



**BENÉMERITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
PUEBLA**

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“APROVECHAMIENTOS DE LOS RESIDUOS DE LA
INDUSTRIA CERÁMICA SANITARIA PARA LA
FABRICACIÓN DE LOSETAS CERÁMICAS”**

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**LICENCIADO EN INGENIERIA EN
MATERIALES**

P R E S E N T A:

MARIAN LOZADA MELLADO



**DIRECTOR DE TESIS:
DR. HERIBERTO HERNÁNDEZ COCOLETZI**

**CO-DIRECTOR DE TESIS:
DR. EFRAÍN RUBIO ROSAS**

DICIEMBRE 2022



BUAP

"HUP, 50 años de enseñanza y salud"

Oficio No. FIQ/AC/141/2022
Asunto: Registro de Tema de Tesis

C. MARIAN LOZADA MELLADO
PASANTE DE LA LICENCIATURA EN
INGENIERÍA EN MATERIALES
P R E S E N T E:

Por medio del presente me permito informarle, de la aprobación del Registro de Tema de Tesis de la Licenciatura en Ingeniería en Materiales cuyo título es el siguiente:

"APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS DE LA INDUSTRIA CERÁMICA SANITARIA PARA LA FABRICACIÓN DE LOSETAS CERÁMICAS"

Con el siguiente contenido:

INTRODUCCIÓN


CAPÍTULO 1	ANTECEDENTES
CAPÍTULO 2	METODOLOGÍA
CAPÍTULO 3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CONCLUSIONES
BIBLIOGRAFÍA

Director de Tesis: Dr. Heriberto Hernández Coccoletzi
Co- Director: Dr. Efraín Rubio Rosas

Lo cual me permito comunicarle para su conocimiento y fines consiguientes aclarando que la vigencia de este tema será **UNICAMENTE POR UN AÑO**

Atentamente
"Pensar Bien, Para Vivir Mejor"
H. Puebla de Z., a 26 de abril de 2022


Dra. Valeria Jordana González Coronel
Secretaría Académica

C.c.p. Director de Tesis: Dr. Heriberto Hernández Coccoletzi.
C.c.p. Co- Director: Dr. Efraín Rubio Rosas.
C.c.p. Archivo

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo está dedicado a mis padres Mariela y Miguel por siempre apoyarme en cada paso de la carrera universitaria y a lo largo de mi vida. A mis hermanos Monserrat, Mariel y Miguel por todos sus consejos y apoyo incondicional.

Gracias a mis amigos de universidad Selene, Ana, Migue y Liliana por permitirme crecer junto a ustedes y regalarme muchos momentos inolvidables sin ustedes nada sería igual. Asimismo, agradezco a Edwin por siempre creer en mí y motivarme en todo momento.

Agradezco a nuestros docentes de la Carrera, por haber compartido sus conocimientos a lo largo de la preparación de nuestra profesión, de manera especial a el Dr. Humberto y a la Mtra. Carolina por su tiempo y dedicación a lo largo de la carrera, a mi director de tesis el Dr. Heriberto y el co-director Dr. Efraín quienes con su dirección, conocimiento, enseñanza y colaboración permitió el desarrollo de este trabajo. Finalmente quiero expresar mi más grande y sincero agradecimiento a la fábrica Trend Ceramic y a sus trabajadores por apoyarme en todo momento en este trabajo gracias Dr. Jesús, Ing. Gerardo y Leonel por sus consejos y por su valioso aporte en esta investigación. Todos en conjunto me hicieron ver, que sin importar cuanto tiempo me tome, todo se puede si de verdad se quiere.

¡Gracias de todo corazón!

ÍNDICE

RESÚMEN.....	6
INTRODUCCIÓN	10
OBJETIVO GENERAL.....	11
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES	12
1.1 ESTADO DEL ARTE.....	12
1.2 CLASIFICACIÓN DE MATERIALES.....	13
1.3 MATERIALES CERAMICOS.....	13
1.4 CERÁMICOS TRADICIONALES.....	14
1.5 PRODUCTOS DE ARCILLA.....	14
1.6 PROCESOS DE CONFORMACIÓN DE PRODUCTOS CERÁMICOS.....	15
1.6.1 Prensado.....	15
1.6.2 Colado	16
1.6.3 Extrusión.....	16
1.7 SECADO.....	16
1.8 SINTERIZADO.....	17
1.9 INDUSTRIA CERÁMICA.....	18
1.10 CERÁMICA SANITARIA.....	19
1.10.1 Proceso de fabricación.....	19
1.11 LOSETAS CERAMICAS.....	21

1.11.2 Clasificación según normativa.....	22
1.11.3 Tipos de baldosas cerámicas.....	23
1.11.4 Proceso de fabricación.....	23
1.12 RESIDUOS EN LA INDUSTRIA CERÁMICA SANITARIA.....	¡Error! Marcador no definido.
CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA.....	28
2.1 Recolección, preparación y caracterización de residuos.....	28
2.2 Elaboración de las losetas.....	29
2.3 Pruebas realizadas a las losetas.....	30
CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	35
3.1 Granulometría con hidrómetro.....	35
3.2 Medidas de las desviaciones dimensionales.....	39
3.2.1 Medidas de longitud y grosor de las losetas.....	39
3.3 Contracciones.....	45
3.4 Absorción de agua, densidad aparente, porosidad aparente y gravedad específica aparente.....	48
3.5 Resistencia a la rotura de losetas cerámicas.....	52
3.6 Método de prueba estándar para la determinación del índice de rebote.....	55
CONCLUSIONES.....	57
BIBLIOGRAFÍA.....	58

Lista de tablas

Tabla 1.1. Grupos normalizados de baldosas cerámicas.....	22
Tabla 1.2. Tipos de baldosas cerámicas.....	22
Tabla 2.1 Especificaciones del molino de bolas.....	28
Tabla 3.1 Correcciones experimentales de la barbotina.....	35
Tabla 3.2 Correcciones experimentales de las piezas defectuosas	35
Tabla 3.3 Resultados granulométricos de la Barbotina contaminada.....	37
Tabla 3.4 Resultados granulométricos de las piezas defectuosas.....	37
Tabla 3.5 Longitud de cada lado de las baldosas con concentración de 100% barbotina contaminada.....	39
Tabla 3.6 Longitud de cada lado de las baldosas con concentración de 80% barbotina contaminada y 20% pieza defectuosa.....	40
Tabla 3.7 Longitud de cada lado de las baldosas con concentración 60% barbotina contaminada y 40% piezas defectuosas.....	40
Tabla 3.8 Longitud de cada lado de las baldosas con concentración 40% barbotina contaminada y 60% piezas defectuosas.....	41
Tabla 3.9 Longitud de cada lado de las baldosas con concentración 20% barbotina contaminada y 80% piezas defectuosas.....	41
Tabla 3.10 Longitud de cada lado de las baldosas con concentración 100% piezas defectuosas	42
Tabla 3.11 Grosor de 4 puntos de las baldosas con concentración 100% barbotina contaminada.....	42
Tabla 3.12 Grosor de 4 puntos de las baldosas con concentración 80% barbotina contaminada 20% piezas defectuosas.....	43
Tabla 3.13. Grosor de 4 puntos de las baldosas con concentración 60% barbotina contaminada 40% piezas defectuosas.....	43
Tabla 3.14 Grosor de 4 puntos de las baldosas con concentración 40% barbotina contaminada 60% piezas defectuosas.....	44
Tabla 3.15 Grosor de 4 puntos de las baldosas con concentración 20% barbotina contaminada 80% piezas defectuosas.....	44
Tabla 3.16.- Grosor de 4 puntos de las baldosas con concentración 100% piezas defectuosas.....	45

Tabla 3.17.- Retracciones de tres diferentes losetas con composición 100% barbotina contaminada.....	46
Tabla 3.18.- Retracciones lineales de tres diferentes losetas con composición 80% barbotina contaminada y 20% piezas defectuosas.....	46
Tabla 3.19.- Retracciones lineales de tres diferentes losetas con composición 60% barbotina contaminada y 40% piezas defectuosas.....	46
Tabla 3.20.- Retracciones lineales de tres diferentes losetas con composición 40% barbotina contaminada y 60% piezas defectuosas.....	46
Tabla 3.21.- Retracciones lineales de tres diferentes losetas con composición 20% barbotina contaminada y 80% piezas defectuosas.....	47
Tabla 3.22.- Retracciones lineales de tres diferentes losetas con composición 100% piezas defectuosas.....	47
Tabla 3.23 Absorción de agua y porosidad para losetas con concentración de 100% barbotina contaminada.....	49
Tabla 3.24 Absorción de agua y porosidad para losetas con concentración de 80% barbotina contaminada y 20% piezas defectuosas.....	50
Tabla 3.25 Absorción de agua y porosidad para losetas con concentración de 60% barbotina contaminada y 40% piezas defectuosas.....	50
Tabla 3.26 Absorción de agua y porosidad para losetas con concentración de 40% barbotina contaminada y 60% piezas defectuosas.....	50
Tabla 3.27 Absorción de agua y porosidad para losetas con concentración de 20% barbotina contaminada y 80% piezas defectuosas.....	51
Tabla 3.28 Absorción de agua y porosidad para losetas con concentración de 100% piezas defectuosas.....	51
Tabla 3.29 Especificaciones para azulejos.....	52
Tabla 3.30 Resistencia a la rotura para losetas con concentraciones de 100% de barbotina contaminada.....	53
Tabla 3.31 Resistencia a la rotura para losetas con concentraciones de 80% de barbotina contaminada y 20% de piezas defectuosas.....	53
Tabla 3.32 Resistencia a la rotura para losetas con concentraciones de 60% de barbotina contaminada y 40% de piezas defectuosas.....	53
Tabla 3.33 Resistencia a la rotura para losetas con concentraciones de 40% de barbotina contaminada y 60% de piezas defectuosas.....	53

Tabla 3.34 Resistencia a la rotura para losetas con concentraciones de 20% de barbotina contaminada y 80% de piezas defectuosas.....	54
Tabla 3.35 Resistencia a la rotura para losetas con concentraciones de 100% de piezas defectuosas.....	54
Tabla 3.36 Especificaciones de carga para azulejos.....	54
Tabla 3.37 Especificaciones para pavimento de gres o pavimentos cerámicos.....	54
Tabla 3.38 Índice de rebote para los diferentes lotes de losetas.....	55
Lista de figuras	
Figura 1. Ejemplo de conformado por medio de prensado.....	16
Figura 1.2. Ejemplo de conformado por medio de vaciado o colado.....	12
Figura 1.3 Ejemplo de conformado por medio de extrusión.....	17
Figura 1.4 Cambio de volumen de un cuerpo cerámico al eliminar la humedad durante el secado.....	17
Figura 1.5 Ciclos de calentamiento seguidos para el sinterizado de piezas cerámicas.....	17
Figura 1.6 Ejemplos de productos de industrias cerámicas a) ladrillos y tejas b) Refractarios c) baldosas d) abrasivos e) cerámica sanitaria.....	18
Figura 1.7 Ejemplos de productos de industrias cerámicas sanitarias.....	19
Figura.1.8 Ejemplos de tipos de baldosas cerámicas a) Baldosas para paredes interiores b) Baldosas para pisos interiores c) baldosas para pisos exteriores.....	23
Figura.1.9 Esquema general de un proceso de producción de baldosas cerámicas.....	25
Figura 1.10 Residuos de la industria cerámica sanitaria	
a) Barbotina contaminada seca, b) barbotina contaminada en el proceso de vaciado c) barbotina contaminada acumulada d) piezas defectuosas desechadas.....	27
Figura 2.1.- Diagrama de la norma ASTM D422-63.....	30
Figura 2.2.- a) Medidas y especificaciones del soporte, b) Medidas y especificaciones del aplicador de fuerza.....	32
Figura 3.1.- Curva granulométrica de la barbotina contaminada.....	34
Figura 3.2.- Curva granulométrica de las piezas defectuosas.....	38
Figura 3.3 Muestras de losetas utilizadas con diferentes concentraciones.....	56

RESÚMEN

Existe un exceso de residuos generados en la industria cerámica sanitaria las cuales destacan barbotina contaminada y piezas rotas o defectuosas estas mismas ocasionan contaminación en el suelo y perdidas de espacio por lo que es importante reutilizar estos residuos. En este trabajo se propuso la elaboración de losetas o azulejos a partir de estos residuos variando la composición obteniendo 6 diferentes porcentajes de los residuos, sinterizadas a 1075°C.

Las losetas sinterizadas fueron caracterizadas mediante evaluaciones físicas, dimensionales y calidad de superficie que incluyen densidad, porosidad, absorción de humedad, grosor, longitud y contracciones. Además, se realizaron las evaluaciones mecánicas por medio de ensayos de resistencia a la rotura e índice de rebote de acuerdo con los estándares de la ASTM. Al igual se realizó un análisis granulométrico del tamaño de partícula de ambos residuos utilizados para la fabricación de las losetas.

Los resultados obtenidos indican que es viable realizar azulejos con este tipo de residuos destacando que las losetas elaboradas con 80% piezas defectuosas, 20% barbotina contaminada y 60% piezas defectuosas, 40% barbotina contaminada mostraron las mejores propiedades físicas y mecánicas.

INTRODUCCIÓN

La industria que se dedica a la cerámica sanitaria, como muchas otras industrias, contribuye a la contaminación del medio ambiente. Los gases generados durante sus procesos, así como los residuos sólidos producidos son ejemplos de esos medios de contaminación. Entre los diversos residuos generados en esta industria, los de mayor relevancia son los lodos compuestos de barbotina que caen al suelo y se contaminan con sales, la cerámica rota y las piezas defectuosas sin arreglo, el barro contaminado, los moldes de yeso en mal estado y residuos sólidos, además de polvo y ceniza, Salvador (2015). Todos estos residuos traen consigo diversos problemas pues algunos de ellos son considerados residuos peligrosos. Muchos de estos residuos son acumulados en el suelo; su acumulación ha llegado a tal grado que genera una pérdida significativa de espacio, además de contaminar el suelo. Parte de estos residuos contienen partículas volátiles que suelen dispersarse en los alrededores, ocasionando daños a los seres vivos, incluidos los trabajadores de esa industria. Hasta ahora se ha propuesto el uso de cerámica sanitaria residual ya cocida en la formulación de hormigón y adoquines, Tarhan et al. (2017), El- Fadaly, (2015); también se ha incorporado en la elaboración de baldosas, Salvador, (2015), Medina et al. (2012). Sin embargo, no se han dedicado esfuerzos en la posible mitigación del resto de los residuos y así evitar la contaminación que originan.

Los residuos que mayormente se generan en la industria cerámica sanitaria son, la barbotina contaminada y las piezas cocidas de rechazo. Una parte de estos podría ser reutilizada para la fabricación de nuevas piezas cerámicas como losetas y azulejos. Con la elaboración de estos productos se lograría una disminución de residuos y consecuentemente, de la contaminación del medio ambiente. De igual forma, el espacio que ocupan podría ser empleado para cubrir alguna otra necesidad.

Las losetas cerámicas están hechas de materias primas como arcilla, caolín, cuarzo y feldespato; requieren de grandes cantidades de materia por lo que su costo final es alto. La elaboración de losetas y azulejos con residuos industriales tendría un costo menor que al utilizar materia prima virgen; este hecho propiciaría una reducción en

el precio de venta al público y, por consiguiente, una mayor cantidad de población tendría acceso a este producto mejorando las condiciones de sus viviendas. Este trabajo tiene como objetivo utilizar dos tipos de desechos generados en la industria cerámica sanitaria; los lodos contaminados y las piezas ya cocidas con algún defecto irreparable. Se propone elaborar losetas con estos residuos.

OBJETIVO GENERAL

Elaborar losetas utilizando barbotina contaminada y cerámica rota de la industria cerámica sanitaria.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recolectar barbotina contaminada y cerámica rota de la industria cerámica sanitaria.
- Analizar la barbotina y la cerámica rota.
- Preparar pasta a partir de estos residuos con la consistencia adecuada para elaborar losetas.
- Elaborar losetas de diferentes tamaños y proporciones de barbotina contaminada y cerámica rota.
- Evaluar la absorción de agua y la resistencia a la flexión de las losetas elaboradas.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

1.1 ESTADO DEL ARTE

El-Fadaly, (2013) propuso reciclar residuos cerámicos cocidos incorporándolos en la producción de baldosas de gres para sustituir el feldespatos. Su trabajo fue realizado a nivel laboratorio utilizando cinco formulaciones. Las baldosas obtenidas mejoraron la densidad aparente, el módulo de ruptura y la resistencia a la abrasión profunda, respecto de un estándar; la coloración de las muestras fue aceptable. Con esto mostró que los residuos cerámicos cocidos pueden incorporarse en la producción de baldosas de gres porcelánico como solución económica, tecnológica y ambientalmente correcta, manteniendo los estándares permitidos. También se ha propuesto un nuevo modelo de producción de hormigón de ultra-alta resistencia utilizando un residuo cerámico sanitario de postproducción, Zegardło et al. (2016). El agregado cerámico reciclado es apto para la fabricación de concreto cuya resistencia a la compresión es mayor que 120 MPa. Además, el hormigón que contiene árido cerámico reciclado tiene una resistencia a la compresión 24,74 % y a la tracción 34,25 %, superior que el hormigón con árido de grava y basalto. También se ha mostrado que el uso de desechos de cerámica sanitaria en lugar de feldespatos, da como resultado un aumento en la contracción de cocción y una disminución en la resistencia a la flexión; mientras que el uso de desechos de cerámica sanitaria en lugar de pegmatita da como resultado una mayor resistencia a la flexión y coeficientes de expansión térmica reducidos, Tarhan et al. (2016). Más recientemente se ha propuesto la reutilización de residuos cerámicos como aditivo puzolánico con resultados favorables, Pitarch et al. (2020); esta propuesta promueve la reducción del consumo de recursos naturales y energía, además de una reducción de las emisiones de CO₂ asociadas a la producción de cemento Portland (PC).

1.2 CLASIFICACIÓN DE MATERIALES

Los materiales sólidos se clasifican en tres grupos: metales, cerámicas y polímeros. Esta clasificación obedece a sus propiedades, a su composición química y a su estructura atómica. Adicionalmente existen los materiales técnicos: materiales compuestos (composite) y semiconductores; estos últimos son importantes por sus extraordinarias características eléctricas (Callister y Rethwisch, 2018).

1.3 MATERIALES CERAMICOS

Los materiales cerámicos contienen fases compuestas de elementos metálicos y no metálicos. Estas fases pueden ser vidrios, arcillas y refractarios, entre otros. En general, los compuestos cerámicos son más estables en ambientes químicos y térmicos que sus componentes, (Rocha, 2005); sus propiedades dependen del tipo de enlace que tengan. Algunas de sus características más sobresalientes son, (Askeland,1998):

- Duros
- Frágiles
- Baja tenacidad y ductilidad
- Buenos aislantes eléctricos y térmicos
- Temperaturas de fusión relativamente altas
- Estabilidad química relativamente alta
- Resistencia a la compresión

Debido a estas propiedades, los materiales cerámicos tienen una gran variedad de aplicaciones y usos en la industria. Dependiendo de sus propiedades, de la forma de procesamiento y del uso final que se le dará, se clasifican en cerámicos tradicionales y cerámicos avanzados, Téllez (2019).

Los cerámicos tradicionales normalmente están constituidos por tres elementos básicos arcillas, sílice y feldespato. Muchos de estos cerámicos los podemos encontrar como tejas, azulejos, ladrillos, vajillas, muebles de baño, o incluso como piezas decorativas para interiores o exteriores, (Smith et al, 2006).

En cambio, la cerámica avanzada incluye cerámica para eléctricos, aplicaciones

magnéticas, electrónicas y ópticas (a veces referidas como cerámica funcional), cerámica para aplicaciones estructurales en ambiente como elevada temperatura (cerámica estructural), Téllez (2019). El proceso de fabricación de las cerámicas avanzadas está sujeto a un control más preciso, por lo que se necesita de tecnología más sofisticada; esto da como resultado final una cerámica con mejores propiedades que los cerámicos tradicionales.

Muchos materiales cerámicos también pueden clasificarse, según sus aplicaciones, en uno de los grupos siguientes: vidrios, productos estructurales de arcilla, porcelanas, refractarios, abrasivos, cementos y cerámicas avanzadas de reciente desarrollo (Callister y Rethwisch, 2018).

1.4 CERÁMICOS TRADICIONALES

Los cerámicos tradicionales se pueden definir como aquellos que tienen como base a los silicatos, principalmente los materiales arcillosos, los cementos y los vidrios, (Kingery et al., 1996). Entre las cerámicas tradicionales podemos encontrar los artículos de vidrio, instrumentos de cocina o artículos decorativos. Otro grupo de cerámicos tradicionales son los productos de construcción; dentro de este grupo se encuentran los productos de cal y cemento, la loza y la porcelana, entre otros. Un tercer grupo corresponde a los productos estructurales de arcilla que consisten principalmente en ladrillos y tejas. La cerámica tradicional es principalmente trabajada en las industrias de la porcelana, de los sanitarios, y de la cerámica estructural (ladrillos, bovedillas, tejas, adoquines).

1.5 PRODUCTOS DE ARCILLA

Uno de los materiales más utilizados es la arcilla. Este ingrediente es accesible por el precio y porque se puede encontrar de forma natural en gran abundancia. Otra razón de su popularidad es la facilidad con que los productos de la arcilla pueden conformarse, ya que al agregarle agua en cantidades adecuadas es moldeable; esto favorece la elaboración de objetos con relativa facilidad y sencillez. Los minerales de arcilla desempeñan dos papeles fundamentales en las piezas cerámicas: se hacen muy plásticos y funden en un amplio intervalo de temperaturas. Las arcillas son aluminosilicatos, formados por alúmina (Al_2O_3) y sílice (SiO_2), que contienen

agua enlazada químicamente. Tal como cabría esperar, los cambios que tienen lugar durante los procesos de secado y cocción, además de las características de la pieza final, están determinados por las proporciones de estos tres constituyentes: arcilla, cuarzo y fundente. Una porcelana típica puede contener aproximadamente 50% de arcilla, 25% de cuarzo y 25% de feldespato (Callister y Rethwisch, 2018).

1.6 PROCESOS DE CONFORMACIÓN DE PRODUCTOS CERAMICOS

1.6.1 Prensado

El prensado es la compactación y conformado simultáneos de un polvo cerámico o material granular y se lleva a cabo confinando el material en un molde rígido o flexible y aplicando una presión elevada para lograr la compactación como se muestra en la Figura 1.

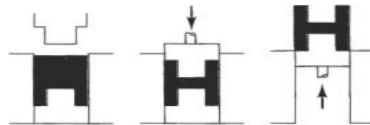


Figura 1. Ejemplo de conformado por medio de prensado

1.6.2 Colado

El moldeo por colado es una técnica que consiste en verter una barbotina líquida dentro de un molde poroso como se muestra en la Figura 1.2. En este molde se realiza un fenómeno de intercambio electrolítico (osmosis); como consecuencia el agua y los materiales solubles pasan a la escayola, dejando una capa de arcilla en estado sólido.



Figura 1.2. Ejemplo de conformado por medio de vaciado o colado

1.6.3 Extrusión

La extrusión es un proceso utilizado para crear objetos con sección transversal definida y fija. El material se empuja a través de un troquel de una sección transversal deseada como se explica en la Figura 1.3. Las piezas finales se forman con una terminación superficial de alta calidad (Roa y Paredes, 2017).

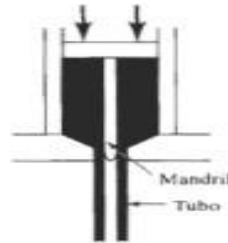


Figura 1.3 Ejemplo de conformado por medio de extrusión

1.7 SECADO

El secado consiste en la eliminación del agua que se ha utilizado para efectuar el moldeo de la pieza cerámica. En la Figura 4 se observa un diagrama de como ocurre el cambio de volumen de un cuerpo cerámico al eliminar la humedad. Si se lleva un buen control en el proceso de secado se garantizarán buenos resultados en las piezas, facilitándose los procesos consecutivos. El secado puede ser natural o artificial. El primero se lleva a cabo en zonas muy secas pero soleadas. El tiempo de secado depende de diversos factores, el más importante es el clima. En el secado artificial los productos conformados se introducen en el secadero con humedad del orden de 20%, con temperatura en el intervalo 100-140°C; el calor suele provenir de diferentes orígenes. En el interior de los secadores se hace circular aire. La eliminación del agua se lleva a cabo transmitiendo superficialmente a las piezas aire caliente con cierta cantidad de humedad, esto permite evitar choques térmicos que dañen a la pieza provocando grietas (Díaz, 2014).

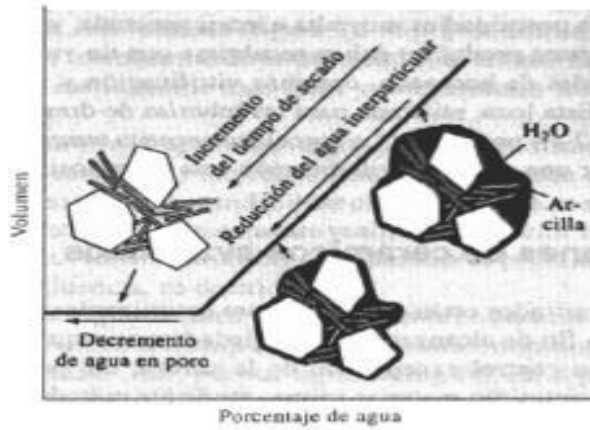


Figura 1.4 Cambio de volumen de un cuerpo cerámico al eliminar la humedad durante el secado.

1.8 SINTERIZADO

El sinterizado esencialmente es la remoción de los poros que se encuentran entre las partículas iniciales (esto casi siempre viene acompañado de un encogimiento del componente), combinado con el crecimiento unido a un fuerte enlace entre las partículas adyacentes (Rocha, 2005).

La característica común de todos los procesos de sinterización implica el uso de altas temperaturas. En general, las temperaturas normales de sinterización de cerámica van desde 1000 °C hasta más de 2000 °C (Kuang et al. 1997). En la Figura 1.5 podemos observar diversos ciclos de calentamiento para el sinterizado de piezas cerámicas conforme a el tiempo

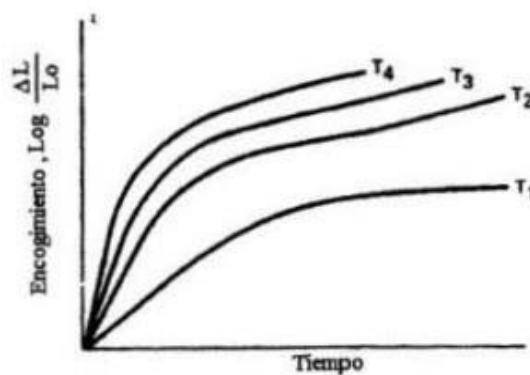


Figura 1.5 Ciclos de calentamiento seguidos para el sinterizado de piezas cerámicas

1.9 INDUSTRIA CERÁMICA

La industria cerámica juega un papel importante en el mundo, principalmente debido a las propiedades físicas y químicas de los materiales utilizados, Kingery et al, (2019). A su vez, esta incide en industrias como la metalúrgica, la de máquinas y herramientas, la automotriz, la eléctrica y la electrónica, así como la de construcción.

Los materiales cerámicos están dirigidos a distintos tipos de consumidores; así, se pueden distinguir dos clasificaciones: la industria cerámica como tal y el sector de las artes cerámicas. La diferencia entre ellas es la forma de producción y elaboración, así como su coloración y presentación final. Enric Mestre, ceramista dice que: “El arte de la cerámica es manejar el barro para transformarlo en ideas y en expresión que el artista quiere que tenga su obra. La magia es transformar un material simple, sencillo en algo imperecedero. La cerámica artística es creada con fines estéticos y decorativos todo elaborado artesanalmente como podrían ser jarrones, platos, tazas, vasos, murales y azulejos. A diferencia de la cerámica artística el proceso productivo, las materias primas, el coste, la calidad de la maquinaria utilizada, la cualificación de los trabajadores y la tecnología empleada es lo que la caracteriza a la cerámica industrial, Martínez (2019). La industria cerámica se divide en un total de 9 sectores, de acuerdo al tipo de cerámicos que fabrican, Díaz (2014):

- Abrasivos
- Ladrillos y tejas
- Refractarios
- Cerámica técnica
- Azulejos y pavimento
- Colectores
- Sanitarios
- Porcelana
- Vajillas

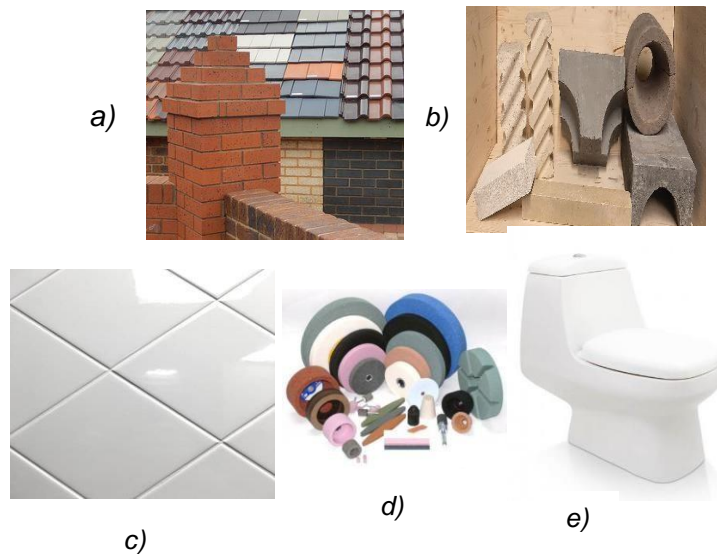


Figura 1.6 Ejemplos de productos de industrias cerámicas a)ladrillos y tejas b) Refractarios c) baldosas d) abrasivos e)cerámica sanitaria

1.10 CERÁMICA SANITARIA

La industria cerámica sanitaria incluye principalmente lavabos, bidés, inodoros, urinarios, tanques y platos de ducha como se muestra en la Figura 1.7. Las materias primas correspondientes son caolín, arcilla, cuarzo, feldespato y carbonato cálcico. Una carga típica consta de 40-50% de caolín y arcilla, 20-30% de cuarzo, 20-30% de feldespato y 0-3% de carbonato cálcico (Camacho, 2011).



Figura 1.7 Ejemplos de productos de industrias cerámicas sanitarias

Roca (2011) propone una guía para la elaboración de cerámica sanitaria la cual se puede resumir de la siguiente manera.

1.10.1 Proceso de fabricación

1.10.1.1 Descarga de materias primas

Las materias primas minerales (arcilla, caolín, feldespato y sílice) se descargan desde camiones en las zonas habilitadas para tal efecto.

1.10.1.2 Preparación de la barbotina

Las materias primas son conducidas hacia el tanque agitador, en cuyo interior son mezcladas con agua. La mezcla resultante es tamizada y bombeada hacia los depósitos de almacenamiento, manteniéndose en suspensión con la ayuda de agitadores. La pasta que resulta de esta operación es conocida con el nombre de barbotina.

1.10.1.3 Colado

Una vez obtenida la calidad de la mezcla deseada, de la que se evalúa su viscosidad y su densidad, la pasta es bombeada hacia los tanques de colado situados en alto. Desde allí, las líneas de colado de piezas se alimentan por gravedad con esta pasta, la cual es inyectada en el interior de moldes de yeso cerrados herméticamente, en los que tiene lugar la formación de la pieza. Los moldes de yeso utilizados son producidos en la misma planta mediante un CNC, donde se programan las dimensiones y son fabricados mediante el llenado de una mezcla de yeso y agua en el interior de unas matrices. Tras su fraguado, se separan las matrices y se extraen los moldes de yeso, que son transportados a los secaderos para proceder a su primera deshidratación previa a su utilización.

1.10.1.4 Desmolde

Una vez que la pieza ha adquirido consistencia mecánica dentro del molde de yeso, se lleva a cabo su desmolde de forma manual o automática, dependiendo de la línea o de la dificultad de ésta. La pieza es colocada en carros y transportada hacia los diferentes secaderos de piezas, donde se realiza su secado con aire caliente. Una vez seca, se transporta de nuevo mediante carros, esta vez hacia la línea de pulido y esmaltado.

1.10.1.5 Pulido y esmaltado

Se inspecciona el barro en crudo para posteriormente pulir las piezas eliminando defectos superficiales y se limpia la superficie de polvo y partículas extrañas. El esmalte se aplica a la superficie del barro mediante pulverización, efectuada por robots y manualmente. El espesor del esmalte se sitúa entre 0,3 y 0,5 mm, según el color del cuerpo y la proporción de opacificantes en el esmalte (Camacho, 2011).

1.10.1.6 Cocción

Las piezas ya esmaltadas son transportadas hacia la zona de hornos para su posterior cocción a temperaturas entre 1250 y 1290 °C en una atmósfera oxidante (Camacho, 2011). En el interior del horno se produce el proceso de calentamiento, cocción hasta la vitrificación del esmalte y enfriamiento.

1.10.1.7 Inspección y control

Las piezas salidas de los hornos son enviadas a la zona de inspección y control, en la que se separan las defectuosas de las conformes. Aquellas que superan el control final son embaladas y paletizadas para su transporte al almacén de expedición. El

ciclo completo para la fabricación de las piezas sanitarias tiene una duración aproximada de entre dos y tres días (Roca, 2018).

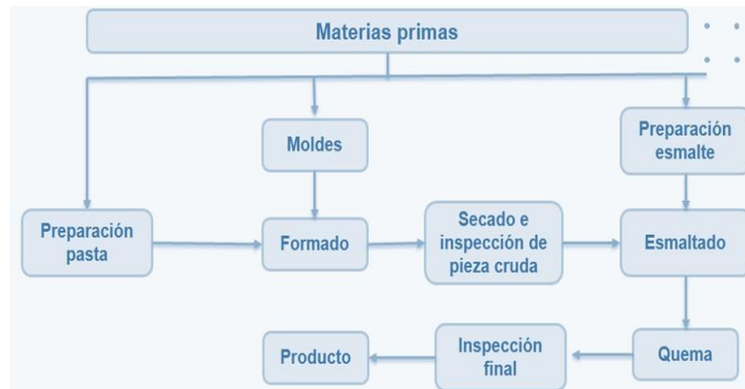


Diagrama.1.- Esquema general de un proceso de producción de cerámica sanitaria

1.11 LOSETAS CERAMICAS

Gopi (2019) define a las losetas como baldosas o ladrillos delgados que se queman en hornos. Se pueden clasificar en dos tipos, las que se utilizan para pavimentar pisos y techos o las que se utilizan con fines decorativos en pisos, paredes y techos.

Las baldosas suelen ser cuadradas y rectangulares; sin embargo, dependiendo del uso decorativo o funcional, las baldosas pueden adoptar otras formas poligonales y asimétricas. En cuanto al tamaño pueden variar tanto los lados como el grosor; por ejemplos, los lados de los mosaicos son de unos pocos centímetros y las losas son de 60-100 cm. El grosor de una baldosa puede ser de sólo 5 mm (azulejos) a más de 25 mm. Hay muchos tipos de baldosas de cerámica disponibles en el mercado: formadas por prensado en seco o extrusión; con cuerpos porosos, compactos o vitrificados; con cuerpos blancos o de color (rojizos); esmaltadas o sin esmaltar (Camacho, 2011).

1.11.1 USO DEL PRODUCTO

Existe una amplia gama de losetas que se diferencian no solo en el formato y dimensiones, aspectos superficiales, color y diseño de la superficie como se muestra en la figura 1.9, sino también en las características físicas y químicas

(Navarro, 1997) como se muestran en la figura 1.9. Por lo que al elegir el tipo de baldosa a utilizar se debe considerar el uso que se le dará y el lugar donde se utilizará, ya que las propiedades que debe tener la pieza dependen de esos 2 factores. Navarro (1997) establece los usos de estos productos cerámicos de la siguiente manera:

- Baldosas cerámicas para paredes de interiores.
- Baldosas cerámicas para paredes exteriores.
- Baldosas cerámicas para suelos interiores de locales residenciales.
- Baldosas cerámicas para suelos exteriores de locales residenciales.
- Baldosas cerámicas para suelos de locales comerciales o colectivos.
- Baldosas cerámicas para suelos de locales industriales.
- Baldosas cerámicas para otros usos.



a)



b)



c)

Figura. 1.8 Ejemplos de tipos de baldosas cerámicas a) Baldosas para paredes interiores b) Baldosas para pisos interiores c) baldosas para pisos exteriores.

1.11.2 Clasificación según normativa.

Según las normas, la clasificación básica de las baldosas cerámicas resulta del método utilizado para su moldeo y de la absorción de agua como se muestra en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Grupos normalizados de baldosas cerámicas

Tipo de	A Baldosas Extruidas	Grupo I	Grupo Ila	Grupo I Ib	Grupo III
		$E \leq 3\%$	$3\% < E \leq 6\%$	$6\% < E \leq 10\%$	$E > 10\%$
		Grupo AI Absorción de agua baja ($E \leq 3\%$).	Grupo AIIa Absorción de agua media baja.	Grupo AIIIb Absorción de agua media alta.	Grupo AIII Absorción de agua alta.

moldeo	B Baldosas Prensadas en seco	Grupo Bla Absorción de agua muy baja ($E \leq 0.5\%$).	Grupo BIIb Absorción de agua.	Grupo BIII Absorción de agua media alta.	Grupo BIII Absorción de agua alta.
		Grupo BIb Absorción de agua baja ($0.5\% < E \leq 3\%$).			

1.11.3 Tipos de baldosas cerámicas

En la Tabla 1.2 se muestra una clasificación de los tipos de baldosas que podemos encontrar, así como sus principales características.

Tabla 1.2. Tipos de baldosas cerámicas.

Tipos de baldosas	Moldeo	Porosidad	Esmalte	Medidas Usuales (cm)	Grosor Usual (mm)	Grupo norma ISO 13006 UNE G7 - 087
Azulejo	Prensado	Poroso	Si	10*10 a 45*60	<10	BIII
Pavimento de gres	Prensado	No poroso	Si	10*10 a 60*60	>8	BIb-BIa
Gres porcelánico	Prensado	No poroso	No	15*15 a 60*60	>8	BIa
Baldosín catalán	Extruido	Poroso	No	13*13 a 24*40	<8	AIIb-AIII
Gres Rustico	Extruido	No poroso	No – Si	11.5*11.5 a 37*37	>10	AI-Alla
Barro cocido	Extruido	Poroso	No	Gran variedad	>10	AIIB AIII

1.11.4 Proceso de fabricación

Materias primas

Las arcillas y los caolines son las principales materias utilizadas en la elaboración de baldosas y azulejos. El cuarzo, los feldspatos, el carbonato de calcio (calcita), la dolomita y el talco, son materias primas no plásticas que le proporcionan ciertas características adicionales a la pieza que podrían mejorar el proceso de elaboración (Camacho, 2011)

Preparación de las materias primas

Una vez que se conocen las proporciones de cada materia prima para la elaboración del producto, las cuales se determinan gravimétricamente, se prosigue con la

pulverización fina (hasta un tamaño de partícula de $< 0,1$ mm). El tamaño de partícula varía dependiendo de la porosidad del material. La suspensión obtenida se puede procesar en un cuerpo plástico («pasta de extrusión») o en «polvo de prensado en seco» (Camacho, 2011).

Moldeado

La «pasta de extrusión» se moldea en un extrusor con la geometría correcta y se corta en piezas «polvo de prensado en seco». El polvo se moldea para prensar cuerpos en prensas manuales de impacto, prensas de husillo o prensas hidráulicas con una presión aproximada de 35 MPa, (Camacho, 2011).

Secado

Los cuerpos prensados se secan principalmente en secaderos de túnel, secaderos de rodillos o secaderos verticales. El secado se lleva a cabo a temperaturas que varían según el tipo de tecnología (Camacho, 2011).

Cocción y esmaltado

Las baldosas se fabrican como productos de monococción esmaltados o no esmaltados o bien como productos de doble cocción o, incluso, de triple cocción. La cocción de bizcocho se lleva a cabo a temperaturas de entre 1050 y 1150 °C en hornos de túnel clásicos (de 20 a 50 horas) o en modernos hornos de solera con rodillos en una o dos horas. Una vez que las piezas salen del horno se clasifican de diferentes maneras dependiendo de las especificaciones del fabricante; ya clasificadas se transportan al proceso de esmaltado. Se aplica el esmalte a las baldosas mediante pulverización o irrigación; dependiendo del estilo decorativo de la baldosa, el proceso puede tener ciertas variables como aplicación de múltiples colores, serigrafía, un acabado opaco o brillante. La cocción final se lleva a cabo en hornos de solera con rodillos, hornos de túnel u hornos de vagoneta, que funcionan de forma discontinua. Las baldosas esmaltadas se colocan en accesorios para cocción y se cuecen a temperaturas de entre 1050 y 1300 °C en hornos de túnel o en hornos de solera con rodillos, (Camacho, 2011).

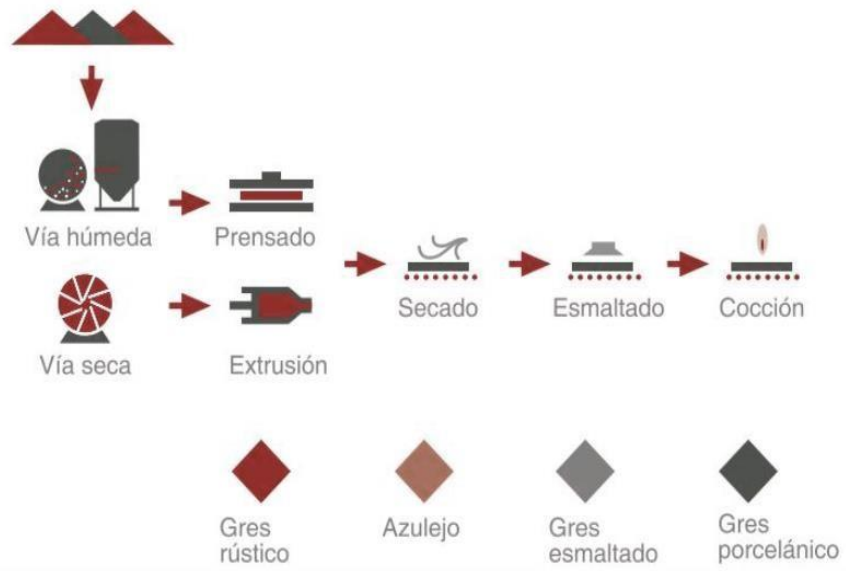


Figura. 1.9 Esquema general de un proceso de producción de baldosas cerámicas

1.12 RESIDUOS EN LA INDUSTRIA CERÁMICA SANITARIA

Dentro de la industria de producción de materiales cerámicos existe una serie de procesos específicos que liberan sustancias al aire, al agua y al suelo (residuos sólidos); la cantidad y el tipo de residuo que se produce depende en buena medida del proceso, del material ocupado y del equipo que se utilice.

En lo que refiere al aire, se hallan los polvos cerámicos, los gases de combustión, los compuestos inorgánicos que se generan en diversos procesos como la molienda, el pulido, el esmaltado y el horneado. Al agua se vierten desechos que provienen de operaciones de lavado o material insoluble que se genera del esmaltado o del pulido. Finalmente, los lodos o barbotina contaminada que se muestra en la Figura 11 a), b) y c) que no se puede volver a utilizar; la cerámica con defecto después de salir del horno Figura 11 d), y el polvo producido después de pulir son destinados al suelo, ocupando un lugar y eventualmente contaminando, (Salvador, 2015).

Aunque todos los residuos generan problemas, los que mayormente son visibles y por lo tanto mayor preocupación genera son los sólidos; en particular, las piezas rechazadas y la barbotina contaminada. El rechazo de las piezas puede deberse a grietas, poros en el esmalte, deformaciones, falta de esmalte, etc., Salvador (2015). Estos materiales rechazados, incluyendo la barbotina contaminada, generan pérdidas económicas cuantiosas, además de que ocupan grandes dimensiones de espacio como se muestra en la Fig. 11 c).



a)



b)



c)



d)

Figura 1.10. Residuos de la industria cerámica sanitaria a) Barbotina contaminada seca, b) barbotina contaminada en el proceso de vaciado c) barbotina contaminada acumulada d) piezas defectuosas desechadas

CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA

El trabajo se dividió en tres etapas; la primera consistió en la recolección de los residuos para trabajar y su caracterización; en la segunda se elaboraron las losetas cerámicas mediante prensado manual con diferentes porcentajes de los residuos. En la última etapa se llevaron a cabo las pruebas correspondientes para losetas según las normas ASTM e ISO.

2.1 Recolección, preparación y caracterización de residuos.

Materiales y equipo:

- Molino de bolas
- Hidrómetro 152H
- 2 probetas de 1000 mL.
- Solución de hexametáfosfato de sodio en agua destilada a una razón de 40 g/L.
- Tamiz de malla número 200
- Tamiz de malla número 80
- Termómetro

1.- Se recolectaron dos tipos de residuo de la industria cerámica sanitaria:

- Barbotina contaminada: es el desperdicio generado en el proceso de vaciado al verter la barbotina a los moldes; este material se considera pérdida debido a que no es conveniente reincorporarlo al proceso
- Piezas defectuosas: Una vez que las piezas salen del horno, un 25% de ellas tienen algún defecto, por lo que son desechadas debido a que no cumplen los parámetros de calidad.

2.- Se trituraron ambos residuos por separado mediante molienda húmeda en un molino de bolas con las especificaciones que se muestran en la Tabla 2.1

Tabla 2.1 Especificaciones del molino de bolas

Diámetro (m)	Longitud (m)	RPM	Carga de bolas (toneladas)	Potencia del motor (kW)	Porcentaje de carga de bolas
1.2	3	36	3.5	37	45%

El molino opera con 3 diferentes tamaños de bola, 35, 50 y 70 mm de diámetro. La barbotina contaminada fue molida durante 4 horas, mientras que las piezas defectuosas 8 horas

3.- Se determinó el tamaño de partícula del residuo según la norma ASTM D422-63 como se muestra en la Figura 2.1.

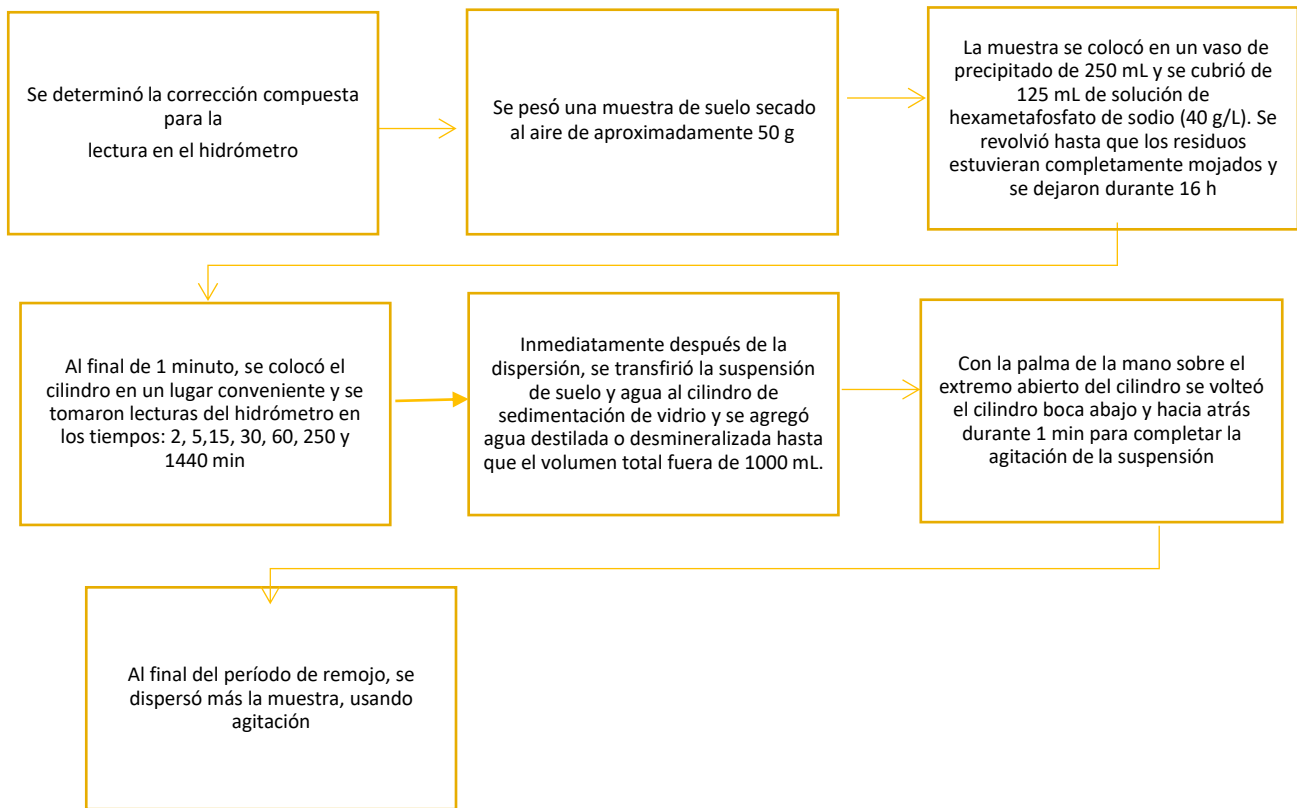


Figura 2.1.- Diagrama de la norma ASTM D422-63

4.- Se tamizó el residuo en un tamiz con número de malla 8.

2.2 Elaboración de las losetas

1. Se elaboró un molde de madera de 10 x 10 cm, con espesor de 1 cm.
2. Se preparó la pasta cerámica con ambos residuos con las siguientes proporciones:

100% barbotina contaminada

0% piezas defectuosas

80% barbotina contaminada	20% piezas defectuosas
60% barbotina contaminada	40% piezas defectuosas
40% barbotina contaminada	60% piezas rotas
20% barbotina contaminada	80% piezas rotas
0% barbotina contaminada	100% piezas defectuosas

Se realizaron 20 losetas por cada composición por medio de amasado y prensado manual. Para elaborar cada loseta se emplearon aproximadamente 100 g de pasta preparada y 30 mL de agua.

3. Todas las losetas formadas se cubrieron con plástico y se dejaron secar en un cuarto ventilado durante 4 días.
4. Una vez secas, las losetas se pulieron con lijas del número 100 para eliminar cualquier imperfección, buscando la mayor homogeneidad posible.
5. Finalmente, las losetas fueron cocidas en un horno cerámico marca SKUTT, modelo KM-1027 a 1075 °C durante 24 horas.

2.3 Pruebas realizadas a las losetas

En esta última etapa se realizaron pruebas a las losetas basadas en normas ASTM e ISO.

NORMA ISO 10545-2. DIMENSIONES Y CALIDAD DE SUPERFICIE

Esta norma internacional define los métodos para determinar características dimensionales y la calidad de la superficie de pisos cerámicos de todo tipo. Para esta norma se utilizaron 10 losetas enteras de cada porcentaje preparado.

Se midió el ancho y la longitud de cada una de las losetas a 5 mm de los vértices de cada ángulo. Todas las medidas se realizaron con una precisión mínima de 0.1 mm utilizando un vernier.

Para medir el grosor se utilizaron 10 losetas enteras de cada porcentaje; se trazaron diagonales en cada loseta y se midió el espesor en cada una de las cuatro

secciones.

CONTRACCIONES LINEALES EN LAS BALDOSAS

Un parámetro importante dentro de las arcillas es la contracción que experimenta en el momento de secar las piezas y después de aplicar el tratamiento térmico, ya que cambian sus dimensiones lineales y volumétricas. Se tomaron 3 losetas de cada lote con concentraciones diferentes; se midió el perímetro de las piezas húmedas, ya secas y después del tratamiento térmico. De esta forma se obtuvo un porcentaje de contracción total.

NORMA ASTM C648-04 MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA RESISTENCIA A LA ROTURA DE BALDOSAS DE CERÁMICA

El método de ensayo proporciona los medios para establecer si un lote de losetas cerámicas cumple o no con los requisitos de resistencia que pueden aparecer en las especificaciones de las baldosas. La resistencia de la loseta es la fuerza en libras-fuerza (o newtons), tal como se lee en el manómetro, necesaria para que la loseta se rompa. Para aplicar esta norma se utilizó un soporte de muestra y un aplicador de fuerza con las especificaciones que se muestran en la Figura 2.2. Se utilizó una máquina universal CMSUTM-100.

NORMA ASTM C373 – 14A MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA ABSORCIÓN DE AGUA, DENSIDAD APARENTE, POROSIDAD APARENTE Y GRAVEDAD ESPECÍFICA APARENTE DE PRODUCTOS DE CERÁMICA BLANCA COCIDOS, BALDOSAS DE CERÁMICA Y BALDOSAS DE VIDRIO.

La medición de la densidad, la porosidad y la gravedad específica es importante para determinar el grado de maduración de un cuerpo cerámico o para determinar las propiedades estructurales que pueden requerirse para una aplicación determinada. Para aplicar esta norma se utilizó una balanza analítica marca Ohaus modelo AX124, una balanza granataria Ohaus Dial 310-00, un horno marca Riossa modelo H-48, Lazo de alambre, canasta metálica, recipiente de acero inoxidable, agua destilada, gamuza de cuero, estufa y un desecador. Para aplicar esta norma se requirieron cinco losetas representativas de cada porcentaje de residuo. Se colocaron las 5 muestras en una gradilla de acero inoxidable que las separaba del fondo y de los lados del recipiente de acero; se colocó la gradilla con las losetas en agua destilada y se hirvió en un recipiente de acero inoxidable. El agua destilada se encontraba sin usar y en cantidad suficiente para que las muestras de prueba estuvieran completamente sumergidas. Se hirvieron las muestras durante 5 h + - 5 min. Se colocó una tapa suelta sobre el recipiente para minimizar la pérdida de agua por evaporación. Las muestras siempre estuvieron completamente sumergidas y la ebullición se mantuvo durante toda la prueba. Después del hervor de 5 h, las losetas continuaron en remojo en la misma agua destilada durante 24 h. Se realizó el pesaje colocando las losetas en una canasta suspendida de un brazo de la balanza. Antes de pesar realmente, se contrapesó la balanza con la canasta en su lugar y se sumergió en agua a la misma que se utilizó cuando las losetas estaban suspendidas. Después del remojo de 24 h, las losetas fueron secadas con una gamuza de cuero húmeda para eliminar todas las gotas de agua visibles de la superficie; se determinó así la masa saturada al 0,01 g (0,00002 lb) más cercano. El proceso de secado implicó golpear ligeramente a la muestra en todos los bordes y superficies con la gamuza húmeda. Para finalizar, se secaron nuevamente las muestras del ensayo hasta masa constante, en un horno a 150 +- 5 °C (302 +-9 °F) durante 24 h; posteriormente se dejaron enfriar en un desecador. Las muestras así obtenidas se pesaron para determinar la masa seca.

NORMA ASTM-C805 MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA NÚMERO DE REBOTE DE HORMIGÓN ENDURECIDO

El método de dureza de rebote proporciona un medio para la clasificación rápida de la dureza de la roca durante la caracterización del sitio con fines de ingeniería, diseño y construcción. Para aplicar esta norma se utilizó un martillo de rebote marca Controls modelo 45-D056, el cual consiste de un pistón cargado por un resorte, una base de acero de una masa mínima de 20 kg a la que se sujetan de forma segura los especímenes y una piedra abrasiva. Se colocó la base de acero sobre una superficie plana y nivelada, que proporcionó un soporte firme y rígido. Las losetas se sujetaron de forma segura y se asentaron firmemente en un bloque de tal manera que se evitó la vibración y el movimiento durante el ensayo. El martillo se colocó a no menos de un diámetro del borde de la muestra; el resorte del martillo se comprimió presionando gradualmente el émbolo hasta generar el disparo produciendo el impacto. Antes de restaurar el pistón a su extensión original, se registró la altura del rebote del émbolo al número entero más cercano, medido en una escala arbitraria de 10 a 100 divisiones, ubicada en el costado del martillo. Este procedimiento se llevó a cabo en diez lugares representativos de la muestra.

CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Granulometría con hidrómetro

La distribución de tamaño de partículas se refiere a la distribución porcentual de los diferentes tamaños de partículas presentes en el suelo, es decir, la granulometría. El método del hidrómetro, debido a la simplicidad y mínimo costo en materiales, es comúnmente usado para determinar los tamaños de partículas de la fracción fina del suelo. El hidrómetro mide la densidad del medio, que varía directamente con la cantidad de partículas presentes en la suspensión. Actualmente para suelos finos quizá es el ensayo de mayor uso; se basa en que las partículas tienen una velocidad de sedimentación, relacionada con su tamaño, Gabriels y Lobo (2011). Asimismo, la ley fundamental para realizar análisis granulométrico con un hidrómetro es la Ley de Stokes, la cual señala que si una partícula esférica cae dentro del agua adquiere pronto una velocidad uniforme dependiendo del diámetro de la partícula, de su densidad y de la viscosidad del agua; este ensayo se realiza con el estándar en las normas, Valencia y Huertas (2018). Para determinar el tamaño de partícula y el porcentaje más fino se necesitan hacer ciertas correcciones en la lectura del hidrómetro y obtener ciertas variables que se muestran en las Tablas 3.1 y 3.2.

Tabla 3.1 Correcciones experimentales de la barbotina.

Cd (lectura del hidrómetro en defloculante más agua) (g/L)	6
Ws (peso seco de la muestra) (g)	50
a (Corrección por gravedad específica)	1.01
Gs (peso específico del sólido) (adimensional)	2.609
Cm (lectura del hidrómetro menisco) (g/L)	1

Tabla 3.2 Correcciones experimentales de las piezas defectuosas.

Cd (lectura del hidrómetro en defloculante más agua) (g/L)	6
Ws (peso seco de la muestra) (g)	50
a (Corrección por gravedad específica)	0.99
Gs (peso específico del sólido) (adimensional)	2.69
Cm (lectura del hidrómetro menisco) (g/L)	1

Cd es la diferencia del resultado obtenido con el hidrómetro sumergido en agua

con hexametáfosfato de sodio y la lectura del hidrómetro sumergido únicamente en agua; **a** se obtuvo de tablas contenidas en la norma ASTM D422; **G_s** se obtuvo experimentalmente a partir de la norma ASTM D-854; **C_m** se determinó introduciendo el hidrómetro en agua destilada y observando la altura a la cual el menisco se levantaba por encima de la superficie del agua; **C_t** se corrigió utilizando la temperatura con tablas basadas en la norma ASTM D422.

La lectura del hidrómetro corregido (R_c) se obtuvo con la ecuación (3.1):

$$R_c = R_d - C_d + C_t \quad (3.1)$$

El porcentaje más fino pasante (P , %) se obtuvo con la ecuación (3.2)

$$P (\%) = \frac{R_c * \alpha * 100}{W_s} \quad (3.2)$$

La lectura del hidrómetro corregido solo por menisco se obtuvo con la ecuación (3.3)

$$R = R_d + C_m \quad (3.3)$$

El diámetro de partícula se obtuvo con la ecuación (3.4).

$$D = K \sqrt{\frac{L}{t}} \quad (3.4)$$

Las constantes K y L (mm) se obtuvieron de tablas que se encuentran en la norma ASTM.

3.2 Análisis Granulométrico de los residuos

En las Tablas 3.3 y 3.4 se muestran los resultados obtenidos de los diferentes residuos.

Tabla 3.3 Resultados granulométricos de la Barbotina contaminada.

Tiempo (min)	°C	Ct (g/L)	Rd (g/L)	Rc (g/L)	P (%)	R (g/L)	L (mm)	K (adimensional)	Diámetro (mm)
1	20	0	27	21	42.42	28	11.7	0.01386	0.047
2	20	0	23	17	34.34	24	12.4	0.01386	0.035
5	21	0.2	21	15.2	30.70	22	12.7	0.01369	0.022
15	20	0	19	13	26.26	20	13	0.01386	0.013
30	21	0.2	17	11.2	22.62	18	13.3	0.01369	0.009
60	20	0	14	8	16.16	15	13.8	0.01386	0.007
250	20	0	12	6	12.12	13	14.2	0.01386	0.003
1440	21	0.2	10	4.2	8.48	11	14.5	0.01386	0.001

Tabla 3.4 Resultados granulométricos de las piezas defectuosas.

Tiempo (min)	°C	Ct (g/L)	Rd (g/L)	Rc (g/L)	P (%)	R (g/L)	L (mm)	K (adimensional)	Diámetro (mm)
1	20	0	29	23	45.54	30	11.4	0.01344	0.045
2	20	0	24	18	35.64	25	12.2	0.01344	0.033
5	20	0	21	15	29.7	22	12.7	0.01344	0.021
15	20	0	18	12	23.76	19	13.2	0.01344	0.013
30	20	0	16	10	19.8	17	13.5	0.01344	0.009
60	21	0.2	14	8.2	16.23	15	13.8	0.01328	0.006
250	21	0.2	11	5.2	10.29	12	14.3	0.01328	0.003
1440	21	0.2	7	1.2	2.376	8	15	0.01328	0.001

Con los valores de porcentaje pasante y diámetro de partículas se construyeron las curvas granulométricas de las Figuras 3.1 y 3.2; en ellas es posible observar las variaciones en el tamaño de partícula en ambos residuos, además de los diferentes tamaños de partícula en la materia prima. Como menciona Restrepo (2011). En el caso 1 del residuo barbotina contaminada hay un 20.6% de partículas menores de 0.005 mm, esto quiere decir que la plasticidad de la barbotina contaminada es baja; no se encuentran diámetros mayores o iguales a 0.14 mm que pudieran originar disminución en la plasticidad del residuo. En el caso 2 (residuo de piezas defectuosas) hay un 12.67% de partículas menores o iguales a 0.005 mm por lo que la plasticidad de este residuo es muy baja; pero al igual que en el caso anterior, no hay partículas iguales o mayores de 0.14 mm, por lo que no existirá una disminución significativa en la plasticidad.

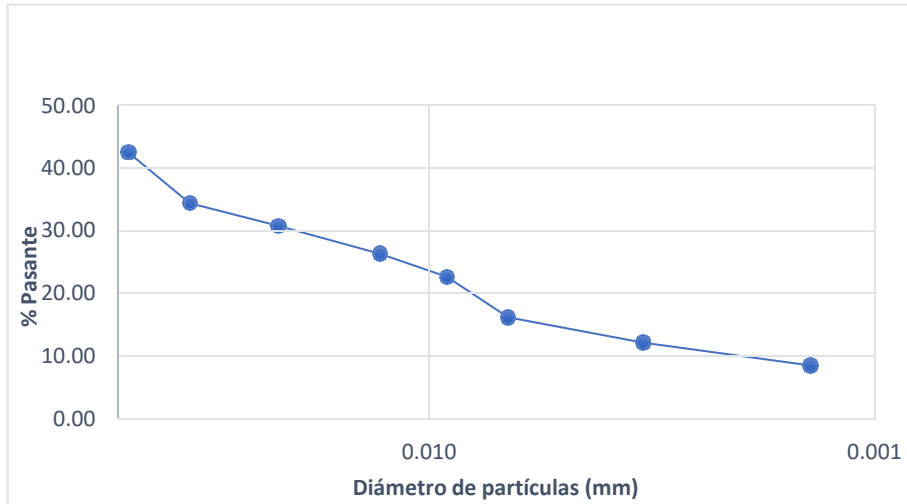


Figura 3.1.- Curva granulométrica de la barbotina contaminada.

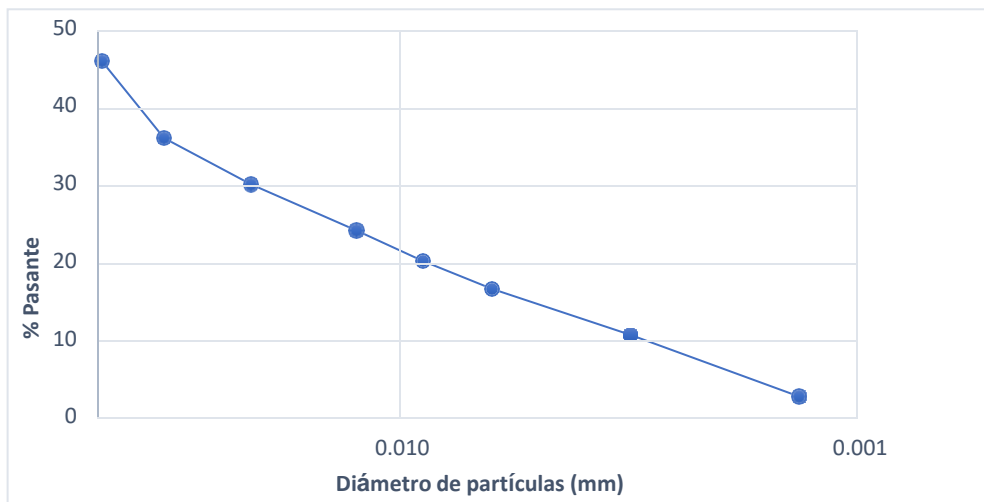


Figura 3.2.- Curva granulométrica de las piezas defectuosas

3.2 Medidas de las desviaciones dimensionales

3.2.1 Medidas de longitud y grosor de las losetas

Las mediciones de longitud y espesor se midieron en base a la norma ISO 10545-2. Se tomaron 10 losetas de cada lote. Las Tablas 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9 y 3.10 contienen los resultados obtenidos. La medida media de cada baldosa es la media aritmética de las cuatro medidas de sus lados. La medida media de la muestra es la media aritmética de las 40 medidas.

Tabla 3.5.- Longitud de cada lado de las baldosas con concentración de 100% barbotina contaminada.

	Longitud 1 (mm)	Longitud 2 (mm)	Longitud 3 (mm)	Longitud 4 (mm)	Medida Media
1	94.6	91.8	93.7	91.6	92.925
2	92.5	91.7	91.4	94.9	92.625
3	91.6	91.7	91.4	91.5	91.55
4	94.8	93.9	91.8	92	93.125
5	91.7	94.5	92.1	91.7	92.5
6	91.4	91.6	94.5	93.6	92.775
7	93.6	91.7	91.4	94.7	92.85
8	91.6	93.5	94.6	91.6	92.825
9	91.8	93.8	91.9	94.9	93.1
10	92	91.6	92.9	93.9	92.6
Media aritmética	92.6875				

Tabla 3.6.- Longitud de cada lado de las baldosas con concentración de 80% barbotina contaminada y 20% pieza defectuosa.

	Longitud 1 (mm)	Longitud 2 (mm)	Longitud 3 (mm)	Longitud 4 (mm)	Medida Media
1	91.9	91.8	91.5	91.8	91.75
2	91.6	92.7	92.9	92	92.3
3	94.8	93.8	91.7	92.9	93.3
4	91.7	91.7	92.5	93.9	92.45
5	92.7	91.7	92.8	91.3	92.125
6	91.9	91.9	91.5	94.9	92.55
7	93.7	92.6	93.9	91.7	92.975
8	91.6	94.4	91.4	93.7	92.775
9	91.6	91.6	91.5	91.7	91.6
10	91.9	91.6	92.7	93.6	92.45
	Media aritmética	92.4275			

Tabla 3.7 Longitud de cada lado de las baldosas con concentración 60% barbotina contaminada y 40% piezas defectuosas.

	Longitud 1 (mm)	Longitud 2 (mm)	Longitud 3 (mm)	Longitud 4 (mm)	Medida Media
1	91.5	91.7	91.9	91.4	91.625
2	94.6	91.8	92	92.5	92.725
3	92.6	92.9	91.4	91.7	92.15
4	91.5	93.9	95.5	94.7	93.9
5	91.7	91.6	92.6	93.7	92.4
6	93.8	92.6	91.6	91.7	92.425
7	92.7	91.6	91.8	92.8	92.225
8	91.6	94.6	92.7	91.6	92.625
9	93.9	91.5	91.9	93.9	92.8
10	91.7	91.7	91.9	91.7	91.75
	Media aritmética	92.4625			

Tabla 3.8 Longitud de cada lado de las baldosas con concentración 40% barbotina contaminada y 60% piezas defectuosas

	Longitud 1 (mm)	Longitud 2 (mm)	Longitud 3 (mm)	Longitud 4 (mm)	Medida media
1	95	91.8	93.5	94.6	93.725
2	93.5	92.8	91.7	92.3	92.575
3	92.6	91.6	94.6	91.9	92.675
4	94.6	92.7	93.7	94.7	93.925
5	91.7	91.7	92.8	91.7	91.975
6	92.9	91.7	91.9	92.5	92.25
7	91.7	94.5	92	94.9	93.275
8	91.8	94.9	94.2	93.7	93.65
9	92.8	91.5	91.6	92.5	92.1
10	91.8	93.6	93.5	91.7	92.65
	Media aritmética	92.88			

Tabla 3.9.- Longitud de cada lado de las baldosas con concentración 20% barbotina contaminada y 80% piezas defectuosas.

	Longitud 1 (mm)	Longitud 2 (mm)	Longitud 3 (mm)	Longitud 4 (mm)	Medida Media
1	91.8	92.5	91.4	94.2	92.475
2	93.7	91.7	91.5	93.7	92.65
3	94.8	94.6	93.7	91.7	93.7
4	91.7	91.7	91.7	92.9	92
5	93.7	94.8	92.7	93.5	93.675
6	93.9	91.9	92.7	91.6	92.525
7	91.6	92	92.8	93.7	92.525
8	95.4	95.2	91.6	94.5	94.175
9	91.6	91.6	92.9	92.8	92.225
10	92.6	93.5	93.7	91.6	92.85
	Media aritmética	92.88			

Tabla 3.10.- Longitud de cada lado de las baldosas con concentración 100% piezas defectuosas.

	Longitud 1 (mm)	Longitud 2 (mm)	Longitud 3 (mm)	Longitud 4 (mm)	Medida Media
1	94.7	92.5	92.6	93.5	93.325
2	91.8	91.7	93.5	91.6	92.15
3	94.6	91.7	93.6	94.7	93.65
4	91.8	94.7	92.6	92.6	92.925
5	94.6	95.6	91.9	91.7	93.45
6	92.5	94.5	91.9	93.5	93.1
7	95.1	91.9	94.7	94.6	94.075
8	93.5	94.8	95.5	92.8	94.15
9	94.6	91.6	92.7	91.6	92.625
10	94.6	91.7	94.8	92	93.275
	Media aritmética	93.2725			

En las tablas anteriores se muestran las medidas de longitud de cada lado de las losetas; las medidas se encuentran en el intervalo 91- 96 mm. A pesar de que todas las losetas se elaboraron con el mismo molde (100 x 100 mm), se presentó una variación en las medidas finales debido a la técnica de moldeo utilizada y a que no se contó con un equipo industrial para su elaboración.

En las Tablas 3.11 a 3.16 se muestran los grosores de cada baldosa en 4 puntos diferentes como lo indica la norma ISO 10545-2. La dimensión media del grosor de cada baldosa es la media aritmética de las cuatro medidas efectuadas sobre ella. El grosor medio de la muestra de 10 baldosas es la media de las 40 medidas.

Tabla 3.11.- Grosor de 4 puntos de las baldosas con concentración 100% barbotina contaminada.

	Espesor 1(mm)	Espesor 2 (mm)	Espesor 3 (mm)	Espesor 4(mm)	Medida media
1	5.2	5.9	5.1	5.6	5.45
2	5.8	5.6	5.1	5.7	5.55
3	6.1	5.2	5.9	5.8	5.75
4	5.4	5.1	5.7	5.7	5.475
5	6.2	5.9	5.3	6.1	5.875
6	5.7	5.7	5.2	5.3	5.475

7	5.8	5.6	5.9	6.1	5.85
8	6.1	5.7	5.6	6.3	5.925
9	5.9	6.3	5.6	5.2	5.75
10	6.3	5.6	5.6	5.5	5.75
	Media aritmética	5.685			

Tabla 3.12.- Grosor de 4 puntos de las baldosas con concentración 80% barbotina contaminada 20% piezas defectuosas.

	Espesor 1(mm)	Espesor 2 (mm)	Espesor 3 (mm)	Espesor 4(mm)	Medida media
1	5.5	6.1	5.3	5.3	5.55
2	5.5	5.6	5.7	5.7	5.62
3	5.7	5.7	5.8	5.7	5.72
4	5.3	5.6	6.3	5.5	5.67
5	5.7	5.3	6.2	5.2	5.6
6	5.7	5.6	6.3	5.8	5.85
7	5.7	5.5	5.6	5.8	5.65
8	5.7	5.7	5.6	5.7	5.67
9	6.1	5.7	5.6	5.6	5.75
10	5.3	6.2	5.4	5.4	5.57
	Media aritmética	5.6675			

Tabla 3.13.- Grosor de 4 puntos de las baldosas con concentración 60% barbotina contaminada 40% piezas defectuosas

	Espesor 1(mm)	Espesor 2 (mm)	Espesor 3 (mm)	Espesor 4(mm)	Medida media
1	5.1	5.7	5.6	5.4	5.45
2	5.8	5.4	5.7	5.6	5.625
3	5.7	5.7	6.1	5.6	5.775
4	5.8	5.3	5.6	5.6	5.575
5	5.7	5.9	5.7	5.6	5.725
6	5.6	6.1	5.5	5.4	5.65
7	5.6	6.1	5.4	5.6	5.675
8	5.7	6	5.9	5.9	5.875
9	5.2	5.9	6.1	5.7	5.725
10	5.5	5.3	6.3	5.6	5.675

	Media aritmética	5.675			
--	------------------	-------	--	--	--

Tabla 3.14.- Grosor de 4 puntos de las baldosas con concentración 40% barbotina contaminada 60% piezas defectuosas.

	Espesor 1(mm)	Espesor 2 (mm)	Espesor 3 (mm)	Espesor 4(mm)	medida media
1	5.5	5.7	6.1	5.5	5.7
2	5.8	5.5	6.1	5.8	5.8
3	5.7	5.5	6.3	5.9	5.85
4	5.3	5.7	5.5	5.4	5.475
5	5.9	5.3	5.9	5.6	5.675
6	5.7	5.5	5.5	5.6	5.575
7	5.7	6.2	5.5	5.7	5.775
8	5.5	5.8	6.1	5.6	5.75
9	6.1	5.7	5.3	6.4	5.875
10	6.3	5.6	5.9	5.7	5.875
	Media aritmética	5.735			

Tabla 3.15.- Grosor de 4 puntos de las baldosas con concentración 20% barbotina contaminada 80% piezas defectuosas.

	Espesor 1(mm)	Espesor 2 (mm)	Espesor 3 (mm)	Espesor 4(mm)	Medida media
1	5.8	5.6	5.6	5.7	5.675
2	5.7	5.6	5.4	5.7	5.6
3	5.7	5.6	5.5	5.3	5.525
4	5.6	5.4	5.8	5.8	5.65
5	5.7	5.5	5.3	5.8	5.575
6	5.9	5.4	5.4	5.5	5.55
7	5.8	5.9	5.6	5.2	5.625
8	5.2	6.3	5.6	5.8	5.725
9	5.5	5.9	5.6	5.7	5.675
10	5.7	5.8	5.6	5.6	5.675
	Media aritmética	5.6275			

Tabla 3.16.- Grosor de 4 puntos de las baldosas con concentración 100% piezas defectuosas

	Espesor 1(mm)	Espesor 2 (mm)	Espesor 3 (mm)	Espesor 4(mm)	Medida media
1	5.5	5.6	6.2	5.8	5.775
2	5.6	5.6	5.4	5.7	5.575
3	5.7	5.7	5.8	5.6	5.7
4	5.7	5.6	5.6	5.7	5.65
5	5.6	5.7	5.7	5.7	5.675
6	5.9	5.6	5.6	5.9	5.75
7	5.4	6.3	5.6	6.1	5.85
8	5.8	5.9	5.6	5.6	5.725
9	5.8	5.8	5.6	5.4	5.65
10	5.6	5.8	5.8	5.5	5.675
	Media aritmética	5.7025			

Los grosores de todas las baldosas se encuentran en el intervalo de 5 - 6.5 mm. La media aritmética de cada lote de baldosas es similar en los 6 casos debido a que se fabricaron con el mismo molde y procedimiento; sin embargo, no todos los resultados son idénticos porque a la hora de su elaboración no se contó con herramientas especializadas para su fabricación.

3.3 Contracciones

Todas las arcillas o pastas cerámicas experimentan encogimiento a lo largo del proceso, presentando 2 tipos de contracciones: por secado y por quema, Vázquez (2005). Durante el secado existe una pérdida en la porosidad y en el volumen, lo que afecta a las dimensiones iniciales; esto depende de su plasticidad y de la cantidad de agua que se utiliza en el proceso al momento de retirar o eliminar el agua. Durante el tratamiento térmico, dependiendo de las temperaturas que se manejen y de los aditivos que contenga la pasta, puede surgir un cambio en las dimensiones de las piezas, Güeto (2010). En las Tablas 3.17 – 3.22 se muestran las retracciones lineales obtenidas de tres losetas muestra de cada composición

Tabla 3.17.- Retracciones de tres diferentes losetas con composición 100% barbotina contaminada.

Perímetro húmedo (mm)	Perímetro en seco (mm)	Contracción por secado (%)	Perímetro en cocido (mm)	Contracción térmica (%)	Contracción total (%)
393	385	2.04	369	4.16	6.11
391	382	2.30	367	3.93	6.14
395	385	2.53	372	3.38	5.82

Tabla 3.18.- Retracciones lineales de tres diferentes losetas con composición 80% barbotina contaminada y 20% piezas defectuosas.

Perímetro húmedo (mm)	Perímetro en seco (mm)	Contracción por secado (%)	Perímetro en cocido (mm)	Contracción térmica (%)	Contracción total (%)
390	380	2.56	367	3.42	5.90
398	389	2.26	374	3.86	6.03
393	384	2.29	367	4.43	6.62

Tabla 3.19.- Retracciones lineales de tres diferentes losetas con composición 60% barbotina contaminada y 40% piezas defectuosas

Perímetro húmedo (mm)	Perímetro en seco (mm)	Contracción por secado (%)	Perímetro en cocido (mm)	Contracción térmica (%)	Contracción total (%)
396	388	2.02	375	3.35	5.30
393	384	2.29	370	3.65	5.85
393	385	2.04	370	3.90	5.85

Tabla 3.20.- Retracciones lineales de tres diferentes losetas con composición 40% barbotina contaminada y 60% piezas defectuosas.

Perímetro húmedo (mm)	Perímetro en seco (mm)	Contracción por secado (%)	Perímetro en cocido (mm)	Contracción térmica (%)	Contracción total (%)
390	382	2.05	367	3.93	5.90
399	389	2.51	378	2.83	5.26
394	383	2.79	372	2.87	5.58

Tabla 3.21.- Retracciones lineales de tres diferentes losetas con composición 20% barbotina contaminada y 80% piezas defectuosas.

Perímetro húmedo (mm)	Perímetro en seco (mm)	Contracción por secado (%)	Perímetro en cocido (mm)	Contracción térmica (%)	Contracción total (%)
394	384	2.54	374	2.60	5.08
396	384	3.03	376	2.08	5.05
390	380	2.56	371	2.37	4.87

Tabla 3.22.- Retracciones lineales de tres diferentes losetas con composición 100% piezas defectuosas.

Perímetro húmedo (mm)	Perímetro en seco (mm)	Contracción por secado (%)	Perímetro en cocido (mm)	Contracción térmica (%)	Contracción total (%)
393	383	2.54	375	2.09	4.58
396	386	2.53	377	2.33	4.80
393	385	2.04	374	2.86	4.83

Para determinar el % de contracciones según Güeto (2010), se utilizaron las siguientes formulas:

$$\% \text{ Contracción por secado} = \frac{(P_h - P_s) * 100}{P_h} \quad (3.5)$$

$$\% \text{ Contracción por cocido} = \frac{(P_s - P_c) * 100}{P_s} \quad (3.6)$$

$$\% \text{ Contracción total} = \frac{(P_h - P_c) * 100}{P_h} \quad (3.7)$$

Donde: Ph = perímetro húmedo, Ps = perímetro seco y Pc = perímetro cocido

Para diferentes arcillas dependiendo del contenido de fracciones finas la contracción por secado ideal debe oscilar entre: 2%- 3% y 10%-12% en función del contenido de las fracciones finas. Como podemos ver en las Tablas, todas se encuentran dentro del intervalo de contracción por secado, usuales en las arcillas. La retracción térmica puede constituir un 2-8%, en dependencia del tipo de arcilla. La retracción total, igual a la suma algebraica de las retracciones, oscila entre 5%

y 18%. Como podemos observar en las Tablas anteriores, la mayoría de las losetas se encuentran dentro del intervalo usual de contracción total excepto por las losetas elaboradas con 100% piezas defectuosas, el porcentaje de retracción total de estas losetas es menor que el usual, estos valores se pueden atribuir debido a que este residuo ya pasado por un tratamiento térmico, por lo que las dimensiones lineales no varían significativamente Restrepo (2011).

3.4 Absorción de agua, densidad aparente, porosidad aparente y gravedad específica aparente.

Los cerámicos pueden presentar 3 tipos diferentes de volúmenes, ya que estos materiales están formados por una cantidad de materia compacta y una cantidad de poros, Tejeira (2015). El primer volumen es el exterior que está constituido por la masa de la materia, el segundo volumen es el volumen que está ocupado por los poros abiertos, y por lo tanto, es aquel que tiene acceso al exterior llamado volumen de poros abiertos; el tercer volumen es aquel ocupado por los poros cerrados o porciones impermeables, es decir, el volumen de los huecos que no tienen contacto con el exterior de la pieza cerámica, llamado volumen de porciones impermeables. Con estos tres volúmenes se obtiene la porosidad aparente, que es aquella que mide los poros interconectados y determina la permeabilidad, o la facilidad con la que los gases y los fluidos se transmiten a través de los componentes cerámicos, Mallo et al. (2010). La gravedad específica se refiere a una porción del espécimen impermeable al agua hirviendo. La densidad aparente es utilizada para expresar el grado de compactación y determina algunas de las características más importantes del producto final, posibilitando la existencia de defectos estructurales, dimensionales y superficiales. El porcentaje de absorción de agua representa la porosidad abierta y la cantidad de agua que se hace pasar por estos poros, Güeto (2010).

Se utilizó la norma ASTM C373-14a para realizar los cálculos para obtener la absorción de agua, la densidad aparente, la porosidad aparente y la gravedad específica aparente para cada lote de losetas con diferentes concentraciones; se obtuvo el promedio de todos los especímenes probados para cada propiedad deseada, además de los valores individuales. En las Tablas 3.23 -3.28 se muestran

los resultados obtenidos para 5 losetas. Para ello se emplearon las siguientes ecuaciones.

Volumen exterior

$$V = M - S \quad (3.8)$$

volumen de poros abiertos

$$v_{op} = M - D \quad (3.9)$$

volumen de porciones impermeables

$$v_{ip} = M - D \quad (3.10)$$

Porosidad aparente

$$P = \left(\frac{M-D}{V} \right) * 100 \quad (3.11)$$

Absorción de agua

$$A = \left(\frac{M-D}{D} \right) * 100 \quad (3.12)$$

Gravedad especifica aparente

$$T = \frac{D}{(D-S)} \quad (3.13)$$

Densidad aparente

$$B = \frac{D}{V} \quad (3.14)$$

Donde:

S: Masa suspendida

M: Masa saturada

D: Masa seca

Tabla 3.23 Absorción de agua y porosidad para losetas con concentración de 100% barbotina contaminada.

Losetas	S (g)	M (g)	D (g)	V (cm ³)	Vop (cm ³)	Vip (cm ³)	P (%)	A (%)	T	B (g/cm ³)
1.1	53.24	101.24	85.07	48	16.17	31.83	33.69	19.01	2.67	1.77
1.2	71.1	133.48	113.6	62.38	19.88	42.5	31.87	17.50	2.67	1.82
1.3	71	130.67	110.43	59.67	20.24	39.43	33.92	18.33	2.80	1.85
1.4	72.11	126.18	107.26	54.07	18.92	35.15	34.99	17.64	3.05	1.98
1.5	63.92	107.22	92.07	43.3	15.15	28.15	34.99	16.45	3.27	2.13
				53.484	18.072	35.412	33.89	17.79	2.89	1.91

Tabla 3.24 Absorción de agua y porosidad para losetas con concentración de 80% barbotina contaminada y 20% piezas defectuosas.

Loquetas	S (g)	M (g)	D (g)	V (cm ³)	Vop (cm ³)	Vip (cm ³)	P (%)	A (%)	T	B (g/cm ³)
2.1	58.43	110.68	95.28	52.25	15.40	36.85	29.47	16.16	2.59	1.82
2.2	57	104.11	90.39	47.11	13.72	33.39	29.12	15.18	2.71	1.92
2.3	57.05	108.69	94.04	51.64	14.65	36.99	28.37	15.58	2.54	1.82
2.4	59.05	109.15	94.1	50.10	15.05	35.05	30.04	15.99	2.68	1.88
2.5	59.07	109.36	95.3	50.29	14.06	36.23	27.96	14.75	2.63	1.90
				50.28	14.58	35.70	28.99	15.53	2.63	1.87

Tabla 3.25 Absorción de agua y porosidad para losetas con concentración de 60% barbotina contaminada y 40% piezas defectuosas.

Loquetas	S (g)	M (g)	D (g)	V (cm ³)	Vop (cm ³)	Vip (cm ³)	P (%)	A (%)	T	B (g/cm ³)
3.1	65	114.93	100.49	49.93	14.44	35.49	28.92	14.37	2.83	2.01
3.2	61.4	114.69	102.13	53.29	12.56	40.73	23.57	12.30	2.51	1.92
3.3	67.86	116.3	103.69	48.44	12.61	35.83	26.03	12.16	2.89	2.14
3.4	59.56	105.51	89.1	45.95	16.41	29.54	35.71	18.42	3.02	1.94
3.5	62.32	115.21	102.4	52.89	12.81	40.08	24.22	12.51	2.55	1.94
				50.10	13.77	36.33	27.69	13.95	2.76	1.99

Tabla 3.26 Absorción de agua y porosidad para losetas con concentración de 40% barbotina contaminada y 60% piezas defectuosas.

Loquetas	S (g)	M (g)	D (g)	V (cm ³)	Vop (cm ³)	Vip (cm ³)	P (%)	A (%)	T	B (g/cm ³)
4.1	61	115.41	103.23	54.41	12.18	42.23	22.39	11.80	2.44	1.90
4.2	58.0 5	109.53	97.69	51.48	11.84	39.64	23.00	12.12	2.46	1.90
4.3	65.2 1	116.55	103.68	51.34	12.87	38.47	25.07	12.41	2.70	2.02
4.4	60.0 3	113.74	101.97	53.71	11.77	41.94	21.91	11.54	2.43	1.90
4.5	90.4	164.04	145.37	73.64	18.67	54.97	25.35	12.84	2.64	1.97
				56.92	13.47	43.45	23.54	12.14	2.54	1.94

Tabla 3.27 Absorción de agua y porosidad para losetas con concentración de 20% barbotina contaminada y 80% piezas defectuosas.

Losetas	S (g)	M (g)	D (g)	V (cm ³)	Vop (cm ³)	Vip (cm ³)	P (%)	A (%)	T	B (g/cm ³)
5.1	87.56	162.78	145.4	75.22	17.38	57.84	23.11	11.95	2.51	1.93
5.2	68.74	130.15	117.67	61.41	12.48	48.93	20.32	10.61	2.40	1.92
5.3	66.69	125.04	112.08	58.35	12.96	45.39	22.21	11.56	2.47	1.92
5.4	64	117.44	105.55	53.44	11.89	41.55	22.25	11.26	2.54	1.98
5.5	63.72	122.54	110.34	58.82	12.20	46.62	20.74	11.06	2.37	1.88
				61.45	13.38	48.07	21.73	11.29	2.46	1.92

Tabla 3.28 Absorción de agua y porosidad para losetas con concentración de 100% piezas defectuosas.

Losetas	S (g)	M (g)	D (g)	V (cm ³)	Vop (cm ³)	Vip (cm ³)	P (%)	A (%)	T	B (g/cm ³)
6.1	70.41	126.68	113.53	56.27	13.15	43.12	23.37	11.58	2.63	2.02
6.2	73.08	134.55	122.38	61.47	12.17	49.30	19.80	9.94	2.48	1.99
6.3	75.39	138.33	125.61	62.94	12.72	50.22	20.21	10.13	2.50	2.00
6.4	70.1	128.16	115.31	58.06	12.85	45.21	22.13	11.14	2.55	1.99
6.5	78.9	150.34	135.08	71.44	15.26	56.18	21.36	11.30	2.40	1.89
				62.04	13.23	48.81	21.37	10.82	2.51	1.98

Se puede observar que entre mayor porcentaje de piezas defectuosas contengan las losetas, el porcentaje de absorción de agua, el volumen de poros impermeables y la porosidad aparente es menor, comparada con las losetas que contienen un mayor porcentaje en barbotina contaminada. Sin embargo, tanto la gravedad aparente como la densidad aparente no mostraron variaciones proporcionales; la gravedad específica, como se explicó anteriormente, indica la impermeabilidad de la loseta al agua hirviendo. Las losetas con un valor más alto fueron las losetas elaboradas con 100% barbotina contaminada, mientras que las que presentaron el valor más bajo fueron las elaboradas con 20% barbotina contaminada y 80% piezas defectuosas. De igual forma, la densidad aparente mostró resultados no proporcionales; por lo que sabemos, este parámetro ayuda a entender el grado de compactación de los cerámicos. La mayoría de las losetas

mostraron una densidad aparente en el intervalo 1.92 - 1.98, a excepción de las losetas elaboradas con 80% de barbotina contaminada y 20% piezas defectuosas, cuyo valor es de 1.87. Estos valores posiblemente fueron afectados en el momento de comprimir las losetas; debido a que el proceso fue manual, se desconoce la fuerza aplicada a las losetas cerámicas.

Los azulejos están comprendidos dentro del grupo BIII de las normas ISO (baldosas cerámicas prensadas en seco con absorción de agua $E > 10\%$), como se muestra en las Tablas 1.1 y 1.2 del capítulo 1. Puede notarse que todas las losetas fabricadas en este trabajo están arriba del porcentaje de absorción de agua establecido en las normas ISO. Restrepo (2011) plantea Tabla 3.29 con las características que debe tener un azulejo

Tabla 3.29 Especificaciones para azulejos.

Medidas usuales	Grosor Usual	Absorción de agua	Carga de rotura	Abrasión GL	Abrasión UGL	Resistencia a la helada	Resistencia Química
10*10 a 45*60 cm	<10 mm	11 - 15%	300 - 1200 N	Variable	-	Variable	Variable

De acuerdo con esta propuesta, es viable elaborar azulejos con los porcentajes de barbotina y piezas defectuosas propuestos en este trabajo.

3.5 Resistencia a la rotura de losetas cerámicas

Esta prueba proporciona los medios para establecer si una loseta cerámica cumple o no con los requisitos de resistencia, dependiendo de la aplicación que se le quiera dar. La resistencia de la loseta es la fuerza en libras-fuerza (o newtons), tal como se lee en el manómetro, necesaria para que la loseta se rompa. Esta prueba se realizó en base a la norma ASTM C648 – 04 con 4 muestras de cada lote con sus diferentes concentraciones; los resultados se muestran a continuación.

Tabla 3.30 Resistencia a la rotura para losetas con concentraciones de 100% de barbotina contaminada.

Lote 1	Carga de rotura (N)
1	347
2	320
3	355
4	380
	350.5

Tabla 3.31 Resistencia a la rotura para losetas con concentraciones de 80% de barbotina contaminada y 20% de piezas defectuosas.

Lote 2	Carga de rotura (N)
1	621
2	587
3	511
4	565
	571

Tabla 3.32 Resistencia a la rotura para losetas con concentraciones de 60% de barbotina contaminada y 40% de piezas defectuosas

Lote 3	Carga de rotura (N)
1	728
2	666
3	763
4	706
	715.75

Tabla 3.33 Resistencia a la rotura para losetas con concentraciones de 40% de barbotina contaminada y 60% de piezas defectuosas.

Lote 4	Carga de rotura (N)
1	863
2	879
3	880
4	828
	862.5

Tabla 3.34 Resistencia a la rotura para losetas con concentraciones de 20% de barbotina contaminada y 80% de piezas defectuosas.

Lote 5	Carga de rotura (N)
1	989
2	905
3	905
4	986
	946.25

Tabla 3.35 Resistencia a la rotura para losetas con concentraciones de 100% de piezas defectuosas.

Lote 6	Carga de rotura (N)
1	1775
2	1638
3	1619
4	1741
	1693.25

Podemos inferir a partir de estos resultados que la resistencia a la rotura de una loseta aumenta al aumentar la cantidad de residuos de piezas defectuosas.

Restrepo (2011) especifica la carga de rotura que deben cumplir ciertos tipos de baldosa dependiendo de su aplicación (tablas 3.36 y 3.37).

Tabla 3.36 Especificaciones de carga para azulejos.

Medidas usuales	Grosor Usual	Absorción de agua	Carga de rotura	Abrasión GL	Abrasión UGL	Resistencia a la helada	Resistencia Química
10*10 a 45*60 cm	<10 mm	11 - 15%	300 - 1200 N	Variable	-	Variable	Variable

Tabla 3.37 Especificaciones para pavimento de gres o pavimentos cerámicos.

Medidas usuales	Grosor Usual	Absorción de agua	Carga de rotura	Abrasión GL	Abrasión UGL	Resistencia a la helada	Resistencia Química
10*10 a 60*60 cm	>8 mm	2 - 6%	1000 - 2300 N	Variable	-	Si - No	Variable

Podemos observar que todas las losetas elaboradas con las diferentes concentraciones pueden ser utilizadas para la elaboración de azulejos, utilizados normalmente en revestimiento de paredes interiores en locales residenciales o comerciales. Únicamente las losetas con una composición de 100% piezas defectuosas se encuentran dentro del intervalo de carga de rotura para la elaboración de pavimentos cerámicos, que son adecuados para suelos interiores en locales residenciales o comerciales, Restrepo (2011).

3.6 Método de prueba estándar para la determinación del índice de rebote

El índice rebote se obtuvo con base en la norma ASTM C 805; se utilizaron 3 muestras representativas de cada lote, con las 6 diferentes concentraciones. El promedio se muestra en la Tabla 3.38.

Tabla 3.38 Índice de rebote para los diferentes lotes de losetas.

CÓDIGO DE CERÁMICA	ÍNDICE DE REBOTE	PROMEDIOS
1A	34	
1B	42	36
1C	32	
2A	46	
2B	30	40.67
2C	46	
3A	55	
3B	51	50.67
3C	52	
4A	48	
4B	53	49.67
4C	48	
5A	45	
5B	40	43.00
5C	44	
6A	53	
6B	52	53.33
6C	55	



Figura 3.3 Muestras de losetas utilizadas con diferentes concentraciones (1) 100% barbotina contaminada, (2) 80% barbotina y 20 % piezas defectuosas, (3) 60% barbotina contaminada y 40% piezas defectuosas, (4) 40% barbotina contaminada y 60% piezas defectuosas, (5) 20% barbotina contaminada y 80% piezas defectuosas, (6) 100% piezas defectuosas

Podemos observar en la Tabla 3.38 que las losetas de composición de 100% barbotina contaminada son las que presentan el índice de rebote más bajo, y las losetas de composición de 100% piezas defectuosas presentan el índice de rebote más alto; sin embargo, las losetas de lote 2, 3, 4 y 5 no presentan aumentos proporcionales basados en sus composiciones.

CONCLUSIONES

- A través del estudio realizado en esta tesis se demostró la factibilidad de utilizar los residuos de la industria cerámica sanitaria, en particular, la barbotina contaminada y piezas defectuosas; con estos residuos es posible desarrollar un producto sustentable con propiedades físicas y mecánicas similares a las de un azulejo convencional.
- La plasticidad de ambos residuos es baja, debido a los valores de los diámetros de las partículas; no se presentaron diámetros de partículas mayores de 0,14 mm-5 mm que presentaran algún problema para la elaboración de losetas o azulejos.
- Las losetas se encuentran dentro del intervalo usual de contracción total, excepto las losetas elaboradas con 100% piezas defectuosas. El porcentaje de retracción total de estas losetas es menor que el usual, esto traería ventajas al momento de su elaboración ya que no existiría una gran disminución de tamaño a la hora de su elaboración.
- La mayoría de las formulaciones con adición de barbotina contaminada y piezas defectuosas alcanzaron valores de absorción de agua en el intervalo 11-15%; solo las losetas elaboradas de 100% barbotina contaminada y 80% barbotina contaminada y 20% piezas defectuosas, estuvieron fuera de este intervalo.
- La resistencia mecánica en todas las formulaciones se encuentra dentro del intervalo 300-1200 N, por lo que todas las formulaciones cuentan con una resistencia a la rotura ideal de un azulejo convencional.
- Las losetas elaborada con 80% piezas defectuosas, 20% barbotina contaminada, 60% piezas defectuosas, 40% barbotina contaminada y 100% piezas defectuosas mostraron las mejores propiedades físicas y el mayor incremento de la resistencia mecánica, después de ser sinterizadas a la temperatura de 1250°C; sin embargo, la elaboración de losetas 100% de piezas defectuosas fue compleja debido a que se forman grietas fácilmente antes del tratamiento térmico por lo que su secado debe ser muy controlado

BIBLIOGRAFÍA

- Askeland, D. R. (1998). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales* (Vol. 3). México: International Thomson Editores.
- Callister, WD y Rethwisch, DG (2018). *Ciencia e ingeniería de materiales: una introducción* (Vol. 9). Nueva York: Wiley.
- Camacho Garcia, A. (2011). *Mejores técnicas disponibles de referencia europea sector de la fabricación cerámica*. Ministro de medio ambiente y medio rural y marino.
- Díaz Rubio, R. (2014). *Repercusión medioambiental del uso de la cerámica estructural en España. Energía embebida y huella de carbono* (Doctoral dissertation, Edificacion)
- El-Fadaly, E. (2015). *Characterization of porcelain stoneware tiles based on solid ceramic wastes*. *International Journal of Science and Research*, 4(1), 602-608.
- Gabriels, D., & Lobo, D. (2011). *Métodos para determinar granulometría y densidad aparente del suelo*. *Venesuelos*, 14(1), 37-48.
- Gómez Gasquet, P. (2010). *Programación de la producción en un taller de flujo híbrido sujeto a incertidumbre: arquitectura y algoritmos. Aplicación a la industria cerámica* (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica deValència).
- Gopi, S. (2009). *Ingeniería civil básica*. Pearson Educación India.
- Güeto, J. M. (2010). *Tecnología de los materiales cerámicos*. Ediciones Díaz de Santos.
- Kingery, WD, Bowen, HK y Uhlmann, DR (1976). *Introducción a la cerámica* (Vol. 17). John wiley e hijos.
- Kuang, X., Carotenuto, G. y Nicolais, L. (1997). *Una revisión de la sinterización de cerámica y sugerencias para reducir las temperaturas de sinterización*. *Materiales de rendimiento avanzado* , 4 (3), 257-274.
- Mallol, G., Llorens, D., Boix, J., Aguilera, M., Foucard, L., & Arnau, J. M. (2010). *Medida de la densidad aparente de baldosas cerámicas de forma rápida, inocua y no destructiva*. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 49(6), 393-398.
- Martínez Mechó, C. (2019). *Innovación y creatividad en el sector industrial cerámico*.
- Medina, C., De Rojas, M. S., & Frías, M. (2012). *Reuse of sanitary ceramic wastes as coarse aggregate in eco-efficient concretes*. *Cement and concrete composites*, 34(1), 48-54.
- Navarro, J. E. (1997). *Requisitos técnicos de baldosas cerámicas para usos concretos*. *Cerámica Información*, 232, 3-13.
- Pitarch-Roig, A. M., Reig, L., Tomás, A. E., Forcada, G., Soriano, L., Borrachero, M. & Monzó, J. M. (2020). *Pozzolanic activity of tiles, bricks*

- and ceramic sanitary-ware in ecofriendly Portland blended cements.
- Rajput, R. K. (2008). Engineering materials. S. Chand Publishing.
- Restrepo Baena, O. J. (2011). Baldosas cerámicas y gres porcelánico: un mundo en permanente evolución. Escuela de Ingeniería Civil.
- Restrepo Baena, O. J. (2011). Baldosas cerámicas y gres porcelánico: un mundo en permanente evolución. Escuela de Ingeniería Civil.
- Richerson, DW (2012). La magia de la cerámica. John Wiley & Sons.
- Roa Bohórquez, K. L., & Paredes Roa, R. A. (2017). Diseño y elaboración de unidades cerámicas macizas a partir de la caracterización morfológica, química y estructural del cascarón desecho del proceso de microfundición en Fasab Sogamoso.
- ROCA. Declaración ambiental de producto, porcelana sanitaria, cálculo basado en ISO 14025, UNE-EN 15804 y UNE-EN 16578. https://www.roca.es/documents/20126/980312/declaracion_ambiental_producto_0718.0dafdf59-09ea-4e69-a3b8-e69b28a42335.pdf/03231df1-510a-b090527cb40b?t=157243339755
- Rocha Rangel, E. (2005). Introducción a los materiales cerámicos. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Departamento de Materiales.
- Ruiz, R., & Maroto, C. (2002). Flexible manufacturing in the ceramic tile industry. In Proceedings of eighth international workshop on project management and scheduling, April (pp. 3-5).
- Salvador Simons, O. A. (2015). Utilización del desecho cerámico de la fábrica de sanitarios Edesa, para la fabricación de adoquines (Bachelor's thesis, Quito: EPN, 2015.).
- Sánchez-Molina, J., Corpas-Iglesias, F. A., & Rojas-Suárez, J. P. (2019). Cenizas Volantes de Termoeléctrica como Materia Prima para la Fabricación de Materiales Cerámicos de Construcción: Efecto de la Temperatura de Cocción sobre el Material. Información tecnológica, 30(1), 285-298.
- Smith, W. F., Hashemi, J., Cázares, G. N., & González-Caver, P. A. (2006). Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. México, DF: McGraw-Hill.
- Tarhan, B., Tarhan, M., & Aydin, T. (2017). Reusing sanitaryware waste products in glazed porcelain tile production. Ceramics International, 43(3), 3107-3112.
- Téllez, M.G. (2019). Síntesis y caracterización de compuestos cermets basemullita reforzados con nanopartículas de plata [Tesis Doctoral UAM].
- Valencia-Patiño, C. A., & Huertas-Daza, L. G. (2018). Análisis de granulometría por hidrómetro y un método automatizado para suelos bentoníticos.

Vázquez, E. (2005). Materiales cerámicos. propiedades aplicaciones y elaboración.
Centro de Investigaciones de Diseño Industrial.

Zegardło, B., Szeląg, M., & Ogródnik, P. (2016). Ultra-high strength concrete made
with recycled aggregate from sanitary ceramic wastes–
The method of production and the interfacial transition zone.
Construction and Building Materials, 122, 736-7.

