



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
ÁREA ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y MATERIALES
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LOS MATERIALES**

**REFORZAMIENTO DE LADRILLO BASE ARCILLA
CON FIBRA CERÁMICA RECICLADA**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

MAESTRO EN CIENCIAS DE LOS MATERIALES

PRESENTA

ING. CRISTIAN EDMUNDO MUÑOZ HERNÁNDEZ

DIRECTOR

DR. JAIME GUERRERO PAZ

CO-DIRECTOR

DR. HÉCTOR JAVIER DORANTES ROSALES

Mineral de la Reforma, Hidalgo.
Mayo de 2025



Mineral de la Reforma, Hgo., a 13 de mayo de 2025

Número de control: ICBI-D/761/2025
Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCIO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

El Comité Tutorial de la tesis titulada “**Reforzamiento de ladrillo base arcilla con fibra cerámica reciclada**” realizado por el sustentante **Cristian Edmundo Muñoz Hernández** con número de cuenta **488375** perteneciente al programa de la **Maestría en Ciencias de los Materiales**, una vez que ha revisado, analizado y evaluado el documento recepcional de acuerdo a lo estipulado en el Artículo 110 del Reglamento de Estudios de Posgrado, tiene a bien extender la presente:

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Por lo que el sustentante deberá cumplir los requisitos del Reglamento de Estudios de Posgrado y con lo establecido en el proceso de grado vigente.

Atentamente
“Amor, Orden y Progreso”

Dr. Jaime Guerrero Paz
Director de tesis

El Comité Tutorial

Dr. Héctor Javier Dorantes Rosales
Codirector

Dr. Francisco Raul Barrientos Hernández
Titular

Dr. Miguel Pérez Labra
Suplente

Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez
Director del ICBI

FRBH/BO

“Amor, Orden y Progreso”

Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184
Teléfono: 771 71 720 00 Ext. 40001
direccion_icbi@uaeh.edu.mx, vergara@uaeh.edu.mx

El presente trabajo de investigación, titulado "Reforzamiento de ladrillo base arcilla con fibra cerámica reciclada", fue desarrollado en el Laboratorio de Cerámicos del Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, bajo la dirección del Dr. Jaime Guerrero Paz.

Se agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT) por el apoyo brindado mediante la beca otorgada para la realización de este estudio de posgrado, correspondiente al periodo 2022–2024 (No. CVU: 1269555).

Agradecimientos

Quisiera expresar mi agradecimiento a mi asesor, el Dr. Jaime Guerrero Paz (ICBI-UAEH), por su orientación, su paciencia y su apoyo constante a lo largo de todo el proceso de investigación.

A los miembros de mi comité tutorial, el Dr. Jaime Guerrero Paz (ICBI-UAEH), el Dr. Héctor Javier Dorantes Rosales (ESIQIE-IPN), el Dr. Francisco Raúl Barrientos Hernández (ICBI-UAEH) y el Dr. Miguel Pérez Labra (ICBI-UAEH), les agradezco sus aportes que enriquecieron este trabajo.

También quisiera agradecer el indispensable apoyo del Laboratorio de Cerámicos de la Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales AACTyM, fue esencial para la realización de la investigación.

Agradezco a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) por proporcionar los equipos, los laboratorios, los materiales y los análisis necesarios para el desarrollo de esta investigación.

Mi reconocimiento a la Dra. Lis Tamayo Rivera (ESAp-UAEH) por su colaboración en la obtención de imágenes con el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB), las cuales fueron fundamentales para este estudio.

A mi familia, gracias por su comprensión y paciencia durante las largas horas dedicadas a esta investigación.

Finalmente, extendiendo mi gratitud a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron a la culminación de este trabajo.

Resumen

Este estudio analiza el uso de fibras recicladas para mejorar la resistencia a la compresión de los ladrillos artesanales sinterizados a 900°C, al mismo tiempo que se busca inertizar las fibras y disminuir su impacto en el medio ambiente. Las fibras utilizadas incluyen fibra cerámica refractaria, fibra de basalto (lana de roca) y fibra de vidrio, añadidas en proporciones de 0.33%, 0.66%, 1%, 2% y 3% en peso.

Se realizaron pruebas de compresión, así como mediciones de densidad bulk, porosidad aparente y absorción de agua. Además, se hicieron análisis de DRX y MEB en las fibras y en los ladrillos sinterizados. Los resultados del análisis DRX mostraron que las fibras (cerámica refractaria, basalto y vidrio) presentan una estructura amorfa antes de la sinterización. El análisis de distribución de tamaño mostró que las fibras tienen longitudes en un rango 25µm - 110 µm y un espesor entre 1.5 µm - 7 µm. A 900°C, la fibra cerámica refractaria no se fundió, la fibra de basalto se fundió parcialmente y la fibra de vidrio se fundió completamente a partir de los 700°C.

La prueba de resistencia a la compresión reveló que el ladrillo con un contenido 0.33% peso de fibra cerámica refractaria alcanzó un aumento 12.33% con respecto el blanco. Este resultado se debe a que la fibra cerámica refractaria no se fundió a 900°C, conservando sus propiedades mecánicas, y a la baja proporción de fibra, lo que evitó aglomeraciones en la matriz del ladrillo.

Abstract

This study analyzes the use of recycled fibers to improve the compression strength of handcrafted bricks sintered at 900°C, while also aiming to inert the fibers and reduce their environmental impact. The fibers used include refractory ceramic fiber, basalt fiber (rock wool), and glass fiber, added in proportions of 0.33%, 0.66%, 1%, 2%, and 3% by weight.

Compression tests were performed, along with measurements of bulk density, apparent porosity, and water absorption. Additionally, X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) analyses were conducted on both the fibers and the sintered bricks. The XRD analysis showed that the fibers (refractory ceramic, basalt, and glass) present an amorphous structure before sintering. The size distribution analysis showed that the fibers have lengths in the range of 80 μm - 110 μm and a thickness between 1.5 μm - 7 μm . At 900°C, the refractory ceramic fiber did not melt, the basalt fiber partially melted, and the glass fiber melted completely starting at 700°C.

The compression strength test revealed that the brick with 0.33% by weight of refractory ceramic fiber achieved a 12.33% increase compared to the control. This result is due to the fact that the refractory ceramic fiber did not melt at 900°C, maintaining its mechanical properties, and the low fiber proportion prevented clumping in the brick matrix.

Contenido

Agradecimientos	III
Resumen	IV
Abstract	V
1. Introducción	1
2. Marco teórico	2
2.1. Ladrillo de arcilla.....	2
2.1.1. Definición.....	2
2.1.2. Historia de los ladrillos.....	2
2.1.3. Propiedades de los ladrillos de arcillas.....	3
2.1.4. Ventajas y desventajas de los ladrillos.....	4
2.1.5. Normatividad de los ladrillos de arcilla.....	5
2.1.6. Fabricación de los ladrillos artesanales de arcilla.....	6
2.2. Arcilla.....	6
2.2.1. Definición.....	6
2.2.2. Estados de presentación de las arcillas.....	7
2.2.3. Clasificación de arcillas en función de su color tras la cocción.....	8
2.2.4. Clasificación de arcillas en función de su temperatura de cocción.....	8

2.2.5.	Clasificación en función de la presencia de algún componente importante.	9
2.2.6.	Clasificación en función de sus minerales arcillosos.....	10
2.2.7.	Minerales arcillosos	10
2.2.8.	Minerales no arcillosos	16
2.3.	Fibras vítreas sintéticas	21
2.3.1.	Definición	21
2.3.2.	Diferencia entre fibra y lana	22
2.3.3.	Tipos de fibras.....	22
2.3.4.	Fibra cerámica refractaria	23
2.3.5.	Lana de vidrio	25
2.3.6.	Lana de roca.....	26
3.	Antecedentes	28
4.	Objetivos	31
4.1.	Objetivo general.....	31
4.2.	Objetivos específicos	31
5.	Metodología	32
5.1.	Material base.....	32
5.2.	Aditivos.....	33
5.3.	Diseño experimental	34
5.3.1.	Diseño de mezclas.....	35

5.3.2.	Cribado.....	35
5.3.3.	Mezclado.....	35
5.3.4.	Moldeado	36
5.3.5.	Secado	36
5.3.6.	Sinterizado	37
5.4.	Caracterización	38
5.4.1.	Difracción de Rayos X.....	38
5.4.2.	Microscopía electrónica de barrido.....	39
5.4.3.	Microscopía Óptica Digital.....	40
5.5.	Pruebas mecánicas	40
5.5.1.	Resistencia a la compresión.....	40
5.6.	Pruebas físicas.....	41
5.6.1.	Porosidad aparente, absorción de agua y densidad bulk.....	41
6.	Análisis y discusión de resultados.....	44
6.1.	Caracterización de fibras por DRX.....	44
6.2.	Caracterización de las fibras usadas como aditivo	45
6.3.	Caracterización de las fibras tratadas térmicamente a 900°C.....	48
6.3.1.	Caracterización microestructural del ladrillo adicionado con fibra.....	49
6.4.	Resistencia a la compresión	51
6.5.	Pruebas físicas.....	53

6.5.1. Porosidad aparente, absorción de agua y densidad bulk.....	53
7. Conclusiones	55
8. Trabajos a futuro	56
9. Glosario	57
10. Anexos	58
11. Referencias	60

Índice de figuras

Figura 1.- Ladrillo tradicional.....	2
Figura 2.- Arcillas en polvo. [10]	7
Figura 3.- Estructura de la caolinita (esquema). [13]	11
Figura 4.- Estructura simplificada de la caolinita. [13]	11
Figura 5.- Fotografía con microscopio electrónico de cristales de a) caolinita y b) dickita [14]	12
Figura 6.- Fotografía con microscopio electrónico de cristales de halloysita.[14].....	12
Figura 7.- Esquema estructural de la montmorillonita. [14].....	13
Figura 8.- Fotografía con microscopio electrónico de cristales de illita. [14].....	14
Figura 9.- Estructura simplificada de la illita. [13].....	15
Figura 10.- Estructura simplificada de la clorita. [13].....	15
Figura 11.- Vermiculita antes y después de expandirse. [14].....	16
Figura 12.- Fibras en forma: a) filamentos y b) lana. [18].....	22
Figura 13.- Tipos de fibras. [18].....	23

Figura 14.- a) Gráfica de resistencia a la compresión de ladrillos de Tulancingo y Actopan.[33] y b) Gráfica de ladrillos con lana de roca a diferentes cantidades y temperaturas. [34]	30
Figura 15.- Estratos de barro y arena fina de la región de Actopan-El Arenal, Estado de Hidalgo, México.	32
Figura 16.- Fibras utilizadas en el presente estudio en forma de lana y molidas en seco en mortero para obtener polvo. a) Fibra cerámica refractaria, b) fibra de basalto y c) fibra de vidrio.	33
Figura 17.- Metodología experimental general.....	34
Figura 18.- Material base.	35
Figura 19.- Batidora, marca Blazer, modelo B10.	36
Figura 20.- Moldeo por compresión manual de pasta cerámica para obtener probetas de ladrillo.	36
Figura 21.- a) Adobe fresco y b) Adobe seco.	37
Figura 22.- Horno de gas.	38
Figura 23.- a) Adobes secos y b) Ladrillos sinterizados a 900°C.....	38
Figura 24.- Difractómetro de Rayos X, marca INEL, modelo Equinox 2000.	39
Figura 25.- Microscopio Electrónico de Barrido, marca JEOL modelo JSM-IT300.	39
Figura 26.- Microscopio Óptico Digital, marca Keyence, modelo VHX-7000/7000N.....	40
Figura 27.- Máquina Universal, marca Instron, modelo 8802.....	41
Figura 28.- Difractogramas de las fibras utilizadas como aditivos.....	44
Figura 29.- Imágenes obtenidas con electrones secundarios (MEB) de los tres tipos de fibras: a) fibra cerámica refractaria, b) fibra de basalto, c) fibra de vidrio.	45
Figura 30.- Gráficas de distribución de tamaño de las fibras (diámetro- longitud): a) fibra cerámica refractaria, b) fibra de basalto y c) fibra de vidrio.	46

Figura 31.- Fibras antes y después de tratamiento térmico: a) fibra cerámica refractaria, b) fibra de basalto y c) fibra de vidrio.	48
Figura 32.- Imagen de MEB de la fibra de basalto tratada a 900°C.	49
Figura 33.- Imágenes obtenidas por microscopía óptica digital de ladrillo sinterizado a 900°C con 3% peso de fibra: a) sin adición de fibra, b) fibra cerámica refractaria, c) fibra de basalto, d) fibra de vidrio. 3) Partícula fundida.	50
Figura 34.- Resultados de pruebas de compresión.	52
Figura 35.- Resultados de: a) porosidad aparente, b) absorción de agua y c) densidad bulk como función del contenido de fibra en ladrillos sinterizados a 900°C.	54

Índice de tablas

Tabla 1.- Dimensiones de las fibras.	47
Tabla 2.- Análisis químico elemental de las fibras obtenido por EDS-MEB y su contenido estequiométrico de óxido.	47
Tabla 3.- Resultados de la prueba de resistencia a la compresión.	58
Tabla 4.- Resultados de porosidad aparente.	58
Tabla 5.- Resultados de absorción de agua.	59
Tabla 6.- Resultados de densidad bulk.	59

Introducción

Desde la antigüedad, diversas culturas han utilizado ladrillos en sus construcciones debido a sus propiedades. Civilizaciones como la mesopotámica desarrollaron técnicas de fabricación que sentaron las bases para su uso. Con el tiempo, estos bloques de arcilla sinterizada han evolucionado en diseño y composición, permitiendo la implementación de nuevas técnicas para mejorar sus características.

Actualmente, la búsqueda de alternativas para reutilizar residuos y mejorar las propiedades de los ladrillos ha cobrado gran relevancia ante la creciente preocupación por el impacto ambiental. En este contexto, el uso de materiales reciclados como refuerzos en elementos cerámicos surge como una estrategia innovadora para mejorar sus propiedades mecánicas y reducir la acumulación de desechos. En particular, la incorporación de fibras recicladas ofrece una doble ventaja: permite inertizar desechos que de otro modo podrían afectar el medio ambiente y la salud, y podría contribuir a mejorar las propiedades del ladrillo, como la resistencia a la compresión.

Este estudio se enfoca en el reforzamiento del ladrillo de arcilla mediante la incorporación de diferentes tipos de fibras recicladas. Establecer una metodología que permita reutilizar e inertizar fibras. El uso de fibras no solo aborda el desafío de reciclar materiales, sino que también tiene el potencial de mejorar las propiedades de los ladrillos, ofreciendo una alternativa viable.

Marco teórico

2.1. Ladrillo de arcilla

2.1.1. Definición

Los ladrillos son pequeñas piezas cerámicas en forma de paralelepípedo, formadas por tierras arcillosas, moldeadas, comprimidas y sometidas a una cocción. Pueden utilizarse en toda clase de construcciones por ser su forma regular y fácil su manejo [1]. (Ver Figura 1)



Figura 1.- Ladrillo tradicional

2.1.2. Historia de los ladrillos

El ladrillo de barro o adobe se inventó entre el año 10000 y el 8000 a.C., en Mesopotamia. Pero el mayor acontecimiento fue la invención del ladrillo cocido, aproximadamente en el año 3500 a.C., que permitió la construcción de estructuras permanentes en zonas donde anteriormente no había sido posible [2].

Los antiguos romanos construyeron muchos de sus grandes edificios con ladrillo. Podría afirmarse que el cambio en la utilización del ladrillo en época romana está más relacionado con los cambios en la fabricación y las técnicas de colocación. En China se desarrollaron métodos en la construcción del ladrillo que lo hizo más duro y más fuerte, un proceso que culminó con la construcción de la Gran Muralla [2].

Hacia el año 1200 d.C., el ladrillo se encontraba ya presente en toda Europa y Asia, desde el Atlántico al Pacífico. Mientras que el islam difundía las técnicas de fabricación y colocación del ladrillo a través del norte de África y de Asia Central [2].

En América, se desarrolló el ladrillo cocido para construir la ciudad maya de Comalcalco, fundada en el año 550 de nuestra era [3].

Desde el Renacimiento al siglo XVII, los avances tecnológicos que tuvieron lugar en Europa cambiaron la forma de empleo del ladrillo. Lo más importante es que resultaba más barato, por lo que su uso se extendió por todas las organizaciones sociales. En el siglo XVIII dio paso al inicio de la revolución industrial en Inglaterra. En Europa se empezaron a publicar libros donde se describen métodos para la fabricación del ladrillo y se desarrollaron técnicas que permitieron su producción a gran escala y su transporte a grandes distancias [2].

En siglo XIX con la introducción de la mecanización, el ladrillo se convirtió en el material estándar para la industria y el comercio, una tendencia que continuó hasta ya bien entrado el siglo XX [2].

En la actualidad, las nuevas técnicas en la manufactura y el empleo estructural del ladrillo prometen un apasionante futuro, lleno de diversidad y de posibilidades [2].

2.1.3. Propiedades de los ladrillos de arcillas

Es uno de los materiales indispensables más utilizados en la construcción. Al ser un elemento que soporta altas temperaturas durante su fabricación, el ladrillo es un material de alta resistencia y aislante, tanto acústico como térmico [4].

2.1.4. Ventajas y desventajas de los ladrillos

El ladrillo, tiene varias ventajas en comparación con otros materiales de construcción. Algunas de las ventajas más destacadas [5]:

- **Sostenibilidad ambiental:** a menudo se fabrican con materiales locales y naturales, lo que reduce la huella de carbono asociada con el transporte de materiales. Además, su proceso de fabricación tiende a ser menos intensivo en energía en comparación con otros materiales de construcción.
- **Estética y carácter:** pueden proporcionar una estética única y un carácter distintivo a las construcciones. La variabilidad en la textura, color y forma de estos ladrillos a menudo agrega un toque personalizado y atractivo a los edificios.
- **Aislamiento térmico y acústico:** tienen propiedades aislantes que pueden ayudar a regular la temperatura en el interior de los edificios. También pueden contribuir al aislamiento acústico, reduciendo la transmisión de sonidos entre espacios.
- **Durabilidad:** pueden resistir bien las inclemencias del tiempo y otros factores ambientales, manteniendo su integridad estructural.
- **Regulación de la humedad:** tienen la capacidad de absorber y liberar humedad de manera natural. Esto puede contribuir a regular la humedad interior y mejorar el confort en el espacio habitable.
- **Bajo mantenimiento:** debido a su durabilidad y resistencia, los ladrillos generalmente requieren poco mantenimiento a lo largo de su vida útil.
- **Compatibilidad con técnicas constructivas tradicionales:** son compatibles con técnicas constructivas tradicionales, lo que facilita su uso en proyectos que buscan mantener métodos constructivos antiguos o tradicionales.

- **Buena conductividad térmica:** los ladrillos tienen una buena conductividad térmica, lo que significa que pueden ayudar a regular la temperatura interior del edificio, contribuyendo al confort térmico.

Sin embargo, el uso de ladrillos tiene algunas desventajas [6].

Los ladrillos son pesados, lo que significa que la construcción con ladrillo requiere cimientos más fuertes y puede ser más costosa y laboriosa. Además, los ladrillos no son especialmente resistentes a los movimientos sísmicos, lo que los hace menos idóneos en zonas con alta actividad sísmica.

Además, los ladrillos son porosos, lo que los hace susceptibles a la humedad y el moho, que pueden provocar problemas de salud y reducir la vida útil del edificio.

2.1.5. Normatividad de los ladrillos de arcilla

La normatividad vigente en ladrillos puede variar dependiendo del país o región en la que se encuentre. A continuación, se mencionan algunas de las normas comunes en la fabricación y uso de ladrillos:

- **México:** En México, los ladrillos deben cumplir con la norma NMX-C-404-ONNCCE-2012, que establece las especificaciones y métodos de prueba para los ladrillos de arcilla. El valor mínimo requerido para la resistencia a la compresión es 6MPa [7].
- **Estados Unidos:** Los ladrillos deben cumplir con la norma ASTM C62-12, que establece las especificaciones para los ladrillos de arcilla cocida. El valor mínimo para la resistencia a la compresión es de 10.3 MPa [8].

Además, existen otras normas y regulaciones que pueden ser relevantes para la fabricación y su uso de ladrillos, como las normas de construcción y los códigos de construcción locales.

2.1.6. Fabricación de los ladrillos artesanales de arcilla

El proceso de fabricación del ladrillo no ha cambiado mucho a través del tiempo. Éste involucra una serie de pasos, iniciando con la extracción de la arcilla con herramienta básica como pico y pala. Posteriormente es el cribado, el cual se realiza con cribas de tamaño de apertura de 1 cm. y se sigue con el mezclado de la arcilla con agua. Después viene el moldeado con un molde de madera. Al terminar el moldeado, se deja secar el material y el tiempo de secado varía según las condiciones del clima (puede ser de 3 a 10 días) [9]. La cocción se realiza con hornos intermitentes, con capacidades máximas de 20,000 ladrillos; el tiempo promedio de cocción es de 20 horas. El combustible permitido en Hidalgo por la Semarnat es aserrín o gas. Por último, el almacenamiento se hace al aire libre a un lado del mismo horno.

2.2. Arcilla

2.2.1. Definición

Todos los productos cerámicos tradicionales (alfarería, vajillas, sanitarios, aisladores eléctricos, porcelana, etc.) Se emplean arcillas en la composición del soporte. Las arcillas son materiales económicos, muy abundantes, de fácil extracción y que aportan gran parte de las propiedades deseadas en estos productos, tanto en el proceso de elaboración/fabricación (plasticidad, resistencia mecánica en crudo y en seco, comportamiento en la cocción, compacidad, etc.) como en el producto acabado (color, porosidad adecuada, resistencia mecánica en cocido etc.) [10].

Las arcillas son productos naturales, no tratados previamente, que están formados por una mezcla de minerales arcillosos, como la caolinita, illita, etc. con otros que no lo son, como feldespatos, cuarzo, carbonatos, etc. [10]

2.2.2. Estados de presentación de las arcillas

- **En terrones:** Pueden estar extraídas de la cantera, sin ningún tratamiento previo, o bien pueden haber recibido una primera molienda, o trituración, con la que se rompen los terrones más grandes dejando los tamaños de los terrones por debajo de los 6 cm [10].
- **En polvo:** Son arcillas que han sido obtenidas directamente de la cantera por el uso de retroexcavadora o también que conllevan un proceso a una trituración en seco, generalmente con molinos de impacto y abrasión. Su distribución de tamaños puede variar, pero generalmente estará por debajo de 200 μm . [10]. Figura 2.



Figura 2.- Arcillas en polvo. [10]

- **Tratadas:** Se consideran “arcillas tratadas” aquellas que, por sus especiales características y usos se someten a procesos de eliminación de impurezas. Estos procesos generalmente incluyen separaciones mecánicas (tamizado, hidrociclones, etc.) lavado, filtropresado, extrusión y secado y son frecuentes en caolines y en algunas arcillas blancas empleadas en porcelana [10].

2.2.3. Clasificación de arcillas en función de su color tras la cocción.

Suelen clasificarse en tres grupos:

- **Arcillas blancas:** Son arcillas con contenidos en óxido de hierro (Fe_2O_3) inferiores al 2%.
Cuanto menor sea este contenido mayor será la blancura. Frecuentemente son arcillas con predominio de caolinita o caolinitica-illíticas. A su vez, entre las arcillas blancas se encuentran las arcillas caoliníferas entre las que suele distinguirse las ball clay, fire clay y flint clay [11].
 - **Ball clays:** Son arcillas caolinitica-illíticas de elevada plasticidad y dispersables en agua, en las que la caolinita se encuentra en un mayor grado de degradación cristalina, y en partículas de menor tamaño, que en el caso de los caolines.
 - **Fire clays:** Son arcillas más refractarias y compactas que las ball clays. Suelen contener más hierro que estas.
 - **Flint clays:** Su principal característica es su escasa plasticidad. Se trata de arcillas masivas y duras, constituidas principalmente por caolinita muy bien ordenada y cristalizada, con tamaños de partícula muy pequeños.
- **Arcillas claras:** Tienen un contenido en óxido de hierro comprendido entre el 2 y el 4% por lo que su color tras la cocción oscila desde el marfil al rojizo amarillento.
- **Arcillas rojas:** Tienen un contenido en óxido de hierro superior al 4%.

2.2.4. Clasificación de arcillas en función de su temperatura de cocción.

Se trata de una clasificación basada en una propiedad de gran importancia: la temperatura de cocción [11]. Se puede distinguir, según este criterio dos tipos de arcillas:

- **Arcillas fusibles:** Son arcillas en las que comienzan a fundir algunos componentes a temperaturas bajas, normalmente sobre los 1000 ° C o menos. Generalmente son arcillas illíticas con elevados contenidos de alcalinos y alcalinotérreos.
- **Arcillas refractarias:** Tienen una elevada resistencia térmica y comienzan a fundir algunos componentes a temperaturas superiores a 1400 ° C. Se pueden incluir en este grupo los caolines.

2.2.5. Clasificación en función de la presencia de algún componente importante.

Aparte de los minerales arcillosos (illita, caolinita, clorita, montmorillonita), los minerales que más influyen en las propiedades de uso de las arcillas empleadas en cerámica son el cuarzo, los carbonatos, los feldespatos y los minerales de hierro [11]. Por lo tanto, se debe recordar que en función de este criterio se encontrarán:

- **Arcillas silíceas:** Tienen un elevado contenido de cuarzo. El cuarzo disminuye la plasticidad y aumenta la refractariedad. Según su granulometría puede aumentar la compacidad.
- **Arcillas calcáreas:** Son arcillas con contenidos elevados de carbonato cálcico (entre el 10 y el 40 %). Se emplean en la fabricación de productos porosos y no deben emplearse para pastas compactas (lozas vidriadas, gres, gres porcelánico y porcelanas).
- **Arcillas ferruginosas:** Tienen contenidos en óxido de hierro superiores al 4 % y por tanto su color tras la cocción es rojizo. Lógicamente se emplean solo para las pastas rojas.

2.2.6. Clasificación en función de sus minerales arcillosos

Es una clasificación basada en un criterio mucho más técnico, a la vez que útil. Si se emplea esta clasificación más rigurosa, se puede dividir las arcillas en diferentes grupos según el mineral arcilloso predominante en cada una de ellas [11], arcillas illíticas, arcillas caoliníticas, arcillas montmorilloníticas, arcillas illíticas-caoliníticas, etc.

2.2.7. Minerales arcillosos

Son los minerales que por su composición y estructura podemos considerar como “arcillas puras”. Los minerales arcillosos habituales en las arcillas empleadas en cerámica son la caolinita, la illita, la clorita y, en menor cantidad, la montmorillonita. Tienen un tamaño de partícula muy pequeño y aportan a la composición de la pasta, entre otras propiedades, la plasticidad, por lo que se denomina también la “fracción plástica” de las arcillas [12].

Los minerales arcillosos se presentan en diferentes grupos mineralógicos tales como:

Grupo de la Caolinita

La caolinita está formada por hojas de capas atómicas: una capa de tetraedros Si – O y una capa dioctaédrica, con Al en el centro de los octaedros (ver figura 3). Estas hojas son eléctricamente neutras y están unidas arriba y abajo con otras hojas mediante fuerzas de Van der Waals y por puentes de hidrógeno [13].

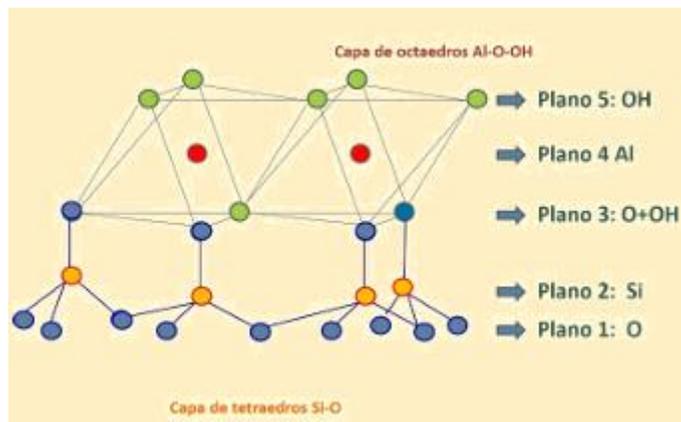


Figura 3.- Estructura de la caolinita (esquema). [13]

Si se cuentan los iones de cada una de las capas, se puede obtener la fórmula molecular de la caolinita (ver figura 4) [13].

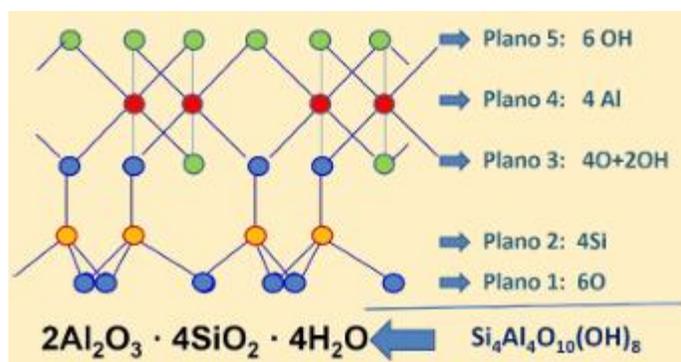


Figura 4.- Estructura simplificada de la caolinita. [13]

Fórmula molecular: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Del grupo de los caolines existen tres especies minerales que se distinguen, sobre todo, por sus diferentes condiciones de formación. La figura 5-a muestra a la *Caolinita* ($\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8\text{Al}_4$), formada a temperatura ambiente por meteorización de feldspatos y principal componente de los caolines de importancia técnica; la figura 5-b muestra a la *Dickita*, igual composición que la

caolinita, formada en condiciones hidrotermales; y *Nacrita*, originada a temperaturas superiores [14].



Figura 5.- Fotografía con microscopio electrónico de cristales de a) caolinita y b) dickita [14]

Grupo de la Halloysita

La estructura de la Halloysita está formada por estratos similares a los que tiene la caolinita, existiendo entre ellos una cantidad variable de moléculas de agua, que corresponden aproximadamente a la fórmula $\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8\text{Al}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ cuando el mineral está completamente hidratado. La Halloysita se deshidrata a temperaturas relativamente bajas, perdiendo toda el agua de manera irreversible y pasando a Metahalloysita, de estructura similar a la Caolinita. Los cristales son de aspecto tubular (ver figura. 6), cediendo y absorbiendo agua fácilmente mientras no se lleguen a la deshidratación completa. [14].

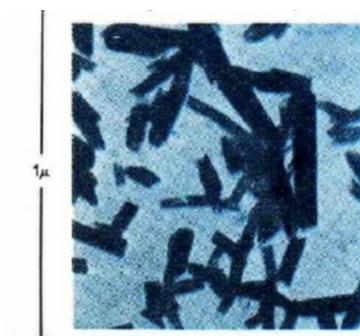


Figura 6.- Fotografía con microscopio electrónico de cristales de halloysita.[14]

Grupo de la Montmorillonita

Estos minerales, que sólo existen en partículas extremadamente pequeñas, están formados por estratos de dos capas de tetraedros SiO_4 unidas por Al, de manera que cada aluminio coordina con dos oxígenos libres de cada capa y con dos grupos OH. Se forma una nueva capa de octaedros en cuyos vértices hay cuatro oxígenos y dos grupos OH (ver figura 7). Entre los estratos se sitúan cationes y moléculas de agua, pudiendo separarse o acercarse de manera reversible, al aumentar o disminuir la cantidad de cationes y su tamaño o bien la cantidad de agua absorbida. Se presenta en masas suaves, que se hinchan con el agua, pero no llegan a ser plásticas, a diferencia de la caolinita [14].

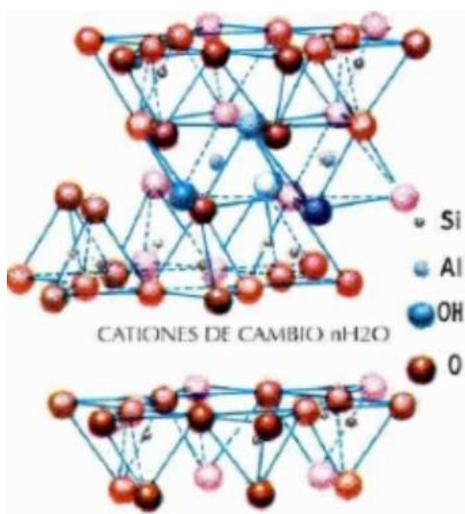


Figura 7.- Esquema estructural de la montmorillonita. [14]

Grupo de la Illita

Minerales que pueden incluirse en el grupo de las micas, diferenciándose por presentarse siempre en partículas muy pequeñas y no tan bien cristalizadas (ver figura 8). Su estructura es muy semejante a la de la Moscovita [14].

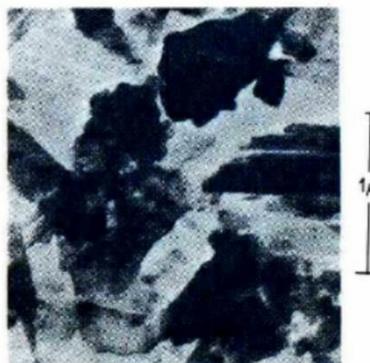


Figura 8.- Fotografía con microscopio electrónico de cristales de illita. [14]

La illita está formada por hojas de tres capas: una capa de tetraedros Si – O, una capa central dioctaédrica, con Al en el centro de los octaedros, y una tercera capa tetraédrica (ver figura 9). En esta estructura es habitual que se presenten, en mayor o menor grado, sustituciones isomorfas de cationes. Las más comunes son: algunos cationes Si^{4+} son sustituidos por cationes Al^{3+} ; algunos Al^{3+} por Fe^{3+} o Mg^{2+} ; algunos Mg^{2+} por Fe^{2+} o Al^{3+} . Cuando la carga del catión introducido es menor que la del catión original, se genera un exceso de carga negativa sobre la superficie de la hoja que ha de ser compensada para que exista electroneutralidad. Esta compensación puede darse por cationes externos situados entre las hojas (K^+ o Na^+) [13].

Fórmula molecular: $\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

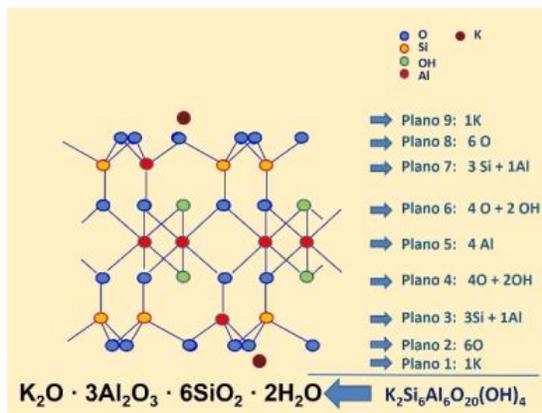


Figura 9.- Estructura simplificada de la illita. [13]

Grupo de la clorita

La clorita está formada por 4 capas por hoja. Se entiende bien su estructura si se observa que puede formarse adicionando una capa trioctaédrica (planos 1, 2 y 3) a la estructura de talco, que se forma mediante dos capas de tetraedros Si-O y una capa trioctaédrica (ver figura 10). En las capas trioctaédricas, los huecos de los octaedros están rellenos por cationes Mg^{2+} [13].

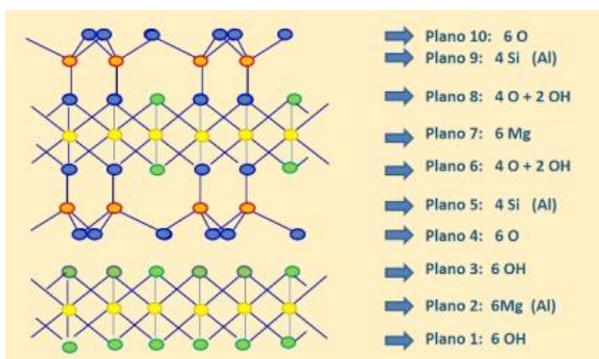


Figura 10.- Estructura simplificada de la clorita. [13]

En las cloritas el catión Mg^{2+} puede sufrir sustituciones por Al^{3+} , Fe^{2+} y Fe^{3+} , y, por su parte, el Si^{4+} por Al^{3+} . De este modo, la hoja de talco tiene una carga neta negativa mientras que la capa

trioctaédrica (brucita) tiene una carga positiva, lo que permite la unión entre ambas por enlace iónico [13].

Grupo de la Vermiculita

Minerales procedentes, por pérdida de álcalis y ganancia de agua, de micas de las más variadas especies. Todos ellos tienen la propiedad de hojaldrarse y curvarse en forma de gusano por el calor (ver figura 11) [14].



Figura 11.- Vermiculita antes y después de expandirse. [14]

2.2.8. Minerales no arcillosos

Los más frecuentes son el cuarzo, los feldspatos y los carbonatos. En menor cantidad también puedes encontrar minerales de hierro, materia orgánica y pequeñas cantidades de yeso y otros minerales. Tienen un tamaño de partícula variable, aunque mucho mayor que los minerales arcillosos y en general no aportan plasticidad, por lo que se denomina “fracción no plástica” [12].

Cuarzo

La sílice libre presente en las arcillas se presenta, generalmente, en forma de cuarzo procedente de la roca madre que dio origen al material arcilloso [15].

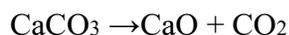
El cuarzo reduce la plasticidad y aumenta la refractariedad de las arcillas y de las composiciones de pastas en las que interviene. Una cantidad excesiva de cuarzo libre, acompañado de un enfriamiento demasiado rápido, puede producir unas roturas características en el enfriamiento,

denominadas “desventado” motivadas por las tensiones generadas en la transformación alotrópica del cuarzo β en cuarzo α que ocurre a 573 ° C. α -cuarzo \leftrightarrow β -cuarzo

Carbonatos

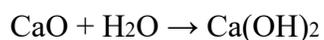
La presencia de carbonatos en las arcillas influye de manera importante en las propiedades de ésta, en su comportamiento en los procesos cerámicos y en las características de los productos elaborados. Las arcillas empleadas pueden contener *calcita* (CaCO_3) y, en menores proporciones, *magnesita* (MgCO_3) y *dolomita* (CaO.MgO.2CO_2). En general, los carbonatos presentan reacciones de descomposición a diferentes temperaturas con desprendimiento de CO_2 [15].

El *carbonato cálcico* descompone, sobre los 900 ° C, de acuerdo con la siguiente reacción:



Cuando las partículas de carbonato son pequeñas la reacción suele ser completa y el óxido de calcio resultante reacciona posteriormente con otros componentes de la pasta para dar silicoaluminatos de calcio como son: *pseudowollastonita* (CaO.SiO_2), *gelenita* ($2\text{CaO.Al}_2\text{O}_3.\text{SiO}_2$) y *anortita* ($\text{CaO.Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2$). Estas fases cristalinas dan a los soportes cocidos una mayor estabilidad dimensional y una baja reactividad con el agua, lo que hace que su expansión por humedad sea baja, y por tanto evita el cuarteo diferido por hidratación [15].

Si las partículas son de mayor tamaño, la reacción de descomposición puede ser incompleta o puede también suceder que el CaO no reaccione completamente quedando un núcleo de CaO que posteriormente se hidrate:



El hidróxido de calcio se forma con una reacción fuertemente exotérmica (con desprendimiento de calor) que hace que, si el grano de carbonato ocupaba una posición próxima a la superficie, se

desprenda parte del soporte y quede a la vista el hidróxido de cal formado. Este defecto se conoce como “caliche” [15].

Feldespatos

El nombre de feldespato corresponde a un grupo extenso de minerales formados por silicatos de aluminio combinados en sus tres formas: potásicos, sódicos y cálcicos. La fórmula química del feldespato es $XAlSiO_8$, donde la X puede ser Sodio (Na), Potasio (K) o Calcio (Ca). Cuando la relación entre aluminio y silicio es en la misma proporción, el feldespato se clasifica como feldespatoide, cuando en la relación hay mayor porcentaje de silicio, el mineral mantiene la clasificación de feldespato [16].

Ortoclasa

A esta serie corresponden los feldespatos potásicos ($KAlSi_3O_8$), los cuales se caracterizan por proporcionar mayor resistencia, reducir la conductividad eléctrica, mejorar la dureza, durabilidad y módulo de ruptura; así como ajustar la resistencia a la tensión y la elasticidad.

Fundamentalmente se usan en la fabricación de porcelanas. También es utilizada en la elaboración de esmaltes para pintar sobre porcelanas y en la fabricación de textiles. El feldespato potásico está compuesto de óxidos de silicio, aluminio y potasio principalmente, y es utilizado en aplicaciones donde se requiere mayor resistencia y menor conductividad eléctrica [16].

Plagioclasa

Serie a la que corresponden los feldespatos sódico-cálcicos forman una serie isomorfa continua que separa dos especies minerales [de anortita ($CaAl_2Si_2O_8$) hasta albita ($NaAlSi_3O_8$)]. Es un

fundente poderoso y altamente reactivo, mejora la resistencia a la flexión y al impacto, incrementa la resistencia a los esfuerzos, añade dureza, durabilidad y brillo [16].

De acuerdo al contenido de SiO_2 , éstas se denominan ácidas, intermedias y básicas. El feldespato sódico está compuesto principalmente por óxidos de silicio, aluminio y sodio, y es preferido por su menor precio y buen funcionamiento como fundente [16].

Minerales de hierro

El color en crudo y en cocido de las arcillas depende en gran medida de su contenido en minerales de hierro. Las arcillas con bajos contenidos en minerales de hierro tienen colores en crudo que van del blanco a grises oscuros e incluso negro en función de su mayor o menor contenido en materia orgánica. Tras la cocción estas arcillas son blancas (0 a 0,5 % en Fe_2O_3) o pardas amarillentas (hasta aproximadamente un 2 % en Fe_2O_3). Las arcillas con altos contenidos en minerales de hierro (superior a un 4 % de Fe_2O_3) presentan en crudo colores desde rojizos a verdosos según la cantidad de materia orgánica contenida en la arcilla. Si el mineral de hierro predominante es la *limonita* ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) la arcilla cruda tiene colores amarillentos, aunque tras la cocción presentan tonalidades rojizas, ya que los minerales de hierro, a partir de 200°C y en atmósferas oxidantes se transforman en *hematita*. Durante la cocción, el hierro disuelto se incorpora a la fase vítrea y durante el enfriamiento cristaliza la hematita y los compuestos de titanio – hierro [15].

Los minerales de hierro presentes en las arcillas son: *hematita* (Fe_2O_3), *magnetita* (Fe_3O_4), *limonita* ($\text{Fe}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$), *Goetita* ($\alpha\text{-FeO}(\text{OH})$), *Siderita* (FeCO_3), *Pirita*: (Fe_2S)

La *limonita* es frecuente en las arcillas. Durante el calentamiento, este mineral pierde agua y forma el óxido de hierro (III) responsable del color rojo tras la cocción. La *hematita*, en cambio, no es frecuente en las arcillas sometidas a la acción de los agentes atmosféricos, ya que se hidrata fácilmente a limonita. Las *piritas* son sulfuros de hierro que en su descomposición originan

defectos puntuales, como pinchados, cráteres, etc. similares al originado por partículas carbonosas o por descomposición de carbonatos de hierro. Al igual que en los carbonatos, este defecto se incrementa con el aumento del tamaño de partícula [15].

Materia orgánica y residuos carbonosos.

Las arcillas empleadas en las formulaciones de pastas cerámicas suelen contener algo de materia orgánica como impureza procedente de un proceso de carbonización de los restos de materia vegetal. Puede presentarse. Principalmente, como ácido húmico y carbón en tamaños de partícula sumamente pequeños (estado coloidal), adsorbidas sobre las partículas arcillosas y por tanto su presencia implica un aumento de la plasticidad y de la resistencia mecánica en seco de la arcilla.

La materia orgánica contenida en las arcillas actúa como generadora de H_2 y CO que reducen el Fe_2O_3 de color rojizo a FeO , de color pardo oscuro, pudiendo con ello provocar un característico núcleo oscuro en las piezas cocidas denominado “corazón negro” y los defectos asociados a él, tales como pinchados, cambios de tono o deformaciones pirolásticas [15].

Minerales de titanio.

El titanio se encuentra en las arcillas en forma de óxido, bien como *rutilo* o como *anatasa* (TiO_2), o también como impureza de otros minerales. Suele estar presente en bajos porcentajes y actúa reforzando la coloración del hierro por formación de una espinela coloreada con este [15].

Sales solubles.

Generalmente son de naturaleza sulfurosa como por ejemplo el yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) y el sulfato de magnesio ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$). El sulfato de calcio no descompone hasta $1100\text{ }^\circ\text{C}$ por lo que en productos cocidos a menor temperatura permanece inalterado, de manera que con la humedad la

solución salina migra y se acumula en la superficie donde tras evaporación del agua cristaliza al superar su concentración de saturación. Este depósito de sales se denomina eflorescencias.

Las sales solubles presentes en las arcillas pueden provocar también diversos problemas como formación de velos durante el secado que provoquen una falta de adherencia del esmalte como recogido o descascarillado [15].

Minerales de flúor.

Presentes como *fluorita* (CaF_2), representan un importante contaminante de las arcillas, ya que los compuestos de flúor tienen una elevada reactividad. El cuarzo es atacable por el flúor dando lugar a la formación de productos volátiles como el tetrafluoruro de silicio (SiF_4) y el ácido fluorhídrico (HF) [15].

2.3. Fibras vítreas sintéticas

2.3.1. Definición

Las fibras vítreas sintéticas son un grupo de materiales inorgánicos fibrosos que contienen silicatos de aluminio o de calcio, y se fabrican de roca o piedra, arcilla, escoria o vidrio. No ocurren naturalmente en el ambiente, pero se usan extensamente como aislantes térmicos y contra ruido, y para reforzar otros materiales de construcción. Hay tres clases de fibras vítreas sintéticas: 1) fibras de vidrio, incluyendo lana de vidrio y filamento de vidrio continuo, 2) lana mineral, que contiene lana de piedra y lana de escoria, y 3) fibras refractarias de cerámica. [17]

2.3.2. Diferencia entre fibra y lana

La fibra es un material aislante fabricado a partir de finas hebras. En cambio, la lana se refiere específicamente a una de las formas en las que se presenta la fibra. Ver figura 12

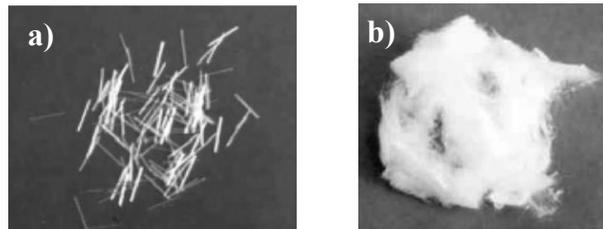


Figura 12.- Fibras en forma: a) filamentos y b) lana. [18]

2.3.3. Tipos de fibras

Existen varios tipos de fibras que pueden clasificarse de diversas maneras. En la figura 13 se presenta una clasificación, según su origen y naturaleza. Para esta investigación nos enfocaremos en las fibras vítreas sintéticas (fibra cerámica refractaria, fibra de basalto y fibra de vidrio).

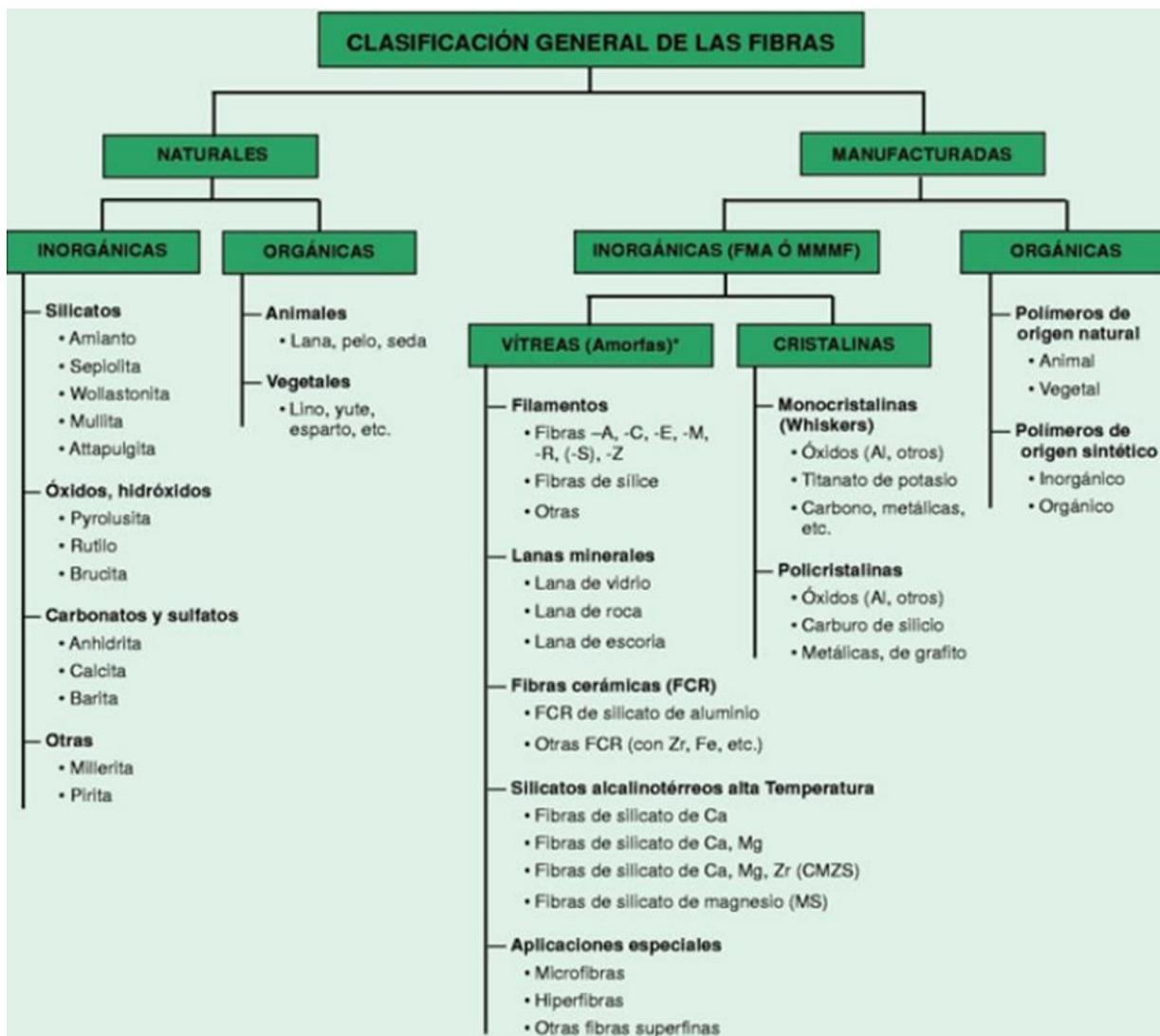


Figura 13.- Tipos de fibras. [18]

2.3.4. Fibra cerámica refractaria

La fibra cerámica refractaria, se elabora a base de sílice y óxido de aluminio fundido y puede llevar otros óxidos (circonio, hierro, magnesio) en cantidades minoritarias. Estas fibras presentan una elevada resistencia a las temperaturas más altas, donde las lanas de aislamiento (lana mineral y fibra de vidrio) no son eficaces [19].

Los métodos más comunes de elaboración de fibra cerámica refractaria son el soplado (blowing method) y el formado por fuerza centrífuga (spinning method). Ambos procesos empiezan de igual manera mezclando la materia prima (principalmente alúmina y sílica) para posteriormente fundirla y pasarla a uno de los 2 métodos de formado [20].

Algunas fibras son las siguientes: (16)

- Fibras de baja biopersistencia Superwool[®] (LBP)
 - Fibras Alcalinotérreas (AES):
 - Superwool Plus - Temperatura de clasificación de 1200°C
 - Superwool Prime - Temperatura de clasificación de 1300°C
 - Fibras de silicatos alcalinos de potasio (PAS)
 - Superwool XTRA - Temperatura de clasificación de 1450°C
- Fibras cerámicas refractarias:
 - Kaowool[®] - Temperatura de clasificación de 1260°C
 - Cerablanket[®] - Temperatura de clasificación de 1260°C
 - Cerachem[®] - Temperatura de clasificación de 1430°C
- Fibras de lana policristalina
 - Denka[®] y Maftec[®] - Temperatura de clasificación de 1600°C

Características

Excelente rendimiento aislante, excelente estabilidad térmica, bajo almacenamiento de calor, mantas duras, resistentes y fuertes, que resisten desgarrar tanto antes como después del calentamiento, resistencia al choque térmico, buenas propiedades acústicas, no hay emisión de humo debido al quemado del aglutinante [21].

Aplicaciones

Aislamiento de chimeneas industriales y comerciales, revestimientos de hornos, calderas y calentadores, envoltura de tuberías, aplicaciones de metales como cubiertas para lavadoras, etc [21].

2.3.5. Lana de vidrio

Definición

La Fibra de Vidrio o Lana de Vidrio se fabrica a partir de arenas, silicatos y boratos, elementos naturales que dan como resultado un producto incombustible dotado de las características necesarias para funcionar como un eficiente aislante termoacústico [22].

Proceso de fabricación

Se comienza fundiendo a una temperatura de 1450°C una mezcla de arena natural, aditivos y vidrio reciclado. El vidrio obtenido es convertido en fibras. La cohesión y resistencia mecánica del producto se obtiene rociando millones de filamentos con una solución aglutinante que adhiere a las fibras entre sí. La masa de fibras embebidas en el aglutinante es calentada a una temperatura de unos 200°C para polimerizar la resina y es curada para darle resistencia y estabilidad. La etapa final comprende el corte de la lana y el empaclado en rollos o paneles a alta presión previo a paletizar el producto terminado, para facilitar su transporte y almacenamiento [23].

Productos de fibra de vidrio convencionales

Rollos de baja densidad y colchas flexibles para muros de oficina e industrias, rollos de fibra de vidrio para altas temperaturas, rollos Duct Liner para aislar conductos de aire acondicionado, placas de fibra de vidrio para tratamientos acústicos y térmicos), colchas de fibra de vidrio para

aislar tuberías y equipos industriales, medias Cañas de lana de vidrio y rollos Metal Building Insulation para techos de naves industriales [22].

Ventajas: Eficiencia térmica, resistente a la vibración, no favorece la corrosión, fácil de instalar y manejar, incombustible [22].

2.3.6. Lana de roca

Los productos de Lana Mineral y de Lana de Roca son aislamientos térmicos y acústicos. Su origen mineral y composición química aseguran una perfecta estabilidad a altas temperaturas (650°C / 1100°F). Son químicamente inertes y resistentes a los agentes externos. Sus características los hacen resistentes a vibraciones y son estables aún en medios húmedos. No poseen contraindicaciones de ninguna índole por razones de higiene y seguridad, ni exigen precauciones especiales para su uso [24].

Proceso de fabricación

La lana de roca es un aislamiento mineral, que se forma por dos materias primas que son: las rocas basálticas (de origen volcánico) y el mineral coque (carbón)

Estos dos minerales se funden en unos hornos especiales que permanecen constantemente a una temperatura superior a 1500°C, una vez que llegan a la temperatura de fusión y están en estado líquido, se deshilan en forma de fibras, para posteriormente ser transformado en diferentes formatos (placas, rollos, a granel) y densidades que le conferirá a cada producto su prestaciones térmicas o acústicas [25].

Usos recomendados

Aislamiento contra incendio, calderas, hornos, ductos, tanques, tubería de vapor, contenedores, principalmente [24].

Ventajas

Máxima eficiencia Térmica, No Favorecen la corrosión, Ahorro directo en el consumo de energía, Reducen el ruido y la emisión de contaminantes al medio ambiente, Fácil aplicación y manejo [24].

Antecedentes

La utilización de fibras cerámicas como refuerzo de materiales ha sido particularmente destacada para materiales cerámicos avanzados, donde su incorporación mejora significativamente las propiedades de los materiales. La investigación sobre la incorporación de fibras como aditivos o sustitutos en la fabricación de materiales reforzados está en constante crecimiento. A lo largo de los años, diversos estudios han demostrado que este tipo de aditivos pueden mejorar significativamente las propiedades de los materiales. Entre los avances, encontramos el uso de compuestos como el diboruro de titanio-carbono con fibras cortas de carbono [26], así como la lana de vidrio en la producción de cerámicas a base de arcilla y residuos [27]. Otros ejemplos incluyen los compuestos de matriz de sílice reforzados con fibra de alúmina [28] y los composites tridimensionales de carburo de zirconio reforzados con fibra de carbono [29].

Además, en los cerámicos tradicionales, como el concreto, se ha comenzado a incorporar fibras de polipropileno y fibras metálicas para mejorar sus propiedades y aumentar su resistencia [30]. Esta tendencia ha abierto nuevas posibilidades en la fabricación de materiales más resistentes y sustentables.

Algo importante se da en los adobes, donde se ha descubierto que la adición de fibras naturales al material base puede mejorar considerablemente sus características. El uso de fibras de plátano [31], yute [31], cebada [31], mijo [31] y palma [32] ha mostrado un notable aumento en la resistencia a la compresión, tensión y flexión, lo que reafirma la posibilidad de emplear estos materiales. Esta tendencia ha abierto nuevas posibilidades en la fabricación de materiales más resistentes y sustentables.

El uso de fibras cerámicas en la fabricación de ladrillos es reciente y limitado. En un estudio realizado en el Laboratorio de Cerámicos de la UAEH por Palmas (2020) se descubrió algo

interesante. Tras analizar el material de Tulancingo, Hidalgo con el que se fabrican los ladrillos de esa región, se encontró que contenía fibra de asbesto (magnesio-riebeckita) de manera natural, en una proporción aproximada del 3% en peso. Esta característica podría explicar la alta resistencia observada en los ladrillos porosos fabricados con un 20% de aserrín. En la figura 14-a se muestran los resultados de los ladrillos de Tulancingo. Para efectos de comparación, también se muestran los resultados de ladrillos fabricados con material de otra región de Hidalgo (Actopan-El Arenal) cuando se le agrega la misma cantidad de aserrín con la que se fabrican los ladrillos de Tulancingo, en donde se nota el efecto conocido que tiene el aserrín de disminuir la resistencia debido a la creación de porosidad [33]

Otro estudio reciente, realizado en 2023 por S. Korpayev et al., se reportó el uso de residuos de fibra de basalto, también conocida como lana de roca, como sustituto parcial de la arcilla en la fabricación de ladrillos. Las proporciones fueron: M1 (arcilla 95% y lana de roca 5%), M2 (arcilla 90% y lana de roca 10%), M3 (arcilla 87.5% y lana de roca 12.5%) y M4 (arcilla 87.5% y lana de roca 12.5%) en peso. Los resultados indicaron una disminución en la resistencia de los ladrillos, aunque se mantuvieron dentro de los parámetros establecidos por la norma ASTM C62. En la figura 14-b se muestran los resultados de los ladrillos con lana de roca (fibra de basalto) a diferentes temperaturas [34].

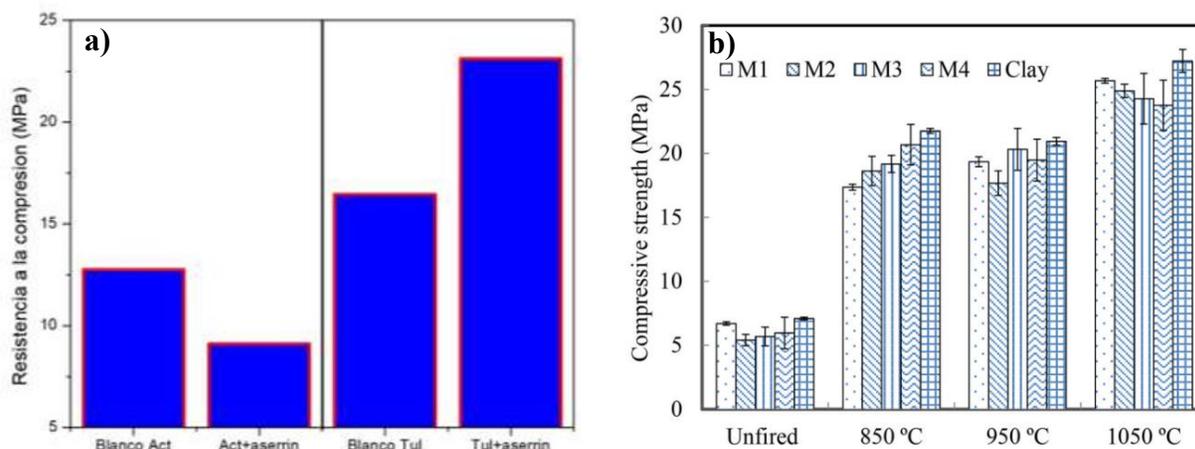


Figura 14.- a) Gráfica de resistencia a la compresión de ladrillos de Tulancingo y Actopan.[33] y b) Gráfica de ladrillos con lana de roca a diferentes cantidades y temperaturas. [34]

Estos resultados, aparentemente contradictorios, resaltan la necesidad de continuar explorando la relación entre las fibras cerámicas y las propiedades mecánicas de los ladrillos.

Finalmente, es crucial destacar que la utilización de fibras recicladas en la fabricación de ladrillos no solo representa una estrategia para mejorar las propiedades de los materiales cerámicos tradicionales, sino también una forma para reducir residuos. A medida que la investigación avanza, nuevas ideas para crear materiales más sustentables y resistentes, abren un futuro lleno de posibilidades para la construcción. En el presente trabajo se pretende conocer más al respecto, utilizando diferentes cantidades y tipos de fibras cerámicas para entender mejor su efecto en la resistencia de ladrillos.

Objetivos

4.1. Objetivo general

Reforzar ladrillo base arcilla mediante la incorporación de fibra cerámica reciclada, sinterizado a 900°C.

4.2. Objetivos específicos

- Determinar el contenido óptimo de fibra cerámica en el reforzamiento del ladrillo para alcanzar la resistencia máxima.
- Determinar el efecto en la resistencia del ladrillo con diferentes tipos de fibras utilizadas.

Metodología

5.1. Material base

El material base utilizado en este proyecto de investigación fue barro y arena, fueron obtenidos en la región de Actopan - El Arenal, en el estado de Hidalgo. Las coordenadas geográficas de la ubicación son 20°13'26.3"N y 98°54'57.4"O. En la figura 15 se muestran los estratos del material (barro - arena fina). Las proporciones utilizadas fueron 40% de barro, 60% arena fina y 27% de agua estas cantidades se tomaron como las óptimas para este particular material [35].

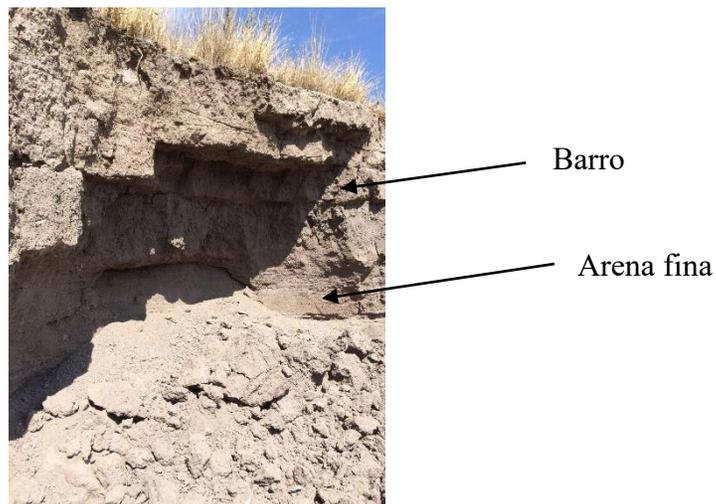


Figura 15.- Estratos de barro y arena fina de la región de Actopan-El Arenal, Estado de Hidalgo, México.

5.2. Aditivos

Se utilizaron tres diferentes tipos de fibra cerámica: a) Fibra cerámica refractaria silicoaluminosa Cerachem® de la empresa Thermal Ceramics del Grupo Morgan. Esta fibra es utilizada en aplicaciones de hasta 1400°C en diferentes industrias como la petrolera, cementera, minera, etc.; b) Fibra de basalto en su presentación comercial de lana de roca, ampliamente utilizada en la industria de la construcción de casas de madera como aislante acústico y térmico; c) Fibra de vidrio obtenida como residuo de colchoneta de lana. En la figura 16 se muestran los diferentes tipos de fibra (fibra cerámica refractaria, fibra de basalto y fibra de vidrio) en forma de lana y molidas en seco en un mortero de porcelana.

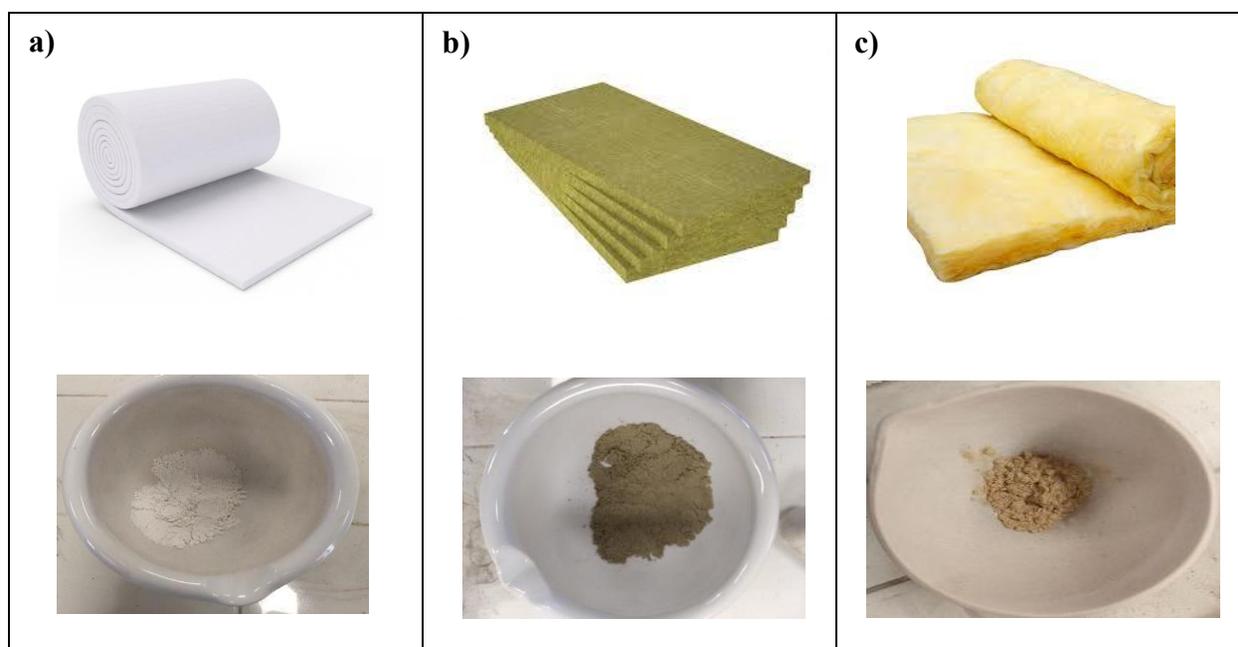


Figura 16.- Fibras utilizadas en el presente estudio en forma de lana y molidas en seco en mortero para obtener polvo. a) Fibra cerámica refractaria, b) fibra de basalto y c) fibra de vidrio.

5.3. Diseño experimental

Para explicar el desarrollo experimental de la investigación se presenta un diagrama de flujo (ver la figura 17).

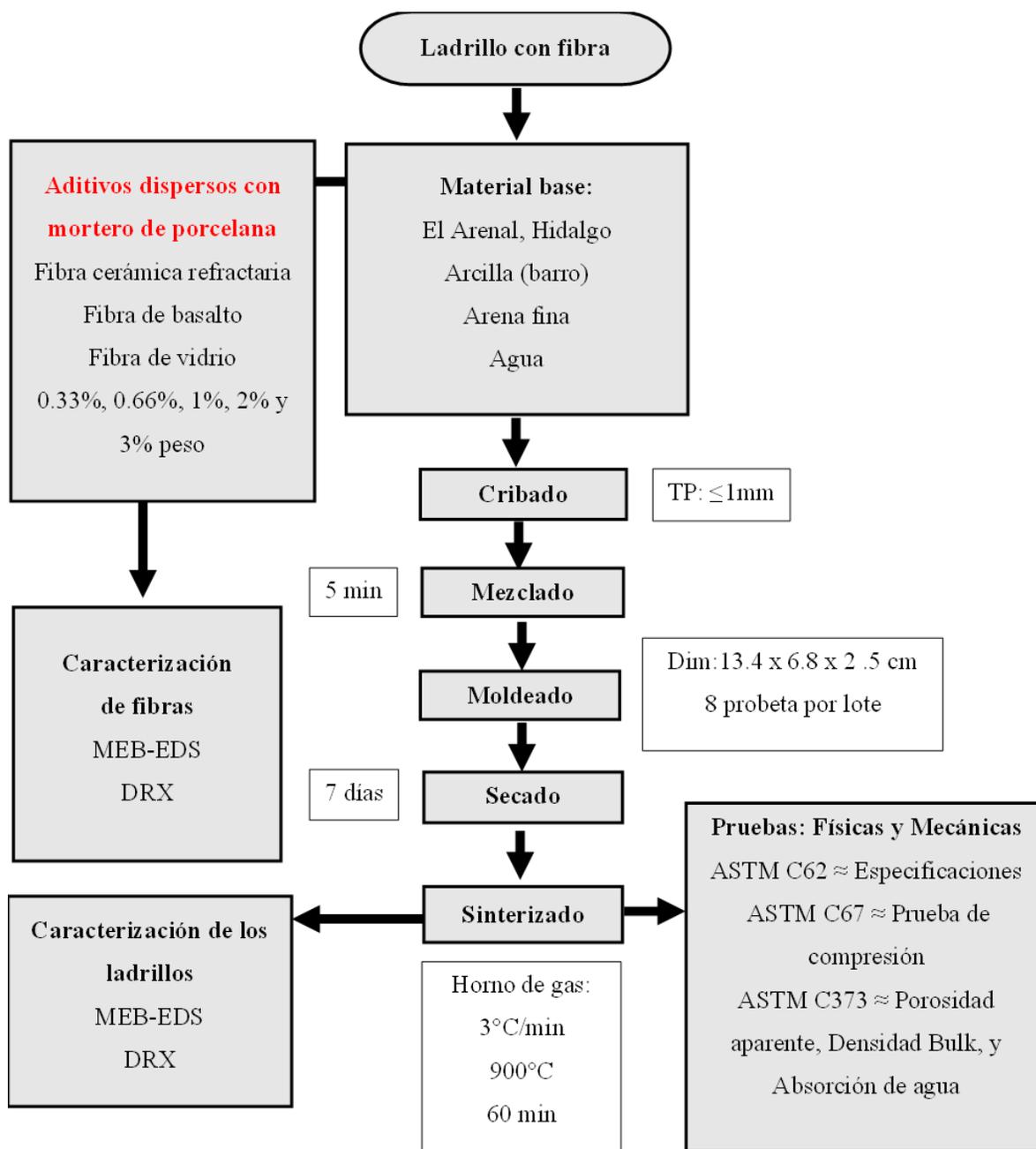


Figura 17.- Metodología experimental general

5.3.1. Diseño de mezclas

Los ladrillos se fabricaron en lotes, utilizando diferentes tipos de fibras y contenidos para cada mezcla. Se emplearon fibra cerámica refractaria, de basalto y de vidrio en los siguientes contenidos: 0.33 %, 0.66 %, 1 %, 2 % y 3 % en peso. Además, se hizo ladrillos sin fibra (blancos).

5.3.2. Cribado

El barro y la arena fina contenía grandes terrones por lo cual fue necesario desaglomerarlos con un molino chileno. Posteriormente se cribaron dichos materiales en una malla de acero para obtener aglomerados finos con tamaños menores a 1mm. así como se muestra en la figura 18.



Figura 18.- Material base.

5.3.3. Mezclado

Después los materiales base (barro – arena fina) fueron mezclados con las fibras en una batidora de la marca blazer modelo B10 con una capacidad de 5kg, mostrada en la figura 19, la mezcla fue batida en un tiempo de aproximadamente 5 min esto para obtener una pasta homogénea.



Figura 19.- Batidora, marca Blazer, modelo B10.

5.3.4. Moldeado

Posteriormente la mezcla fue agregada a cada cavidad del molde de acero mostrado en la figura 20. La mezcla fue comprimida manualmente en cada cavidad cuyas dimensiones fueron 13.4 cm x 6.8 cm x 2.5 cm. la pasta comprimida se dejó reposar durante un día antes de retirar los moldes.



Figura 20.- Moldeo por compresión manual de pasta cerámica para obtener probetas de ladrillo.

5.3.5. Secado

Las probetas después de ser desmoldadas fueron pulidas con un paño húmedo para quitar los defectos en la superficie del ladrillo además fueron colocadas de lado en un tiempo de 7 días en temperatura ambiente como se muestra en la figura 21.

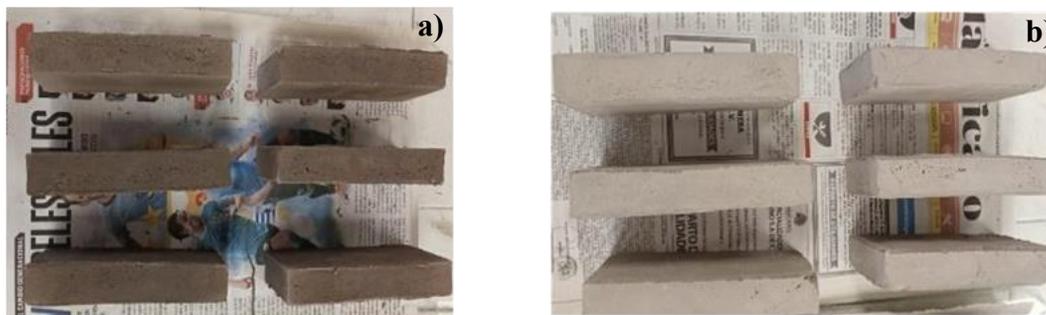


Figura 21.- a) Adobe fresco y b) Adobe seco.

5.3.6. Sinterizado

Finalmente, los ladrillos ya secos fueron sinterizados en un horno de gas como la figura 22. El horno consta de una canastilla de acero que contiene lana de fibra cerámica refractaria de alta temperatura. La tapa del horno también tiene una pared de fibra cerámica refractaria. En el fondo del horno se cuenta con una placa de cordierita que es la que soporta la carga a sinterizar. Dicha placa está sostenida por cuatro bases de ladrillo refractario. La placa de cordierita recibe directamente la flama de gas, distribuyendo homogéneamente el calor por todo el horno. Para medir la temperatura se utilizó un termopar tipo K y un termómetro digital. El control del flujo de gas se hizo con un regulador de alta presión y una válvula de aguja. Para sinterizar las piezas de estudio se manejó una rampa de calentamiento $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ hasta alcanzar una temperatura de 900°C manteniendo esa temperatura por 60 minutos. Posterior a ese tratamiento, se apagó el horno y se dejaron las piezas dentro del mismo. En la figura 23 se muestran los ladrillos colocados antes y después de la sinterización.



Figura 22.- Horno de gas.

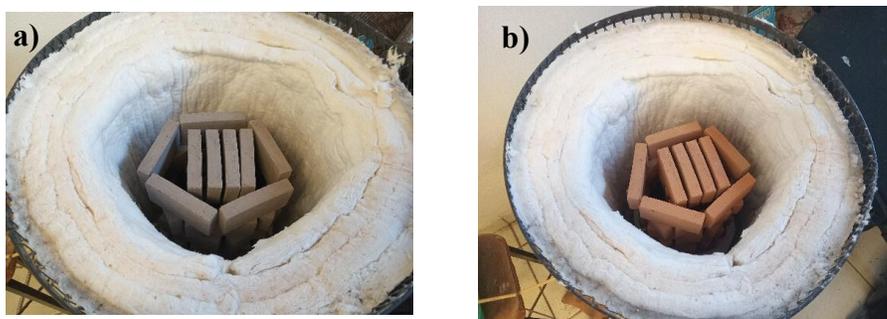


Figura 23.- a) Adobes secos y b) Ladrillos sinterizados a 900°C.

5.4. Caracterización

5.4.1. Difracción de Rayos X

La identificación de fases de los materiales iniciales fue hecha con un difractómetro de rayos X (DRX), marca INEL, modelo Equinox 2000 (ver figura 24). El DRX cuenta con una fuente de radiación de $\text{Co K}\alpha 1$. Dicho equipo está ubicado en el Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.



Figura 24.- Difractómetro de Rayos X, marca INEL, modelo Equinox 2000.

5.4.2. Microscopía electrónica de barrido

Para observar la morfología y topografía de las fibras y de los ladrillos se empleó el Microscopio electrónico de barrido. Se utilizó un MEB de la marca JEOL modelo JSM-IT300 (figura 25) ubicado en la Escuela Superior de Apan de la UAEH. Se utilizó la técnica de Espectroscopia de Energía Dispersiva (EDS) acoplada en el MEB para identificar la composición elemental de los materiales.

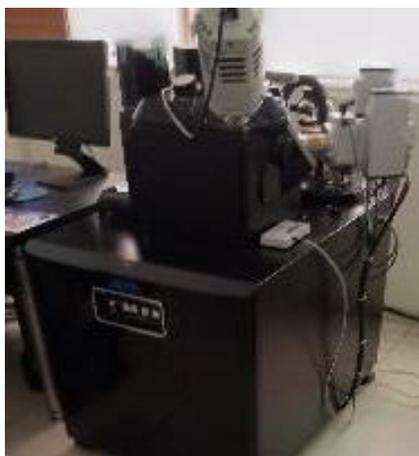


Figura 25.- Microscopio Electrónico de Barrido, marca JEOL modelo JSM-IT300.

5.4.3. Microscopía Óptica Digital

Los ladrillos con fibras fueron observados por un microscopio óptico digital, marca Keyence, modelo VHX-7000/7000N (ver figura 26). Dicho equipo está ubicado en la Unidad de laboratorios de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.



Figura 26.- Microscopio Óptico Digital, marca Keyence, modelo VHX-7000/7000N.

5.5. Pruebas mecánicas

5.5.1. Resistencia a la compresión

Para la prueba de resistencia a la compresión se aplicó la norma ASTM C62 [8], que nos indica las especificaciones y la resistencia mínima que debe de tener un ladrillo. También se requirió la norma ASTM C67 [36] en la cual se establecen las condiciones de velocidad de ensayo, así como las dimensiones de la probeta y el tipo de recubrimiento de ambas superficies del ladrillo que estarán en contacto con las placas de compresión del equipo de ensayo. La prueba se realizó con una máquina universal, marca Instron, modelo 8802 (ver figura 27), y se llevó a cabo la prueba se utilizaron 8 probetas por lote. Para determinar la resistencia a la compresión se utilizó la siguiente ecuación:

$$C = \frac{W}{A} \quad \dots (1)$$

Donde:

C = Resistencia a la compresión de la muestra, (MPa).

W = Carga máxima, (KN), indicada por la máquina de prueba.

A = Promedio de las áreas brutas de la parte superior e inferior, superficies de apoyo de la muestra, (mm²).



Figura 27.- Máquina Universal, marca Instron, modelo 8802.

5.6. Pruebas físicas

5.6.1. Porosidad aparente, absorción de agua y densidad bulk

Las pruebas físicas fueron realizadas con base a la norma ASTM C373, para ello se prepararon muestras con pesos menores a los 25 g, en forma de cubo, obteniendo caras y bordes uniformes y redondeados para evitar pérdida de material durante la prueba. La norma utiliza el método de Arquímedes, permitiendo determinar de forma directa la densidad bulk, porosidad aparente y absorción de agua. El proceso para hacer esta prueba fue lo siguiente, se hicieron cubos pequeños

de barro, arena fina y agua incorporando fibra en la mezcla, las muestras fueron secadas a la intemperie por 7 días y luego sinterizadas a 900°C, al día siguiente las muestras fueron pesadas en seco (D) posteriormente las probetas fueron colocadas en un recipiente de vidrio con agua destilada en una parrilla en un tiempo de 5hrs pasando el tiempo, se deja enfriar por 24 hrs. Para registrar los valores se utilizó una balanza analítica obteniendo las masas de las muestras saturada (M) y suspendida (S). Para obtener los resultados de la densidad bulk, la porosidad aparente y la absorción de agua se emplearon las siguientes ecuaciones:

Calcular el volumen exterior, V, en centímetros cúbicos.

$$V = M - S \quad \dots (2)$$

Calcular los volúmenes de poros abiertos V_{OP} y porción impermeable V_{IP} en centímetros cúbicos de la siguiente manera:

$$V_{OP} = M - D \quad \dots (2)$$

$$V_{ip} = D - S \quad \dots (3)$$

La porosidad aparente, P, se expresa, como porcentaje, la relación del volumen de los poros abiertos de la muestra con su volumen exterior. Se determina la porosidad aparente de la siguiente manera:

$$P = \left[\frac{M - D}{V} \right] X 100 \quad \dots (4)$$

La absorción de agua, A, se expresa en porcentaje, la relación entre la masa de agua absorbida y la masa del ejemplar seco. Se determina la absorción de agua de la siguiente manera:

$$A = \left[\frac{M - D}{D} \right] X 100 \quad \dots (5)$$

La densidad bulk, B , en gramos por centímetro cúbico, de un espécimen es el cociente de su masa seca dividido por el volumen exterior, incluidos los poros. Se determina la densidad aparente como sigue:

$$B = \frac{D}{V} \quad \dots (6)$$

Análisis y discusión de resultados

6.1. Caracterización de fibras por DRX

Se analizaron por DRX las tres fibras que fueron utilizadas en el presente estudio. La figura 28 muestra los resultados para la fibra vidrio, fibra de basalto y fibra cerámica refractaria.

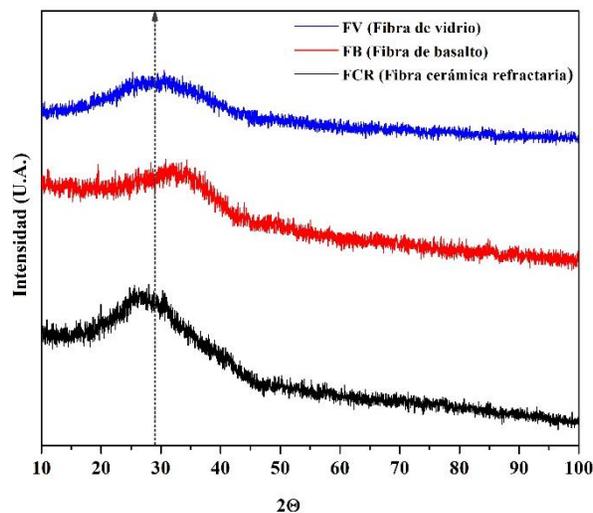


Figura 28.- Diffractogramas de las fibras utilizadas como aditivos.

Cómo se observa en la figura. 28, todas las fibras presentan fase amorfa, la cual sugiere que todas fueron fabricadas por un proceso de fusión y enfriamiento rápido.

6.2. Caracterización de las fibras usadas como aditivo

Estas fibras usadas como aditivo en la fabricación de ladrillos fueron previamente molidas en mortero, a partir de su condición como lana. Se analizaron por MEB los tres tipos de fibras mostradas en la figura 29.

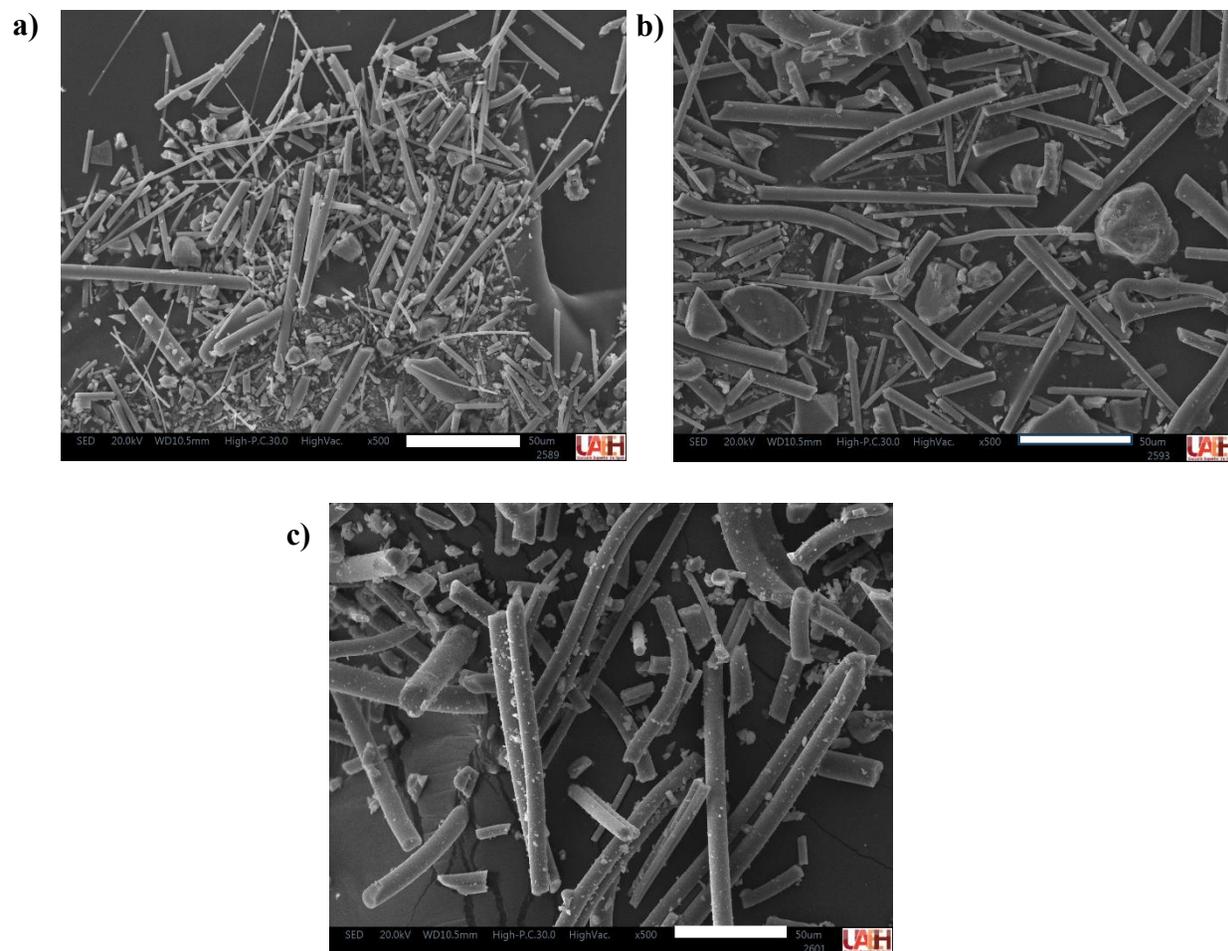


Figura 29.- Imágenes obtenidas con electrones secundarios (MEB) de los tres tipos de fibras: a) fibra cerámica refractaria, b) fibra de basalto, c) fibra de vidrio.

Se distinguen diferentes tipos de fibras: largas y cortas, gruesas y delgadas, así como partículas del tipo semiesférico y angular. Estas fibras presentan un promedio de espesor y longitud variable respectivamente.

Se realizó un análisis de distribución de tamaño en imágenes MEB para conocer las dimensiones de las fibras diámetro (d) y longitud (l) utilizando el software Image J, es un programa dedicado para la edición y análisis básicos de imágenes digitales obtenidas mediante microscopía. A continuación, se presentan los resultados de las dimensiones de las fibras. (Ver figura 30)

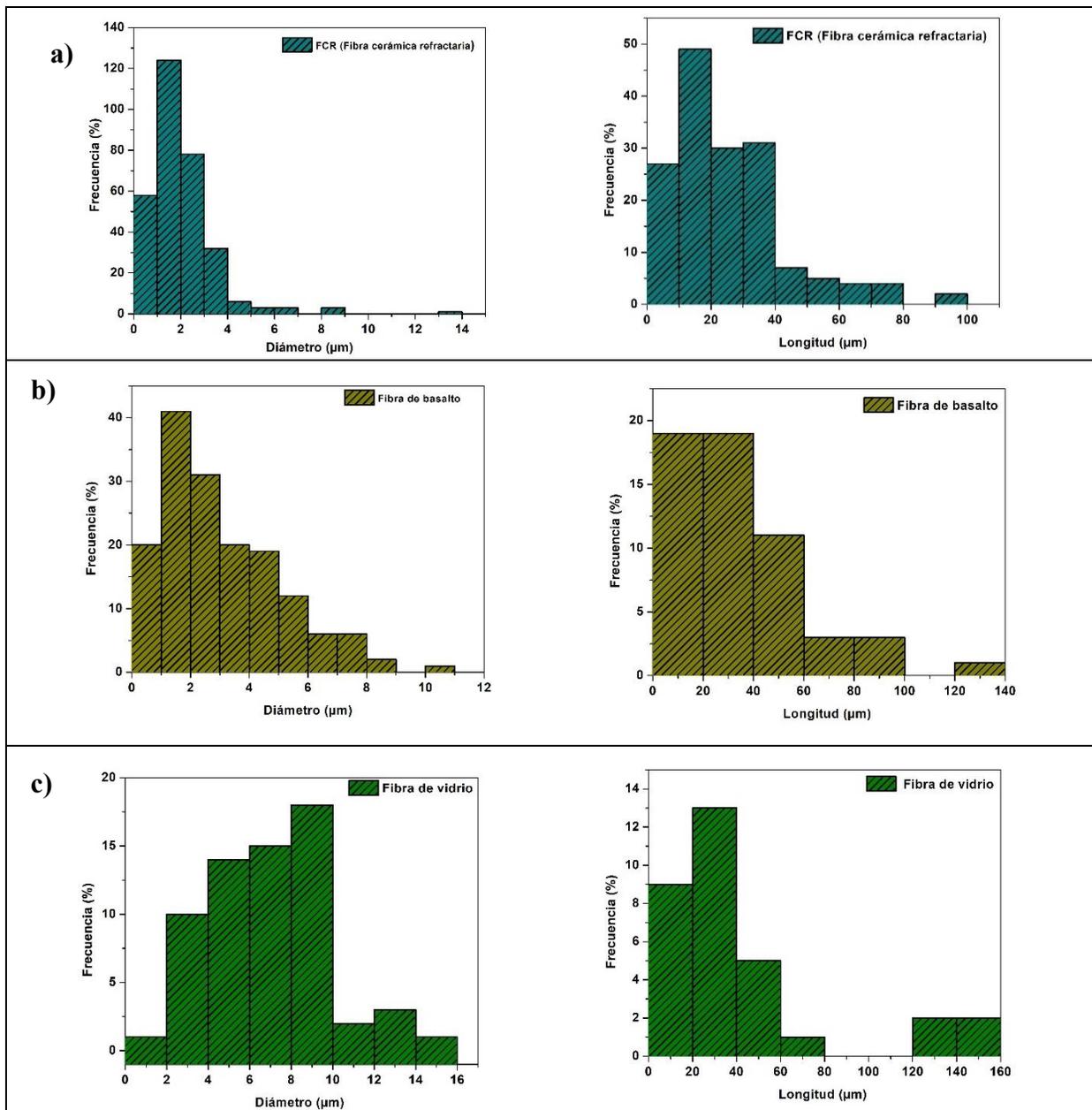


Figura 30.- Gráficas de distribución de tamaño de las fibras (diámetro- longitud): a) fibra cerámica refractaria, b) fibra de basalto y c) fibra de vidrio.

Tabla 1.- Dimensiones de las fibras.

Tipo de fibra	Diámetro (promedio)	Longitud (promedio)	Diámetro (modal)	Longitud (modal)
	μm		μm	
Fibra cerámica refractaria	1.67	84.99	1.5	15
Fibra de basalto	2.03	109.27	1.5	0-40
Fibra de vidrio	6.79	25.37	9	30

En la tabla 1 se muestran los valores de las dimensiones de los tres tipos de fibras. Analizando los resultados, se observó que las fibras tienen un diámetro promedio (1.5 μm - 7 μm) y una longitud promedio (25 μm - 110 μm) y también tienen un diámetro con un valor modal de (1.5 μm - 9 μm) y una longitud con un valor modal (15 μm - 40 μm)

Los contenidos de óxidos metálicos de las fibras, mostrados en la tabla 2, fueron determinados en base a el análisis elemental obtenido por EDS-MEB.

Tabla 2.- Análisis químico elemental de las fibras obtenido por EDS-MEB y su contenido estequiométrico de óxido.

Elementos	Fibra Cerámica Refractaria	Fibra de Basalto	Fibra de Vidrio	Óxidos	Fibra Cerámica Refractaria	Fibra de Basalto	Fibra de Vidrio
	% Peso				% Peso		
O	66.21	46.22	52.17				
Al	15.76	7.49		Al₂O₃	62.30	15.00	
Si	18.03	19.56	29.40	SiO₂	37.70	44.41	71.03
Mg		4.90	2.05	MgO		8.61	3.83
Ca		14.06	4.33	CaO		20.84	6.83
Na		1.75	12.05	Na₂O		2.50	18.31
Ti		1.08		TiO₂		1.91	
Fe		4.94		FeO		6.73	

Analizando los resultados de la tabla 2, la fibra cerámica refractaria es un material silicoaluminoso que no contiene elementos fundentes como Ca, Na ó K. Con respecto a las otras fibras, la fibra de

basalto es un material silicoaluminoso con contenidos altos de CaO. Finalmente, la fibra de vidrio es un material con alto contenido de Na₂O.

6.3. Caracterización de las fibras tratadas térmicamente a 900°C

Con el objetivo de conocer el comportamiento de las fibras a 900°C, las fibras molidas en un mortero de porcelana posteriormente fueron colocadas en un crisol dentro de una mufla para ser sometidas a una temperatura de 900°C, controlada por una rampa de calentamiento de 3°C/min. En la figura 31 se muestran las fibras a temperatura ambiente y sinterizadas.

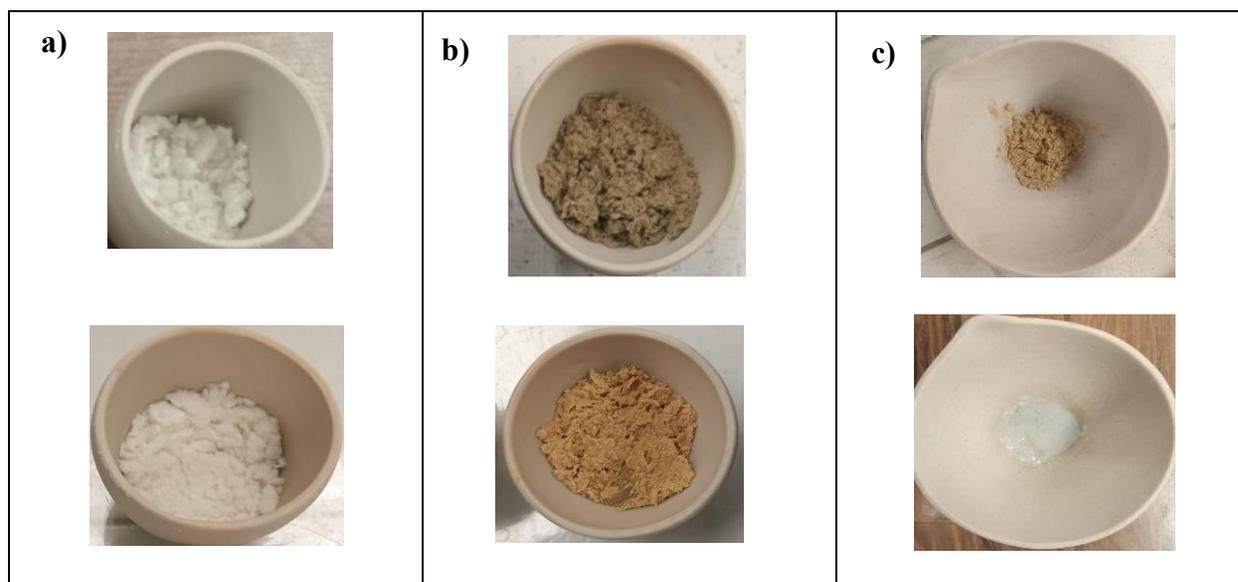


Figura 31.- Fibras antes y después de tratamiento térmico: a) fibra cerámica refractaria, b) fibra de basalto y c) fibra de vidrio.

La fibra cerámica refractaria no muestra cambios significativos con el tratamiento térmico. No así las otras dos fibras, la fibra de basalto se ve que se funde de manera parcial observando que hay cambios en el color de la fibra durante el proceso, la fibra de vidrio se observa que se fundió completamente.

De las observaciones hechas de la prueba anterior se analizó por MEB la fibra de basalto tratada a 900°C. En la figura 32 se muestran fibras con fusión parcial en el interior de las mismas. Esto seguramente debilitará la resistencia de este tipo de fibra.

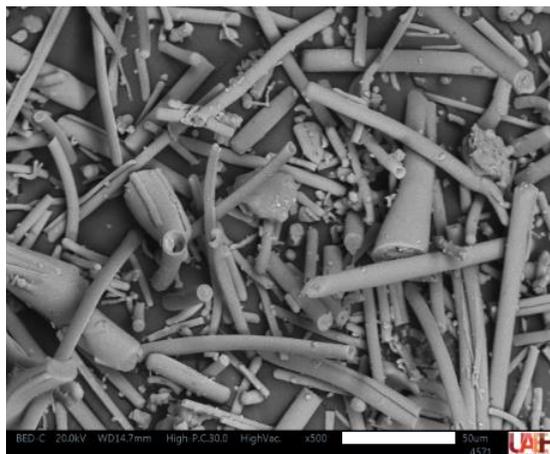


Figura 32.- Imagen de MEB de la fibra de basalto tratada a 900°C.

6.3.1. Caracterización microestructural del ladrillo adicionado con fibra

La microestructura de los ladrillos sinterizados a 900°C y con un contenido de 3% peso para cada una de los diferentes tipos de fibra, fue observada por microscopía óptica digital, la cual es mostrada en la figura 33. También se muestra la microestructura sin fibra para efectos comparativos.

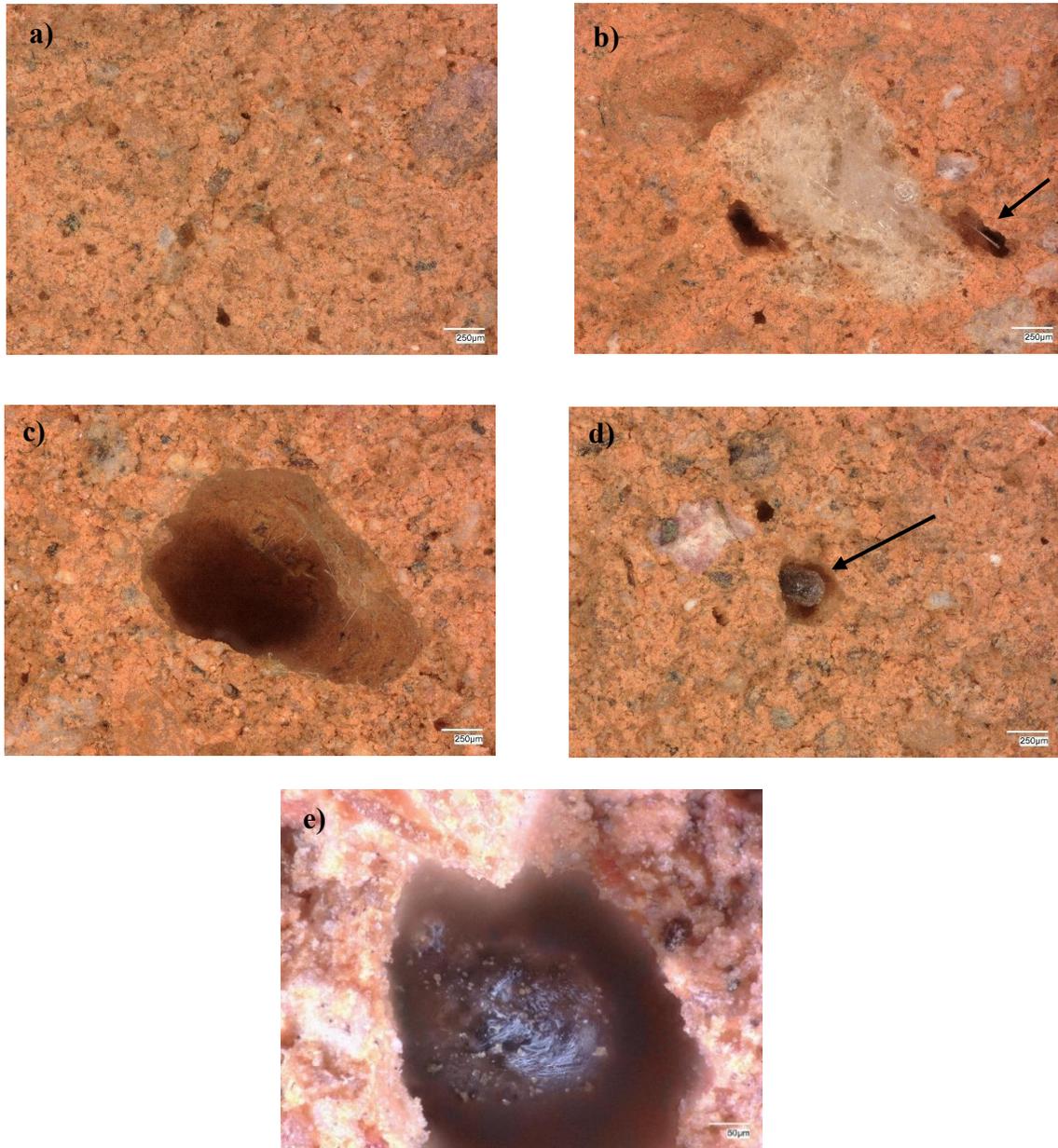


Figura 33.- Imágenes obtenidas por microscopía óptica digital de ladrillo sinterizado a 900°C con 3% peso de fibra: a) sin adición de fibra, b) fibra cerámica refractaria, c) fibra de basalto, d) fibra de vidrio. 3) Partícula fundida.

En las imágenes de los ladrillos con un 3% peso de fibra, se puede observar el contenido y el efecto de cada tipo de fibra. En el ladrillo sin adición de fibra (ver figura 33-a), se presenta la microestructura típica la cual consiste de porosidad, así como partículas de cuarzo (fase clara) y feldespato (fase oscura) distribuidas homogéneamente. En el ladrillo con fibra cerámica refractaria, se observa una aglomeración de fibra, aunque también se puede ver una fibra sujeta a uno de los extremos de un poro (ver figura 33-b). La figura 33-c muestra un aglomerado de fibra de basalto dentro de un poro grande. Se puede apreciar también que la fibra se fundió parcialmente. En el ladrillo con fibra de vidrio no se observan fibras, solo partículas fundidas en poros (ver figuras 33-d y 33-e). A partir de estas observaciones, se podría suponer que la fibra cerámica refractaria solo podría reforzar los poros de menor tamaño que su longitud, tal como se muestra en la figura 33-b.

6.4. Resistencia a la compresión

Los resultados de resistencia a la compresión de ladrillos con diferente contenido y tipo de fibra son mostrados en la figura 34. También se indica con una línea punteada horizontal el valor determinado de resistencia a la compresión del ladrillo sinterizado sin adición de fibra (Blanco)

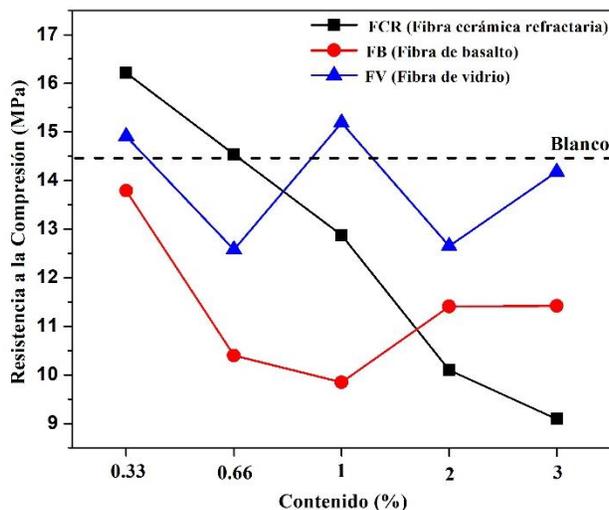


Figura 34.- Resultados de pruebas de compresión.

Los resultados obtenidos se analizaron en función de su contenido de fibra y su efecto de cada una. Los ladrillos con fibra cerámica refractaria, en las proporciones de menor contenido, mostraron un aumento en la resistencia con respecto al valor mostrado por el blanco. Los ladrillos con un 0.33% de peso de fibra cerámica refractaria mostraron un aumento en su resistencia de 1.78 MPa respecto a los ladrillos sin fibra, lo que representa un incremento del 12%. Este aumento se debe a las propiedades de la fibra y su contenido en el material. Sin embargo, al incrementar la cantidad de este tipo de fibra, la resistencia a la compresión disminuyó. Esto se debe a que, con mayores cantidades, las fibras tienden a aglomerarse, formando marañas dentro de los poros tal como se observó en la figura 33-b.

En cuanto a los ladrillos con fibra de basalto, la resistencia disminuyó independientemente de la proporción de fibra utilizada. Esto ocurrió porque la fibra de basalto se funde internamente a la temperatura de sinterización del ladrillo, que fue de 900°C, lo que provoca su debilitamiento como material de refuerzo. Además, se observó que un mayor contenido de fibra provocó la formación de marañas dentro de los poros.

Los ladrillos con fibra de vidrio mostraron una independencia del contenido de fibra con la resistencia. Es decir, el valor de resistencia se mantuvo más o menos constante, similar al mostrado por el blanco, lo que se atribuye a la fusión de la fibra en todas las cantidades, generando partículas fundidas dentro del ladrillo.

Vale la pena determinar los valores máximos de adición de fibra cerámica para que el ladrillo funcione como un sistema de inertización de este material peligroso. El valor de resistencia mínimo que debe cumplir el ladrillo sería el valor de referencia para decidir el contenido máximo de fibra a inertizar en el ladrillo. Los valores mínimos de resistencia a la compresión según la norma mexicana NMX-C-404-ONNCCE-2012 [7] y la norma ASTM-C62 [8] serían 6 Mpa y 10.3 MPa respectivamente. Por lo tanto, los tres tipos de fibra y sus contenidos máximos investigados en el presente estudio, cumplen con lo solicitado por la norma mexicana. Para el cumplimiento de la norma ASTM, al parecer solo la fibra de vidrio y fibra de basalto la cumplen independiente de la cantidad adicionada. La fibra cerámica refractaria cumple esa norma solo hasta 1% de adición. Lo anterior es debido a que las fibras de vidrio y basalto sufren fusión total y parcial respectivamente, no así la fibra cerámica refractaria.

6.5. Pruebas físicas

6.5.1. Porosidad aparente, absorción de agua y densidad bulk

Se hicieron pruebas físicas para conocer el efecto que tiene la adición de los diferentes tipos y cantidades de fibras en ladrillos sinterizados. Se utilizaron 5 probetas por cada lote. Los resultados se muestran en la figura 35

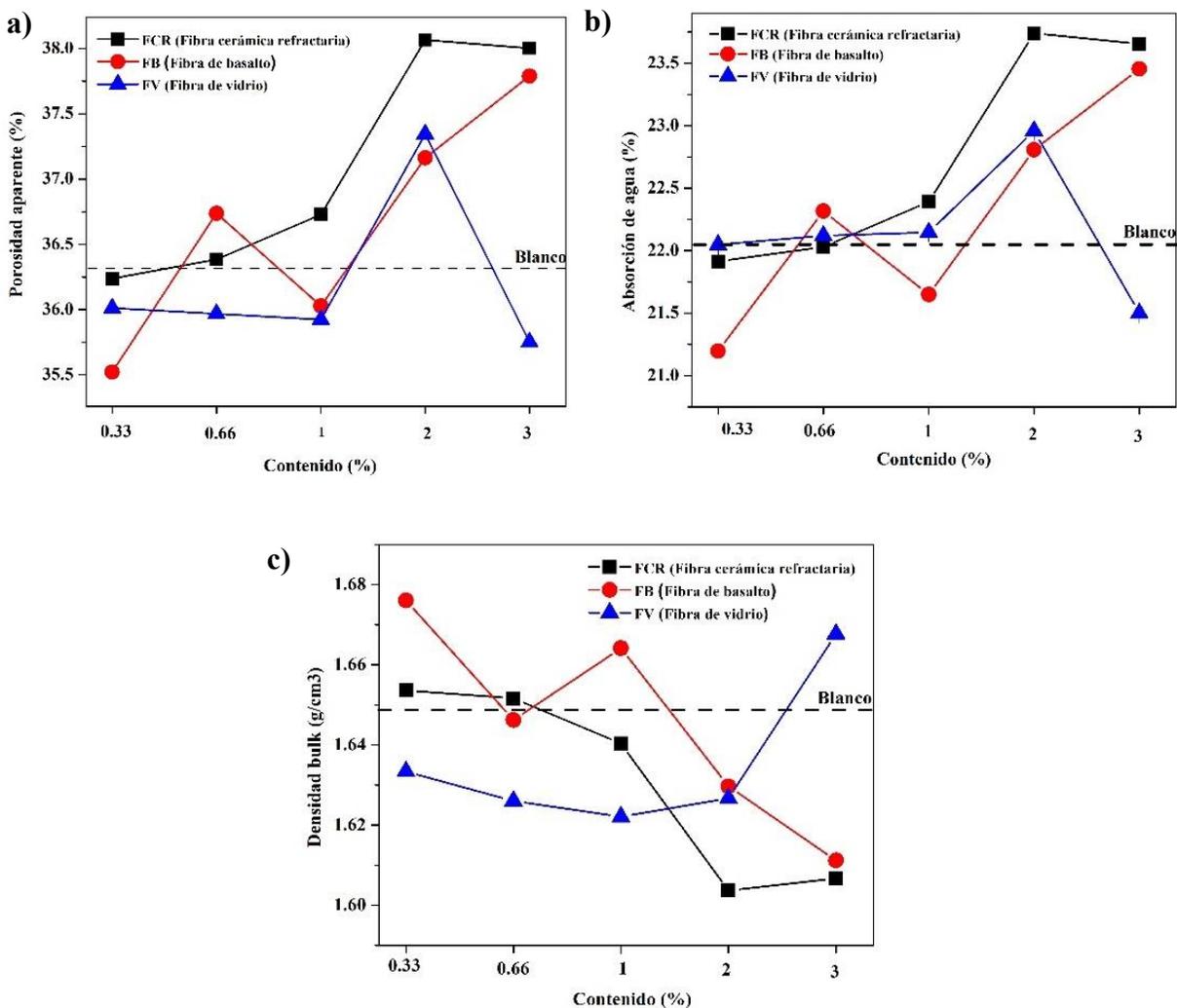


Figura 35.- Resultados de: a) porosidad aparente, b) absorción de agua y c) densidad bulk como función del contenido de fibra en ladrillos sinterizados a 900°C.

Los resultados mostraron que tanto la fibra cerámica refractaria como la fibra de basalto provocaron un aumento en la porosidad aparente y una disminución en la densidad aparente (bulk). Esto se puede explicar por la aglomeración de las fibras a medida que aumentaba su contenido, lo que generó poros internos y, como consecuencia, redujo la resistencia de los ladrillos. En el caso de la fibra de vidrio, se observó un comportamiento similar al de los ladrillos sin fibra, ya que, al fundirse, esta fibra no tuvo un efecto significativo en las propiedades del material.

Conclusiones

- El uso de ladrillos base arcilla con fibras cerámicas recicladas representa una estrategia para reforzar y, al mismo tiempo, inertizar el material, evitando daños tanto al medio ambiente como a la salud. Al emplear el contenido óptimo, conocer el tamaño y las propiedades de las fibras, y una adecuada dispersión de las mismas, se logra mejorar las propiedades del ladrillo.
- El contenido óptimo de fibra cerámica refractaria reciclada en el ladrillo fue determinado en un 0.33% en peso. A este porcentaje, se alcanzó un incremento en la resistencia de 1.78 MPa, lo que representó un aumento del 12% en comparación con los ladrillos sin fibra. Sin embargo, se observó que, al aumentar la cantidad de fibra por encima de esta proporción, la resistencia a la compresión comenzó a disminuir. Esto se debe a que las fibras tienden a aglomerarse y formar marañas en los poros del ladrillo.
- Los ladrillos con fibra de basalto, se observó una disminución en la resistencia a la compresión. Esto ocurrió debido a que la fibra de basalto tiende a fundirse de manera parcial durante el tratamiento térmico, lo que debilita las propiedades de la fibra.
- Los ladrillos de fibra de vidrio mostraron independencia del contenido de fibra con el valor de su resistencia, manteniendo un valor constante similar al mostrado por el ladrillo sin la adición de fibra. La fibra de vidrio tiende a fundirse y generar partículas fundidas dentro de los poros del ladrillo.
- Para el caso de utilizar al ladrillo como un sistema de inertización de fibra cerámica, se encuentra que el ladrillo puede inertizar a la fibra de vidrio y fibra de basalto en contenidos iguales o mayores a 3% en peso, no así a la fibra cerámica refractaria, la cual puede ser inertizada hasta 1% en peso.

Trabajos a futuro

- Obtener ladrillos resistentes y ligeros utilizando fibras cerámicas refractarias con una longitud mayor que el tamaño máximo de los poros del ladrillo que es de aproximadamente 1 mm.
- Determinar el contenido máximo a inertizar de fibra de vidrio y fibra de basalto.

Glosario

Reforzamiento: Es el resultado de introducir partículas o fibras dentro de otro material, para mejorar sus propiedades.

Tenacidad: Es una propiedad de los materiales que consiste en la capacidad de absorber energía de deformación en grandes cantidades, antes de sufrir roturas

Resistencia mecánica: Es la capacidad de los cuerpos para resistir las fuerzas aplicadas sin romperse

Difracción de Rayos X: La difracción de rayos X (XRD) es una técnica analítica versátil y no destructiva que se utiliza para analizar propiedades físicas, como la composición de fases, la estructura cristalina y la orientación de muestras.

Plasticidad: Es la capacidad de un material para ser deformado sin ruptura durante la aplicación de una fuerza externa, y conservar la deformación tras el cese de la fuerza deformadora.

Sinterización: Es el proceso mediante el cual un sistema de partículas individuales o un cuerpo poroso modifican algunas propiedades evolucionando hacia un estado de máxima compacidad.

Compacidad: Se refiere al grado de densidad de un suelo o material granular.

Piroplasticidad: Es la capacidad de deformación de un material por la acción del calor.

Anexos

Tabla 3.- Resultados de la prueba de resistencia a la compresión.

Tipo	Contenido (% peso)	Resistencia a la compresión (MPa)	Desviación Estándar
Blanco	-----	14.44	2.304
Fibra cerámica refractaria	0.33	16.22	3.760
	0.66	14.54	3.079
	1	12.88	1.813
	2	10.10	1.784
	3	9.09	1.185
Fibra de basalto	0.33	13.79	1.715
	0.66	10.40	1.191
	1	9.85	0.350
	2	11.41	1.024
	3	11.42	1.420
Fibra de vidrio	0.33	14.91	2.467
	0.66	12.58	2.245
	1	15.19	2.412
	2	12.65	1.277
	3	14.18	0.682

Tabla 4.- Resultados de porosidad aparente.

Tipo	Contenido (% peso)	Porosidad aparente (%)	Desviación Estándar
Blanco	-----	36.32	0.001
Fibra cerámica refractaria	0.33	36.24	0.002
	0.66	36.38	0.003
	1	36.73	0.002
	2	38.07	0.005
	3	38.00	0.004
Fibra de basalto	0.33	35.52	0.005
	0.66	36.74	0.003
	1	36.03	0.002
	2	37.16	0.003
	3	37.79	0.023
Fibra de vidrio	0.33	35.93	0.003
	0.66	35.94	0.003
	1	35.77	0.003
	2	37.34	0.004
	3	35.75	0.003

Tabla 5.- Resultados de absorción de agua.

Tipo	Contenido (% peso)	Absorción de agua (%)	Desviación Estándar
Blanco	-----	22.03	0.001
Fibra cerámica refractaria	0.33	21.91	0.002
	0.66	22.03	0.003
	1	22.39	0.002
	2	23.74	0.005
	3	23.65	0.003
Fibra de basalto	0.33	21.20	0.005
	0.66	22.32	0.003
	1	21.65	0.001
	2	22.81	0.004
	3	23.46	0.003
Fibra de vidrio	0.33	21.99	0.002
	0.66	22.10	0.002
	1	22.03	0.002
	2	22.96	0.003
	3	21.50	0.021

Tabla 6.- Resultados de densidad bulk.

Tipo	Contenido (% peso)	Densidad bulk (g/cm ³)	Desviación Estándar
Blanco	-----	1.649	0.001
Fibra cerámica refractaria	0.33	1.650	0.002
	0.66	1.650	0.003
	1	1.640	0.002
	2	1.604	0.005
	3	1.607	0.004
Fibra de basalto	0.33	1.680	0.017
	0.66	1.650	0.003
	1	1.660	0.002
	2	1.630	0.003
	3	1.611	0.023
Fibra de vidrio	0.33	1.634	0.003
	0.66	1.626	0.005
	1	1.624	0.003
	2	1.627	0.004
	3	1.668	0.003

Referencias

- [1] F. Moreno, *El ladrillo en la construcción*. CEAC, 1981.
- [2] J. W. Campbell and W. Pryce, *Ladrillo: historia universal*. Art Blume, S.L., 2004.
- [3] M. J. Gallegos Gómora and R. Armijo Torres, “Comalcalco la ciudad Maya de ladrillos: descubriendo su pasado y la conservación de su futuro,” *Restauro Archeologico*, vol. 25 (1), pp. 128–147, 2017.
- [4] grupo Pazos, “Ladrillo: Tipos, propiedades y utilidades.” [Online]. Available: <https://www.grupopazos.es/ladrillo-tipos-propiedades-y-utilidades/>
- [5] MACERE S.A. de C.V, “Beneficios de construir con ladrillos artesanales.” [Online]. Available: <https://maceremexico.com/post/beneficios-de-construir-con-ladrillos-artesanales>
- [6] BIOCLIMATECH, “Ventajas e Inconvenientes del ladrillo como material de construcción.” [Online]. Available: <https://www.bioclimattech.es/l/desventajas-del-ladrillo-como-material-de-construccion/>
- [7] ONNCCE, “NMX-C-404-ONNCCE-2012: Industria de la construcción – Bloques, tabiques o ladrillos y otros productos para la construcción – Especificaciones y métodos de ensayo,” México, 2012. [Online]. Available: <http://invivienda.gob.mx/>
- [8] ASTM International, “ASTM C62-12: Standard Specification for Building Brick (Solid Masonry Units Made From Clay or Shale),” ASTM International, West Conshohocken, PA., 2012. doi: 10.1520/C0062-12.
- [9] E. Gonzalez Gracia and L. Lizárraga-Mendiola, “Evaluation of physical and mechanical properties of annealed clay bricks made with incorporation of agricultural residues, in

- Chiapas, Mexico,” pp. 91–101, 2015, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/308036506>
- [10] R. Galindo, “Arcillas: Conceptos generales.” [Online]. Available: <http://www.rafagalindoceramica.com>
- [11] R. Galindo, “Criterios de clasificación de las arcillas.” [Online]. Available: <https://rafagalindoceramica.com/>
- [12] R. Galindo, “Componentes de las arcillas.” [Online]. Available: <https://rafagalindoceramica.com/>
- [13] R. Galindo, “Los minerales arcillosos (fracción plástica de las arcillas).” [Online]. Available: <http://www.rafagalindoceramica.com>
- [14] *Atlas de Mineralogía*. Idea books, S.A., 1997.
- [15] R. Galindo, “Las impurezas (fracción no plástica de las arcillas).” [Online]. Available: <https://rafagalindoceramica.com/>
- [16] Dirección General De Desarrollo Minero, “PERFIL DE MERCADO DEL FELDESPATO.”
- [17] Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, “Resumen de Salud Pública: Fibras vítreas sintética,” Sep. 2004. [Online]. Available: www.atsdr.cdc.gov/es
- [18] Ma. C. Arroyo Buezo, “NTP 641: Fibras minerales artificiales y otras fibras diferentes del amianto (I): toxicología y clasificación.” 2003.
- [19] Ratsa, “Fibra cerámica.” [Online]. Available: <https://www.ratsa.mx/producto/fibra-ceramica>
- [20] C. E. FIRE INDUSTRIAL INSULATION Y REFRACTORIES, “Elaboración de Fibra Cerámica.” [Online]. Available: <https://www.ce-fire.com/2014/07/fibra-ceramica/>

- [21] Morgan Advanced Materials, “Mantas / colchas.”
- [22] Ratsa, “Fibra de Vidrio (Lana de Vidrio).” [Online]. Available: <https://www.ratsa.mx/producto/fibra-vidrio>
- [23] Grupo AgroRedes Polcom, “Lana de Vidrio.” [Online]. Available: <https://grupo-ap.com.ar/producto/lana-de-vidrio/>
- [24] Ratsa, “Lana mineral (Lana de roca).” Accessed: Feb. 18, 2025. [Online]. Available: <https://www.ratsa.mx/producto/lana-mineral-y-lana-de-roca>
- [25] ECOGREENHOME, “Lana de roca aislamiento completo para viviendas.” [Online]. Available: <https://ecogreenhome.es/que-es-la-lana-de-roca/>
- [26] J. Fei, W. Wang, A. Ren, Y. Ji, J. Zhou, and M. Zhu, “Mechanical properties and densification of short carbon fiber-reinforced TiB₂/C composites produced by hot pressing,” *J Alloys Compd*, vol. 584, pp. 87–92, 2014, doi: 10.1016/j.jallcom.2013.09.004.
- [27] P. N. Lemougna *et al.*, “Utilisation of glass wool waste and mine tailings in high performance building ceramics,” *Journal of Building Engineering*, vol. 31, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.jobbe.2020.101383.
- [28] H. Xiao *et al.*, “Alumina fiber-reinforced silica matrix composites with improved mechanical properties prepared by a novel DCC-HVCI method,” *Ceram Int*, vol. 43, no. 18, pp. 16436–16442, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.ceramint.2017.09.023.
- [29] D. Zhao, C. Zhang, H. Hu, and Y. Zhang, “Preparation and characterization of three-dimensional carbon fiber reinforced zirconium carbide composite by precursor infiltration and pyrolysis process,” *Ceram Int*, vol. 37, no. 7, pp. 2089–2093, Sep. 2011, doi: 10.1016/j.ceramint.2011.02.024.

- [30] M. Abolfathi, T. Omur, and N. Kabay, “Effect of microfibers or SRA on the shrinkage and mechanical properties of alkali activated slag/fly ash-based mortars incorporating recycled fine aggregate,” *Constr Build Mater*, vol. 373, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130883.
- [31] S. Ramakrishnan, S. Loganayagan, G. Kowshika, C. Ramprakash, and M. Aruneshwaran, “Adobe blocks reinforced with natural fibres: A review,” *Mater Today Proc*, vol. 45, pp. 6493–6499, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.377.
- [32] A. Eslami, H. Mohammadi, and H. Mirabi Banadaki, “Palm fiber as a natural reinforcement for improving the properties of traditional adobe bricks,” *Constr Build Mater*, vol. 325, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126808.
- [33] J. A. Palmas León, “Obtención de ladrillo base arcilla de baja densidad y alta resistencia mediante el uso de aditivos,” UAEH, Pachuca de Soto, 2020. [Online]. Available: <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/handle/231104/2663>
- [34] S. Korpayev, M. Bayramov, S. Durdyev, H. Hamrayev, D. Baymyradova, and A. Nurmammedov, “Effect of stone wool waste from greenhouse agriculture in brick production,” *Journal of Building Engineering*, vol. 63, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.jobe.2022.105340.
- [35] D. Ordoñez Hernández, “Abatimiento de la temperatura de sinterización de ladrillos estructurales,” ICBI-BD-UAEH, 2018. [Online]. Available: <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/handle/231104/2436>
- [36] ASTM International, “ASTM C67-12: Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile,” West Conshohocken, PA., 2012. doi: 10.1520/C0067-12.