. .

4.6.1 Programas de quema

Para las pruebas se programaron cinco quemas a diferentes temperaturas, siendo estas de 900°C, 1000°C, 1100°C, 1200 °C y 1300 °C

1ra quema:

900 °C

3 horas

300 °C / hr

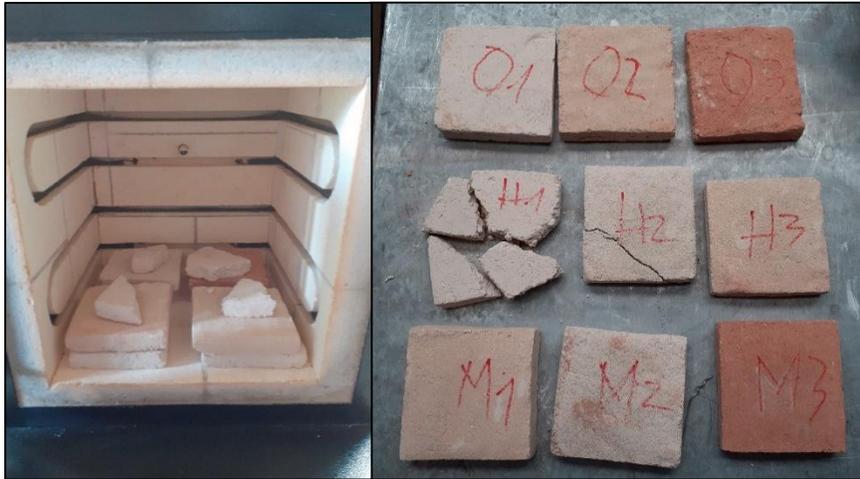


Figura 0.10 Muestras pre quema, 900 °C y 3 hr

Fuente: Elaboración propia

2da quema

1000 °C

3 horas 20 minutos

300 °C / hr



Figura 0.11 Muestras pre quema, 1000 °C y 3 hr 20 min

Fuente: Elaboración propia

3ra quema

1100°C

3 horas 40 minutos

300 °C / hora

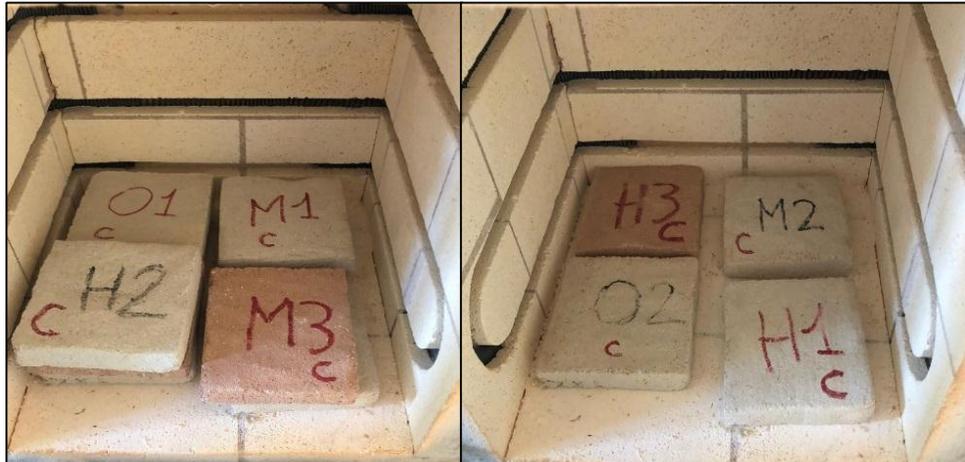


Figura 0.12 Muestras pre quema, 1100 °C y 3 hr 40 min

Fuente: Elaboración propia

4ta quema

1200 °C

4 horas

300 °C / hora



Figura 0.13 Muestras pre quema, 1200 °C y 4 hr

Fuente: Elaboración propia

5ta quema

1300 °C

4 horas 20 minutos

300 °C / hora



Figura 0.14 Muestras pre quema, 1300 °C y 4 hr 20 min

Fuente: Elaboración propia

4.6.2 Valores pos quema

Se procedió a medir la masa de cada una de las muestras con la ayuda de una balanza digital luego de las sesiones de quema, con el objeto de precisar la variación de masa. Los valores consolidados se encuentran en la tabla 4.4



Figura 0.15 Muestras pos quema y balanza digital

Fuente: Elaboración propia

Tabla 0.4

Tabla resumen con las masas obtenidas en kg para cada muestra pos quema

MUESTRA	O1	O2	O3	M1	M2	M3	H1	H2	H3
a	0.295	0.311	0.281	0.301	0.308	0.283	0.315	0.291	0.3065
b	0.31	0.314	0.285	0.291	0.299	0.287	0.297	0.313	0.291
c	0.334	0.294	0.261	0.298	0.31	0.291	0.311	0.298	0.274
d	0.333	0.289	0.27	0.301	0.3	0.28	0.31	0.317	0.283
e	0.302	0.29	0.273	0.293	0.313	0.285	0.318	0.299	0.286

Fuente: Elaboración propia

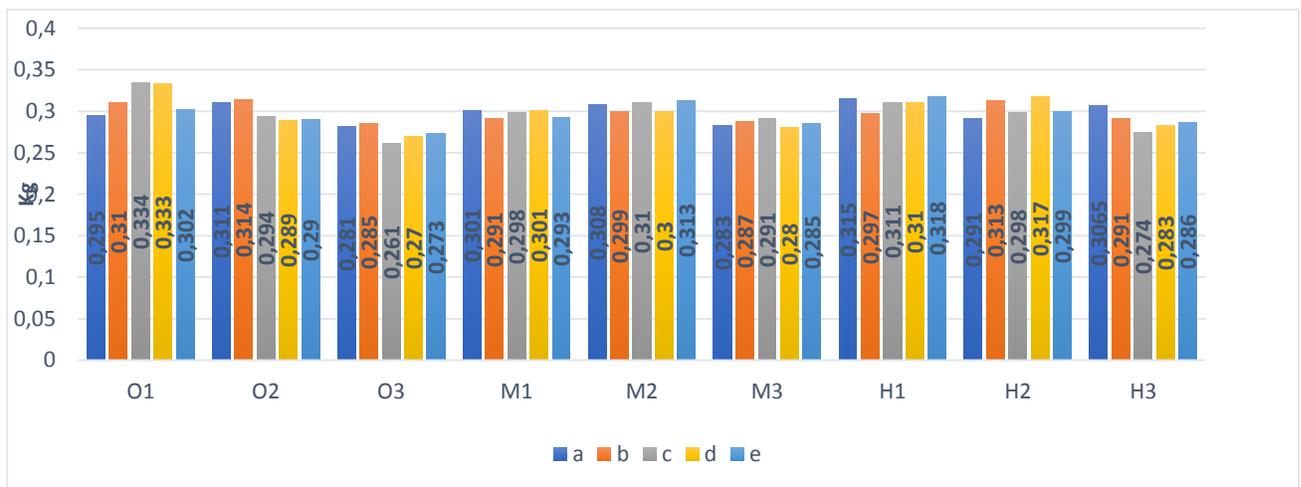


Figura 0.16 Representación gráfica de las diferentes las masas obtenidas en Kg para cada muestra pos quema

Fuente: Elaboración propia

4.6.3 Volumen en mm³ pos quema

Se tomaron las medidas pos quema de largo, ancho y alto con un calibrador o pie de rey para determinar si existe contracción en las muestras en comparación con las dimensiones que estas disponían antes de la quema. En la tabla 4.5 se agrupan dichos valores para cada muestra.

Tabla 0.5

Tabla resumen con las masas obtenidas en volumen en mm³ post quema

MUESTRA	O1	O2	O3	M1	M2	M3	H1	H2	H3
a	186219	196000	194000	192000	186240	182457	180480	186240	188160
b	190000	192060	194040	186240	192060	186240	190000	190080	192080
c	198000	186200	176400	186200	192060	190000	192000	180480	188180
d	198000	184300	178771	194000	190080	178752	192060	184320	184300
e	198000	194040	178752	186240	186240	188160	184240	178560	188160

Fuente: Elaboración propia

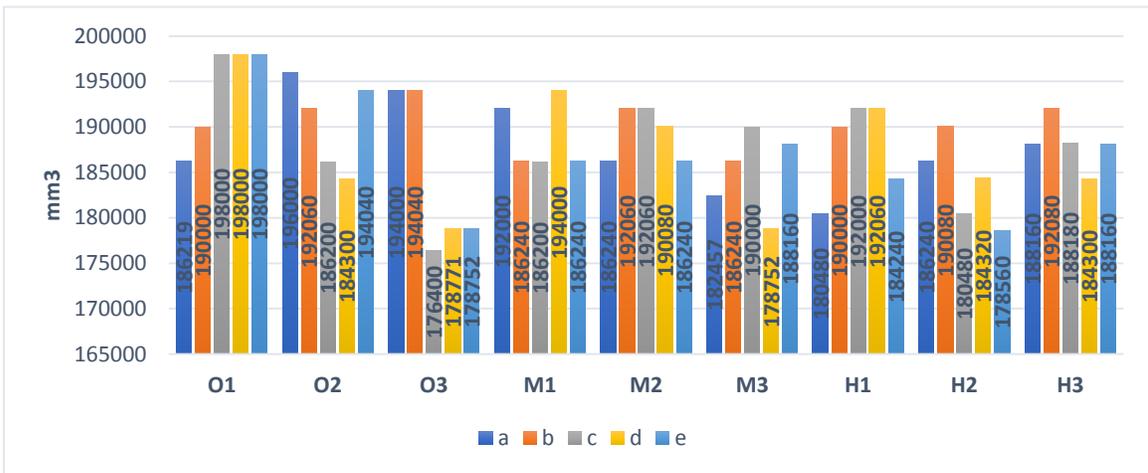


Figura 0.17 Representación gráfica de las diferentes las masas obtenidas en volumen en mm³ pos quema

Fuente: Elaboración propia

4.6.4 Peso post quema

Con los valores de la masa pos quema se calculó el peso en kg m/s² post quema de cada una de las muestras. En la tabla 4.6 se muestran dichos valores

Tabla 0.6

Tabla resumen de los pesos en kg m/s² post quema

MUESTRA	O1	O2	O3	M1	M2	M3	H1	H2	H3
a	2.89395	3.05091	2.75661	2.95281	3.02148	2.77623	3.09015	2.85471	3.00677
b	3.04110	3.08034	2.79585	2.85471	2.93319	2.81547	2.91357	3.07053	2.85471
c	3.27654	2.88414	2.56041	2.92338	3.04110	2.85471	3.05091	2.92338	2.68794
d	3.26673	2.83509	2.64870	0.95281	2.94300	2.74680	3.04110	3.10977	2.77623
e	2.96262	2.84490	2.67813	2.87433	3.07053	2.79585	3.11958	2.93319	2.80566

Fuente: Elaboración propia

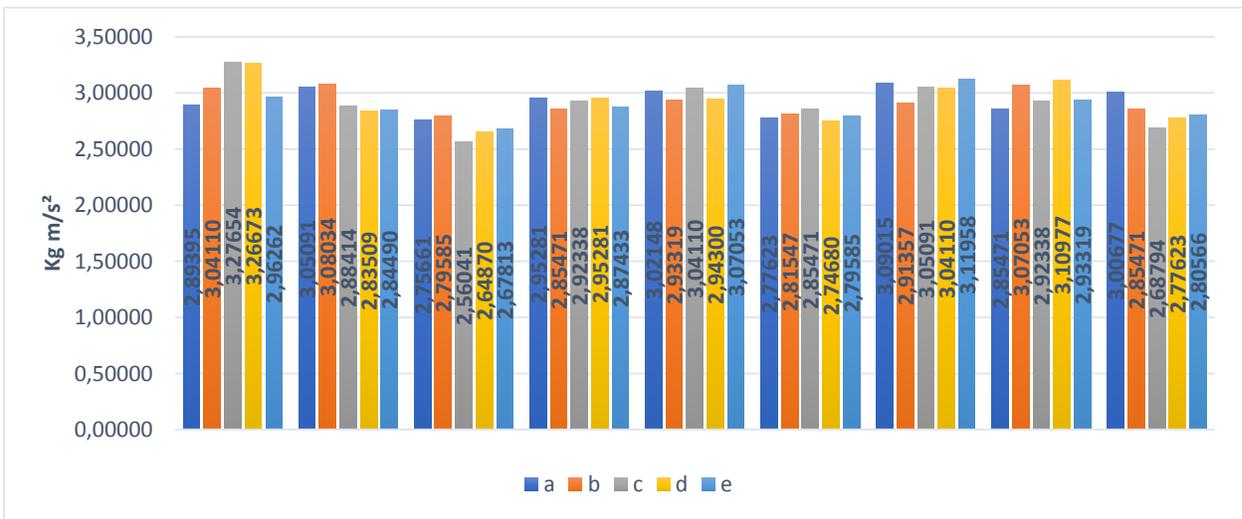


Figura 0.18 Representación gráfica de los diferentes pesos en kg m/s² pos quema

Fuente: Elaboración propia

4.7 Proceso de pruebas de absorción

Una vez sometidas las muestras al proceso de quema y determinado las masas con el apoyo de la balanza digital, cada una de estas fueron sumergidas en un recipiente con agua, el nivel de agua sobre las muestras era de aproximadamente 10 cm (ver figura 4-20). Cada una de las muestras fueron expuestas a las mismas condiciones por un lapso de tiempo de 24 horas. Posterior a este tiempo las muestras son extraídas del recipiente con agua colocadas sobre una mesa cubierta por una toalla, se dejó sobre esta por espacio de 1 minuto (ver figura 4.19).

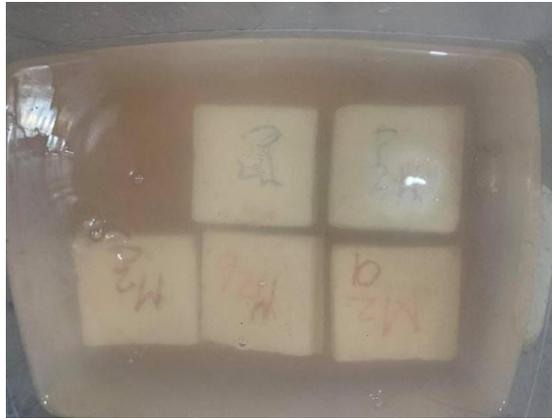


Figura 0.19 Absorción de agua pos quema

Fuente: Elaboración propia



Figura 0.20 Muestras en reposo retiradas del agua

Fuente: Elaboración propia

4.8 Determinación de la masa de la muestra una vez retiradas del agua

Las muestras extraídas del recipiente con agua fueron pesadas con el objeto de evaluar la variación de la masa después de haber sido sumergidas por un período de 24 horas en agua. Cada muestra fue colocada sobre la balanza digital y conocida su masa, la diferencia entre la masa antes y después de ser sumergida en agua, representa el incremento producto de la absorción de líquido. Los valores determinados se aprecian en la tabla 4-7

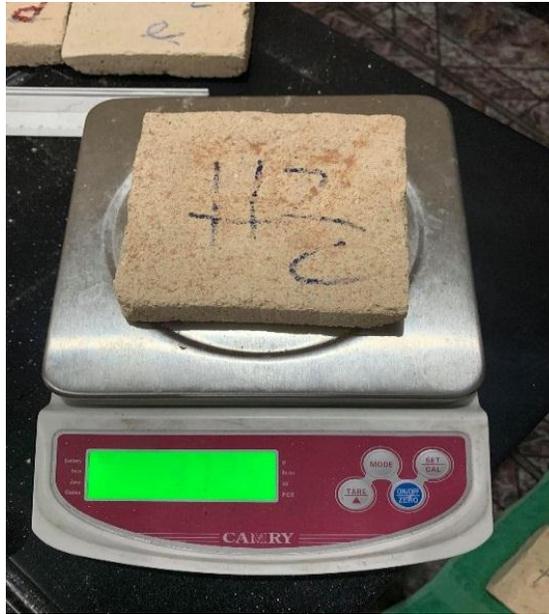


Figura 0.21 Medición de la masa en kg de cada muestra posterior a ser sumergidas en agua por 24 hr

Fuente: Elaboración propia

Tabla 0.7

Tabla resumen de las masas de cada muestra en kg que fueron sumergidas en agua por 24 horas

MUESTRA	O1	O2	O3	M1	M2	M3	H1	H2	H3
a	0.3475	0.3745	0.3415	0.3555	0.3705	0.3395	0.3740	0.3520	0.3600
b	0.3655	0.3790	0.3480	0.3475	0.3600	0.3445	0.3560	0.3775	0.3510
c	0.3930	0.3545	0.3180	0.3530	0.3735	0.3470	0.3725	0.3585	0.3310
d	0.3910	0.3455	0.3300	0.3550	0.3590	0.3335	0.3680	0.3820	0.3405
e	0.3605	0.3420	0.3260	0.3465	0.3690	0.3375	0.3750	0.3555	0.3410

Fuente: Elaboración propia

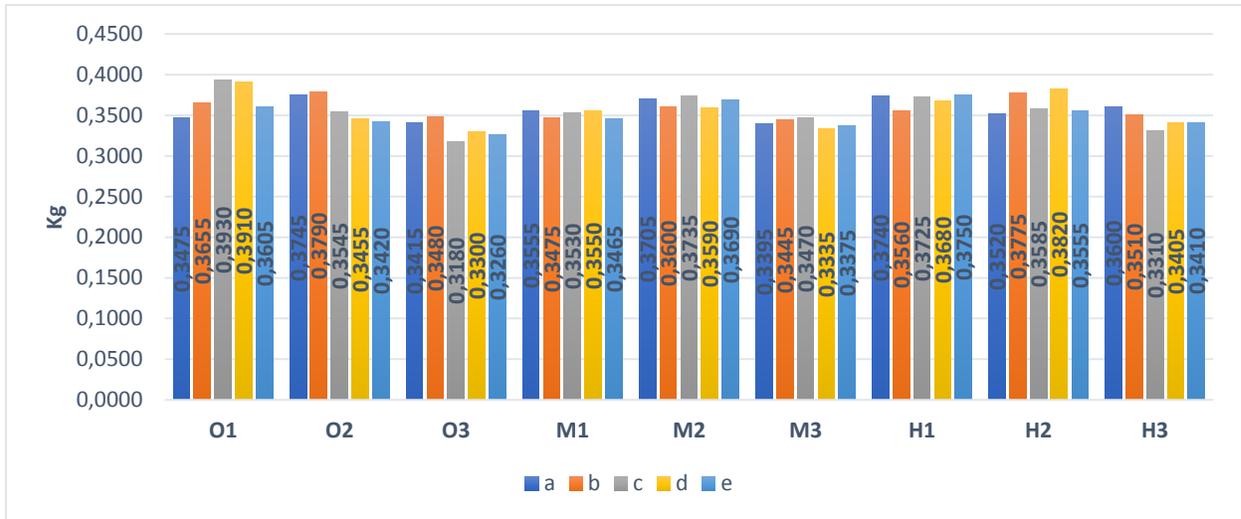


Figura 0.22 Representación gráfica de las masas de cada muestra en kg que fueron sumergidas en agua por 24 horas

Fuente: Elaboración propia

4.9 Cálculos de la absorción:

Para determinar la absorción individual de cada ladrillo se utilizó la fórmula:

$$\text{Absorción}\% = \frac{P2 - P1}{P1} \cdot 100\%$$

Siendo:

P1: masa de la muestra secada al horno

P2: masa de la muestra después de 24 horas sumergida

Absorción% O1, O2, O3

Los datos determinados a partir de la ecuación se pueden observar en la tabla 4.8

Tabla 0.8

Tabla resumen de % de absorción

MUESTRA	O1	O2	O3	M1	M2	M3	H1	H2	H3
a	34.75	37.45	34.15	35.55	37.05	33.95	37.40	35.2	36.00
b	36.55	37.90	34.80	34.75	36.00	34.45	35.60	37.75	35.10
c	39.30	35.45	31.80	35.30	37.35	34.70	37.25	35.85	33.10
d	39.10	34.55	33.00	35.50	35.90	33.35	36.80	38.20	34.05
e	36.05	34.20	32.60	34.65	36.90	33.75	37.50	35.55	34.10

Fuente: Elaboración propia

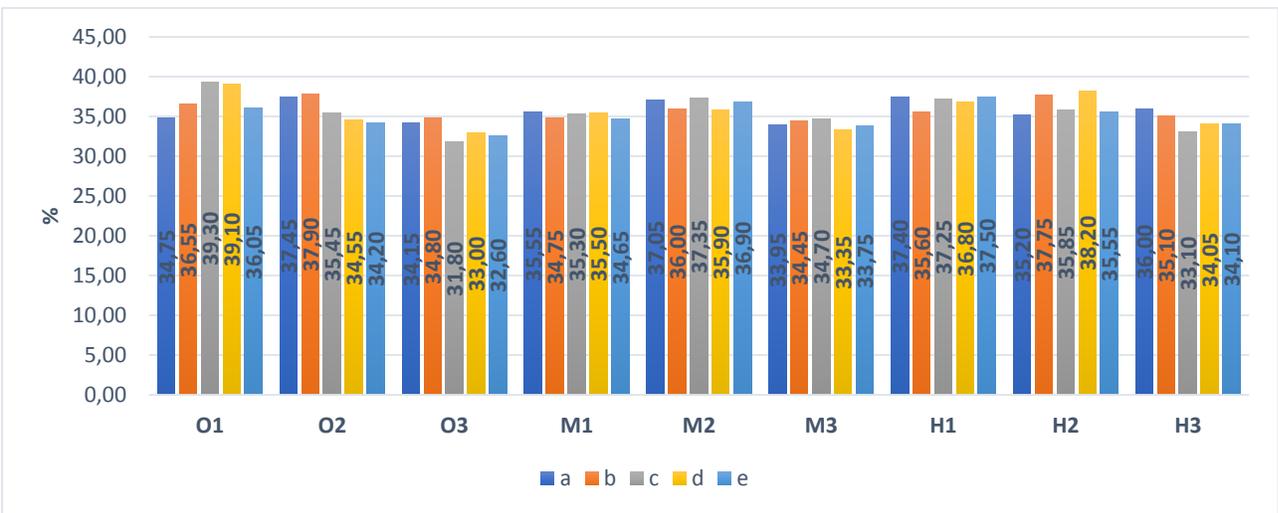


Figura 0.23 Representación gráfica de % de absorción

Fuente: Elaboración propia

4.10 Interpretación de resultados

Los resultados obtenidos fueron procesados con el objeto de comprender el comportamiento de las diferentes configuraciones de mezclas y de este modo determinar cuál dosificación genera ladrillos refractarios con capacidades y características óptimas y prevalientes.

- **Absorción de agua**

Tomando en cuenta el tipo de arcilla se pudo observar que la variante denominada arcilla Susudel, muestra menor absorción de agua, seguida por la arcilla de Tarqui que se encontraría en un rango intermedio de las dos. La de mayor absorción fue la arcilla de

Capillapamba. Para la variante del caolín se evidenció que su condición inicial, es decir, si esta se mezcla en su estado original o si es sometida a lavado (manual o hidrociclón), no es un factor influyente en la absorción de agua.

Las muestras O3, M3 y H3 presentaron menores niveles de absorción de agua. Si se saca el promedio de las cinco muestras por cada dosificación, la O1 fue la que tuvo mayores valores siendo el promedio de 37,15% mientras que la O3 su porcentaje de absorción fue el más bajo teniendo un valor de 33,27%

- **Contracción de muestras pos quema**

Se puede ver en los resultados que la variante de contracción antes y después, no fue un factor influyente lo que indica que tuvieron buena resistencia y existió una compactación adecuada en todas las muestras, de la misma forma la adherencia de las arcillas fue muy buena, ya que no hubo desintegración el momento de la quema. Hubo muestras que presentaron dilución al momento de someterlas a pruebas de absorción en agua.

- **Resistencia calorífica de acuerdo al porcentaje de absorción**

Durante el proceso de quema se observó que solamente las muestras O3, M3 y H3 mostraron un punto de vitrificación mínimo al llegar a los 1000 grados centígrados y aun mayor a 1300 grados centígrados, a diferencia de las otras que no presentaron ningún cambio en el momento de alcanzar la temperatura programada.

Se identificó que en el caso de utilizar el caolín Cumbe original sin ningún tipo de tratamiento, al mezclar con arcilla de Susudel la respuesta del material final es positiva, mientras que si se usa caolín Cumbe con el lavado manual se obtienen mejores repuestas al utilizar la arcilla de Tarqui. Esta última presentó mayor porcentaje de absorción y mejor comportamiento respecto a la temperatura.

Al utilizar el caolín Cumbe con el lavado por hidrociclón se tienen mejores propiedades al utilizar la arcilla de Tarqui, ya que respecto a las otras es la que presenta mayor absorción.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Realizadas las pruebas se puede concluir que las diferentes dosificaciones presentaron pequeñas reducciones en el volumen al estas ser sometidas a quema, se infiere que existe una alta resistencia a las condiciones de temperaturas expuestas en todas las muestras y sus diferentes dosificaciones.

En relación con la variación de volumen presentada por las muestras empleadas en el procedimiento experimental, los cambios identificados son una respuesta esperada, Gómez (2013) indica que el agua contenida en los poros o intergranular al ser sometida la pasta a condiciones de temperaturas elevadas sufre un proceso de secado afectando el volumen inicial. También, la eliminación de la fracción del agua por la cocción de la pasta, ocasiona la aparición de un mayor porcentaje de porosidad en las piezas o muestras. Esto se demostró al someter las piezas de ladrillo elaboradas al procesos de pruebas de absorción, en el cual se demostró la captación de un nivel de agua variado, siendo mayor en las muestras que fueron sometidas a las temperaturas más elevadas (1300 °C).

El proceso de conminución y tamizado es clave en desarrollo de los ladrillos refractarios, ya que partículas de mayor dimensión pueden originar espacio intersticiales que alteran la integridad de los ladrillos, en tal sentido se mostró que el aseguramiento de dimensiones de partículas homogéneas es favorable en el aseguramiento de la integridad de los ladrillos. Lo anterior está en línea con lo demostrado por Carrasco & Tinoco (2018) quienes precisaron que se optimiza la mezcla cuando se tiene una mejor reducción de los granos, facilitando la cohesión entre las diferentes materias primas y con este un mejor ladrillo. Vergara (2019) coincide también con la deducción obtenida, exponiendo que partículas más pequeñas aseguran una menor posibilidad de espacios entre los granos de materiales, facilitando la mezcla.

Las muestras presentan una reducción de masa que va desde el 1,7 % al 14% , una vez sometidas al proceso de quema, esto en parte está asociado a la deshidratación que sufren

al ser expuesta a altas temperaturas, no obstante resulta favorable el incremento de propiedades como la resistencia térmica. Los mayores niveles de disminución de masa se observaron en muestras en las que el caolín fue lavado por hidrociclón, de tal manera que se puede inferir que este proceso preliminar es favorable para la preparación de mezclas que pueden dar a origen a ladrillos refractarios con mayor resistencia térmica. Gómez (2013) justifica la variación de masa con la reducción del agua contenida en los espacios intersticiales, lo cual fue coincidente con los resultados del procedimiento experimental aplicado.

De acuerdo a las pruebas de quema y de resistencia a la temperatura, la arcilla Capillapamba de coloración rosada presentó menor resistencia viéndose vitrificada el momento de la quema pasado los 1000 °C y menor absorción de agua acercándose a su límite máximo de temperatura, esto tiene relación con las deducciones de Urbina (2015) quien menciona que un incremento de la temperatura disminuye la capacidad de absorción de los ladrillos, incidiendo en su tendencia a vitrificarse, también la temperatura de cocción determina la resistencia que puedan tener los ladrillos a la compresión e influyendo en su nivel de contracción.

Respecto a las arcillas Susudel y Tarqui presentaron alta resistencia a la temperatura y no presentaron cambios significativos al ser sometidas a las pruebas de quema, por lo que estas constituyen una opción como material base para generar ladrillos refractarios y con estos el desarrollo de hornos de mayor capacidad térmica.

Las mejores muestras de ladrillos no presentaron alteraciones de sus propiedades, estas estuvieron conformadas por las dosificaciones con arcilla Susudel, con base en esto, se destaca que la caracterización del ladrillo y su aplicabilidad en sistemas refractarios es evaluada tomando en cuenta la calidad y propiedades pos quema, es decir las consideraciones mecánicas y físicas. Es por ello, que las dosificaciones que presentaron mayor resistencia de temperatura, pueden someterse a temperaturas mayores a las del ensayo, es decir cercanas a los 2000 °C para de este modo contrastar la estabilidad física a estas condiciones.

Aun cuando se tuvo la limitante de no disponer de hornos con capacidad de quema superior a los 1300 °C si se pudo diferenciar diferentes propiedades en las muestras, identificándose en muchas buenas resistencias y nivel de absorción. Esto es respaldado por las deducciones de García, Solano, & Peñaloza (2018) quienes afirman que una arcilla que genera respuestas satisfactorias a condiciones entre 950°C y 1050°C, puede emplearse con diferentes funcionalidades, esta se ve de mayor aplicabilidad si sus valores de absorción de agua son adecuados.

Recomendaciones

Para la fabricación de ladrillos refractarios es necesario utilizar muestras con mayor porcentaje de absorción, dado que mientras mayor sea la absorción mayor será su resistencia a la temperatura. Las muestras estudiadas en especial las arcillas de Susudel y Tarqui al no llegar a su punto de vitrificación muestran una gran alternativa de importación o construcción local y se recomienda tomar énfasis en la arcilla M2 para la construcción de ladrillos refractarios o un horno cerámico.

No es necesario recurrir a materiales importados, tomando en cuenta que los materiales locales demostraron disponer características óptimas, por lo que al usarlos se reduce costo y se impulsa la economía local. Sin embargo, aun cuando los estudios técnicos dieron resultados positivos con respecto al uso de materia prima local, es importante complementar con un análisis económico que facilite contrastar no solo las ventajas de usar recursos locales para elaborar ladrillos refractarios sino la reducción de costos que estas pueden representar.

Como medida de control, que se aplicó en el procedimiento experimental, fue la de generar ladrillos a través de un molde estándar originando bloques de igual dimensión, esto permite que se disponga de un mejor manejo de variables como el volumen y facilitando la determinación de la contracción sufrida por los bloques. De tal manera, que se recomienda la adopción de este tipo de herramienta para asegurar que no existan factores que puedan incidir en los resultados.

Las respuestas presentadas por las diferentes configuraciones o mezclas de arcillas tuvieron respuestas satisfactorias, por lo que sería recomendable aplicar ensayos con otras mezclas para así determinar proporciones óptimas dependiendo del objetivo para el que se requieran y el tipo de temperatura al que serían expuestos. Esto permitiría dar utilidad a los materiales locales.

Tomando en cuenta la limitante de no disponer de un horno que permita el quemado de los bloques a temperaturas superiores a los 1300 °C, se recomienda ejecutar ensayos

científicos a condiciones cercanas a los 2000 °C, tomando en consideración las mismas dosificaciones aplicadas en la presente investigación y analizar sus propiedades físicas a estos niveles de temperatura. De esta forma se puede visualizar el nivel de vitrificación y resistencia térmica.

El uso de material local es viable, según los resultados de este estudio, de tal manera que se recomienda por parte de las autoridades el impulso de investigaciones para disponer de datos que faciliten el aprovechamiento de materiales de la localidad y promover su empleo por parte de las industrias que desarrollan ladrillos refractarios. Se sugiere que los resultados, sean tomados en cuentas por autoridades de la provincia y sean presentados empresas locales encargadas de desarrollar ladrillos refractarios, como alternativa para aprovechar los recursos o materias primas locales y desarrollar otras experimentaciones a condiciones superiores a la empleada en este estudio para de este modo demostrar las bondades de la arcilla de Susudel e impulsar a que las empresas migren al empleo de esta.

Además de los materiales locales usados en el procedimiento experimental de este estudio, se sugiere probar con otras materias primas locales que permitan robustecer las propiedades de las dosificaciones evaluadas de manera que no solo se aplique la arcilla de Susudel como elemento clave para la elaboración de ladrillos refractarios sino que se empleen otros insumos de la provincia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Askeland, D., Fulay, P., & Wright, W. (2011). *Ciencia e Ingeniería de materiales* (Sexta ed.). Ciudad de México: Cengage Learning.
- Beer, F., & Russell, J. (1993). *Mecánica de Materiales*. Ciudad de México, México: McGraw - Hill / Interamericana Editores S.A.
- Byars, E., & Snyder, R. (1978). *Mecánica de Cuerpos Deformables*. Nueva York, E.U.A.: Educational Publishers.
- Callister, W. (2020). *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales* (Vol. I). Reverté S.A.
- Carrasco, E., & Tinoco, D. (2018). *Elaboración de ladrillos ecológicos a partir de arena de sílice y arcillas mixtas procedentes de la Compañía Minera Sierra Central S.A.C. Chacapalpa/Oroya – Yauli - Junín*. (Tesis de Pregrado), Universidad Nacional del Centro Del Perú, Huancayo, Perú.
- Cuichán, A., & Llano, M. (2013). *Diseño y elaboración de ladrillo refractario (22x11x6cm) empleando materias primas nacionales, utilizados en la construcción, mantenimiento y reparaciones de hornos de crisol y cubilote*. (Tesis de Grado), Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador.
- Florez, E., Peña, C., & Laguado, R. (2015). Aplicación del método de la ecuación de Boltzmann en redes para la simulación bidimensional de un problema típico de mecánica de fluidos. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 1(25), 118-125.
- Fruendt, G. (1989). *Iniciación a la Química de los Plásticos*. Barcelona, España: Hanser.
- García, A. (2015). *Caracterización mecánica de materiales cerámicos mediante ensayos de factura estable*. (Tesis Doctoral), Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, España.
- García, R., Solano, E., & Peñaloza, C. (2018). Caracterización térmica de mezclas de arcillas utilizadas en la fabricación de productos de mampostería para la construcción. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 1(31), 22-30.
- Gere, J., & Goodno, B. (2009). *Mecánica de Materiales*. Buenos Aires, Argentina: Cengage Learning Editores, S.A.

- Gómez, C. (2013). *Estudio de propiedades de magnesia sinterizada adicionando nanopartículas de óxido de hierro (Fe_2O_3), óxido de aluminio (Al_2O_3) y óxido de silicio (SiO_2) para uso en ollas metalúrgicas secundarias*. (Tesis de Grado), Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León, México.
- Hibbeler, R. (2006). *Mecánica de Materiales*. Ciudad de México, México: Pearson Educación.
- Modernos, R. (1990). *Ciencia y Tecnología de los Materiales Plásticos*. Madrid, España: CSIC.
- Nebot, I. (2015). *Estructura y caracterización de compuestos tipo Espinela $MgAl_2O_4$, mediante rutas de síntesis no convencionales*. (Tesis Doctoral), Escuela Superior de Tecnologías y Ciencias Experimentales, Castellón, España.
- Nicolás, R. (2017). *Procesamiento y caracterización de materiales cerámicos refractarios del sistema $ZrO_2-CaO-MgO-SiO_2$* . (Tesis Doctoral), Universidad Nacional de la Plata, Buenos Aires, Argentina.
- Noa, F. (2019). *Determinación de fragmentación de mineral en voladura de tajeos aplicando la teoría de conminución de la unidad minera Untuca - Cori puno Sac*. (Tesis de Pregado), Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- Omega Engineering. (2020). *Termopar; ¿Qué es un sensor termopar?* Obtenido de Omega Engineering web site: <https://es.omega.com/prodinfo/termopares.html#:~:text=Un%20termopar%20es%20un%20sensor,est%C3%A1n%20com%C3%BAnmente%20disponibles%20como%20alambre>.
- Ordoñez, F. (2017). *Determinación de parámetros operacionales en un Hidrociclón Krebs para una separación óptima de arenas aluviales*. (Tesis de Pregrado), Universidad de Azuay, Cuenca, Ecuador.
- Parra, E. (2019). *Diseño y realización de ensayos de lanzamiento de bloques de roca a escala reducida para el estudio de la fragmentación por conminución*. (Tesis de Maestría), Universidad Politécnica de Cataluña, Cataluña, España.
- Salazar, J. (2007). *Resistencia de Materiales Basica Para Estudiantes de Ingeniería*. Muzales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

- Universidad Politécnica de Valencia. (2020). *Materiales Cerámicos para ingeniería*.
Obtenido de UPV web site:
https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm14/fcm14_3.html
- Urbina, C. (2015). *Influencia de la temperatura de cocción sobre la contracción, absorción y resistencia a la compresión en ladrillos de arcilla cocidos*. Universidad Nacional de Trujillo. Trujillo, Perú.
- Vergara, G. (2019). *Enriquecimiento de alúmina*. (Tesis de Pregado), Universidad del Azuay, Cuenca, Ecuador.
- Zapata, C. (2015). *Uso de la diatomita en la obtención de materiales refractarios como aislantes térmicos en los procesos industriales*. (Tesis de Grado), Universidad Nacional de Piura, Piura, Perú.
- Zumarán, D. (2017). *Evaluación de la influencia de las variables en la distribución granulométrica del producto de molienda por bolas de minerales mediante diseños experimentales*. (Tesis de Pregrado), Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú.

ANEXOS

Anexo 1 Motor estacionario de molino de bolas



Anexo 2 Factura de pruebas de quema

SAMO THERMAL Dir.: Av Medio Ejido s/n • Telf.: (07) 4189759 • Cel.: 0987523449
 E-mail: info@samothermal.com • Cuenca-Ecuador

DOCUMENTO CATEGORIZADO: NO
FACTURA
 R.U.C. 0104143292001 Aut.Nº 1126076661 SERIE 001-001 No. 0000495
 FECHA: 15/08/2020
 TELF: 0998461517
 FACT: 001-001-000000495

CI / RUC : SACOTO MOLINA ROBERTO ISMAEL
 CLIENTE: BAUTISTA CRISTIAN
 DIRECCION: JAIME ROLDOS Y JUAN LEON MERA

CODIGO	PRODUCTO	CANT	PRECIO	DESC	SUBTOTAL
TECPOS0004	QUEMA DE MUESTRAS	46.00 U	2,23	0,00	102,68

www.samothermal.com

SAMO THERMAL

SUBTOTAL : 102,68 BASE IMP : 102,68 SUBTOTAL 0%: 0,00
 DESCUENTO : 0,00 IVA 12 % : 12,32 TOTAL : \$ 115,00

FIRMA AUTORIZADA: *[Signature]* RECIBI LEGÍTIMO: *[Signature]*

FORMA DE PAGO: EFECTIVO: 115,00 TARJETA DE CRÉDITO / DÉBITO: 0,00 DINERO ELECTRÓNICO: 0,00 OTROS: 0,00

ZHAÑAY CASTRO VICENTE IVAN, PLANTA GRAFICA MONTERREY - 2840 701 • Av. 1807 - R.U.C. 01022010001 - No. 0000428 AL 000055 - 13-ENERO-2020 VALIDA HASTA 13-ENERO-2021 - Cuenca ORIGINAL BLANCO - COPIA PRENTE - COPIA BLANCO - IMPOR

Anexo 3 Silice utilizado para la limpieza de molino de bolas



Anexo 4 Tambor utilizado en el molino de bolas



Anexo 5 Envases utilizados para preparación y tratamiento de materiales



Anexo 6 Tanque de 55 Gl para recolección de arcilla Tarqui



Anexo 7 Posible horno de quema descartado temperatura máxima 800°C



Anexo 8 Material preparado O3 listo para adición de agua



Anexo 9 Muestra sumergida en agua O2a



Anexo 10 Horno utilizado para pruebas de quema



Anexo 11 Especificaciones del Horno utilizado para pruebas de quema



Anexo 12 Resumen de resultados de análisis químico

No. Muestra	Descripción	% Al ₂ O ₃	% SiO ₂
1	Material de cabeza	24.4	46.2
2	Material de cabeza mayor a malla #4 (M1)	26.8	50.8
3	Material de cabeza menor a malla #4 (M2)	24	52.9
LAVADO			
4	M1 - tamaño mayor a malla #40	32.5	43.5
5	M1 - tamaño menor a malla #40 y mayor que malla #100	25.4	45.4
6	M1 - tamaño menor a malla #100	26.3	49.9
7	M2 - tamaño mayor a malla #40	31.4	43.2
8	M2 - tamaño menor a malla #40 y mayor que malla #100	27.5	48.7
9	M2 - tamaño menor a malla #100	16.4	65.8
ESPIRAL			
	Salida 1		
10	M2 - tamaño mayor a malla #40	20.3	59.8
11	M2 - tamaño menor a malla #40 y mayor que malla #100	25.3	51.5
12	M2 - tamaño menor a malla #100	23.9	61.5
	Salida 2		
13	M2 - tamaño mayor a malla #40	31.9	42.7
14	M2 - tamaño menor a malla #40 y mayor que malla #100	28.7	44.3
15	M2 - tamaño menor a malla #100	23.1	57.1
	Salida 3		
16	M2 - tamaño mayor a malla #40	32.7	42
17	M2 - tamaño menor a malla #40 y mayor que malla #100	30.1	48.1
18	M2 - tamaño menor a malla #100	24.2	56.8
HIDROCICLÓN			
	Descarga		
19	M2 - tamaño mayor a malla #40	31.4	39.9
20	M2 - tamaño menor a malla #40 y mayor que malla #100	27.5	43.8
21	M2 - tamaño menor a malla #100	25.2	51
	Rebose		
22	M2 - tamaño mayor que malla #100	26.4	50.2
23	M2 - tamaño menor a malla #100	22	58.7