

# Estudio teórico-experimental para la optimización de un horno para producir ladrillos

Tesis  
que para obtener el grado de  
Maestría en Ingeniería Mecánica

Presenta

**Isamar Guadalupe Jiménez Islas**

Director de Tesis: Dr. Abdiel Gómez Mercado

Codirectores de Tesis: Dr. Celerino Reséndiz Rosas

Dr. Ignacio Ramírez Vargas

Pachuca, Hidalgo, México a 14 de Noviembre de 2016





Pachuca de Soto, Hgo., 23/noviembre/2016

ASUNTO: Autorización de Impresión

OFICIO No. DERI-219-16

**C. ING. ISAMAR GUADALUPE JIMÉNEZ ISLAS  
PRESENTE**

El que suscribe Jefe de la División de Estudios de Posgrado e Investigación, le comunica que los miembros de la Comisión Revisora, designada por el Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica se han reunido y después de intercambiar opiniones manifiestan la aprobación de su Tesis:

**"Estudio teórico-experimental para la optimización de un horno para producir ladrillos"**

en virtud que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes y en consecuencia, se autoriza su impresión.

Sin otro particular por el momento, quedo de usted.

**ATENTAMENTE**  
EL HOMBRE ALIMENTA EL INGENIO EN CONTACTO CON LA CIENCIA

**DR. MARIO EMIGDIO RODRÍGUEZ CASTILLO**  
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



Cp. Coordinación de Ingeniería Mecánica  
Archivo

EDAD/ep

## **Agradecimientos**

A Dios por guiarme durante esta etapa de mi vida y darme fuerza para superar cada uno de los obstáculos y dificultades que se me presentaron para finalizar este proyecto que se convirtió en una gran enseñanza en esta etapa de mi vida.

A mis padres, que sin importar los momentos difíciles que pasamos en este periodo de nuestras vidas nunca perdieron la confianza en mí y me brindaron su apoyo incondicional para seguir adelante, con un espíritu de superación, perseverancia y fortaleza.

Al Dr. Abdiel Gómez por haber sido mi asesor y brindarme el apoyo para concluir este proyecto, por todas las facilidades que me otorgo para concluirlo de la mejor manera.

Al Dr. Celerino Reséndiz por su buena disposición y ayuda para culminar exitosamente.

Al Dr. Ignacio Ramírez por los conocimientos y enseñanzas transmitidas a lo largo de estos 2 años. Por sus comentarios, tiempo y confianza que me brindó en esta etapa de mi vida, merecen mi más sincero agradecimiento.

Al Ing. Juan Carlos Rebolleda Sánchez quien fue mi jefe durante este proyecto, por haberme dado la oportunidad, por haber confiado en mí; ya que, sin su apoyo, aportaciones, experiencias, confianza y sobre todo amistad no hubiera sido posible desarrollar este proyecto y llegar a su término. Gracias por creer en mí y en mis capacidades, por haberme enseñado que cualquier idea que remota parezca se puede conseguir, por alentarme a seguir adelante y dejarme crecer como profesionalista.

A Pedro, Daniel, Miguel, José que creyeron en mi para seguir adelante en esta etapa y considerarme capaz de seguir adelante, cada uno me brindó su apoyo en el momento que más lo necesite y me alentaban a concluir este proyecto “Nada es imposible si tú lo crees”.

# Índice

Agradecimientos.....	4
Índice .....	5
Resumen.....	7
Nomenclatura .....	8
Índice de tablas .....	9
Índice de figuras.....	10
Introducción .....	12
Objetivos .....	14
General.....	14
Específicos .....	14
Hipótesis.....	14
Justificación .....	15
Marco Teórico .....	16
1.1 Materia prima.....	17
1.2 Transferencia de calor .....	23
1.3 Caracterización de materiales .....	25
1.4 Propiedades mecánicas y térmicas .....	27
1.5 Ladrillo: uso, propiedades y aplicaciones .....	27
1.6 Tipos de biomasa.....	31
1.7 Horno tradicional para producir ladrillo artesanal .....	33
1.8 Operación del horno.....	34
Metodología .....	35
2.1 Análisis del proceso de elaboración de ladrillo artesanal.....	36
2.2 Obtención de parámetros y condiciones de operación.....	39
2.3 Análisis del diseño del horno que se emplea actualmente .....	39
2.4 Análisis de la cantidad y tipo de combustible empleado .....	42
2.5 Caracterización de las formulaciones con mejores propiedades.....	43
2.6 Mejoras en el proceso de producción.....	45
2.7 Análisis térmico del horno actual.....	45

2.8 Análisis de la transferencia de calor dentro del horno .....	46
Propuesta de mejora .....	49
3.1 Análisis térmico del horno .....	50
3.2 Formulaciones propuestas .....	51
3.3 Procedimientos y/o condiciones de operación .....	53
Pruebas experimentales .....	58
4.1 Pruebas experimentales .....	59
4.2 Prueba de resistencia a la compresión .....	60
4.3 Contracción lineal y peso.....	61
4.4 Sinterización de las probetas .....	61
4.5 Contracción lineal .....	63
4.6 Módulo de ruptura y compresión de las probetas.....	63
4.7 Diseño de prototipos.....	66
Análisis de Resultados.....	69
Análisis de datos y resultados .....	77
Conclusiones .....	78
Glosario .....	79
Referencias.....	80
Anexos (información complementaria).....	82
Anexo A.....	82
Anexo B.....	83
Anexo C .....	84

## Resumen

La producción de ladrillo artesanal enfrenta hoy en día un gran problema en el proceso de sinterización del producto se utiliza como combustible cualquier producto que pueda arder y ser una fuente que genere calor.

El proceso de quema representa una de las principales desventajas en el producto final, el calor que se genera dentro del horno es demasiado y no se puede disipar tan rápidamente, generando que se tenga una elevada temperatura de quema produciendo mermas cuantiosas por causar defectos como fisuras, grietas, exceso de temperatura “quemado”, producto crudo en la parte más alta.

Y al ser un proceso netamente artesanal no se tiene un procedimiento de preparación y acondicionamiento de la materia prima que tiene gran importancia en su elaboración y procesamiento.

La realización de este proyecto pretende analizar el proceso actual y proponer mejoras en el proceso que se tiene en el horno y en la formulación actual proponiendo técnicas y elementos que les permitirán a los productores de ladrillo tener un mayor rendimiento y eficiencia en la producción, así como el diseño y construcción de un horno para su implementación en la industria ladrillera que les permita ser más rentables en el mercado actual.

## Nomenclatura

$\psi$	Área (m <sup>2</sup> )
$\varepsilon$	Espesor (M)
$\eta$	Eficiencia térmica (%)
A	Porosidad (%)
b	Ancho promedio del espécimen (cm)
C	Perdidas por calcinación (%)
d <sup>2</sup>	Peralte promedio del espécimen
D <sub>c</sub>	Distancia calcinada (cm)
E	Esfuerzo a la compresión (kg/cm <sup>2</sup> )
H	Porcentaje de humedad (%)
k	Conductividad térmica 0.34 (kcal/mh°C) para ladrillo común
L	Contracción lineal (%)
l	Distancia entre apoyos (cm)
LF	Ladrillo fórmula actual con granulometría fina
LN	Ladrillo fórmula actual
M <sub>H</sub>	Masa húmeda (g)
M <sub>S</sub>	Masa seca (g)
P	Carga máxima aplicada (N)
P <sub>C</sub>	Peso calcinado (g)
P <sub>H</sub>	Peso húmedo inicial (g)
P <sub>S</sub>	Peso seco (g)
P <sub>V</sub>	Peso en verde (g)
Q	Energía calórica (KW/m <sup>2</sup> )
Q <sub>total</sub>	Calor total de quema (Kj/h)
R	Módulo de ruptura (MPa)
T <sub>1</sub>	Temperatura mayor (°C)
T <sub>2</sub>	Temperatura menor (°C)
Fe	Hierro
Al	Alúmina
Mg	Magnesio
Li	Litio
Cr	Cromo
Mn	Manganeso
Ni	Níquel
Cu	Cobre
Zn	Zinc

## Índice de tablas

Tabla 1 Propiedades reológicas.....	33
Tabla 2 Parámetros promedio de operación.....	33
Tabla. 3 Cp de combustibles.....	37
Tabla 4 Formulaciones propuestas.....	46
Tabla 5 Pesos de probetas en verde.....	53
Tabla 6 Probetas sinterizadas.....	55
Tabla 7 Prueba de módulo de ruptura.....	56
Tabla 8 Prueba de módulo de compresión.....	57
Tabla 9 Perdidas por calcinación.....	62
Tabla 10 Porosidad.....	63
Tabla 11 Contracción lineal.....	64
Tabla 12 Modulo de ruptura.....	65
Tabla 13 Esfuerzo a la compresión.....	66
Tabla 14 Temperaturas de evaluación.....	67
Tabla 15 Energía calórica.....	67
Tabla 16 Calor total horno común vs nueva formulación.....	68
Tabla 17 Coeficiente global de transferencia de calor.....	68
Tabla 18 Calor total de cocción actual .....	68
Tabla 19 Calor total de cocción nueva formulación .....	69
Tabla 20 Optimización del proceso (eficiencia del proceso) .....	69

## Índice de figuras

Figura1 Arcilla mineral.....	12
Figura 2 Barro.....	12
Figura 3 Dolomita.....	13
Figura4 Caliza.....	14
Figura 5 Alúmina.....	15
Figura 6 Sílice.....	15
Figura7 Tezontle.....	16
Figura 8 Diagrama de metodología a seguir.....	25
Figura 9 Arcilla adquirida por el productor.....	29
Figura 10 Gravera.....	30
Figura11 Soporte triangular.....	33
Figura 12 Cámara de cocción.....	33
Figura 13 Parrilla.....	34
Figura. 14 Base.....	34
Figura 15 Diseño actual.....	35
Figura 16 Contaminación .....	48
Figura 17 Criba.....	48
Figura 18 Agitador.....	49
Figura 19 Probeta.....	52
Figura 20 Ladrillos en la primera entrada al horno.....	52
Figura 21 Prueba de compresión a las probetas del arenal.....	53
Figura 22 Pesos y medidas de las probetas propuestas.....	54
Figura 23 Mufla para la cocción de las probeta.....	55
Figura 24 Probetas en proceso de sinterizado.....	55
Figura 25 Pruebas del módulo de ruptura.....	58

Figura 26 Prueba de compresión .....	58
Figura 27 Diseño del horno cuadrado propuesto.....	59
Figura 28 Prototipo HCP.....	60
Figura 29 Prototipo HCP con la formulación propuesta .....	60
Figura 30 Acomodo de ladrillos para quema dentro del prototipo.....	61
Figura 31 Gráfica de pérdidas por calcinación.....	63
Figura 32 Gráfica de Porosidad .....	63
Figura 33 Pérdidas por contracción .....	64
Figura 34 Modulo de ruptura .....	65
Figura 35 Esfuerzo a la compresión.....	66
Figura 36 Esfuerzo a la compresión.....	48

## Introducción

El proceso de elaboración de ladrillo artesanal es una técnica que se ha llevado a cabo por varios miles de años, su auge en la construcción es muy importante y día con día se sigue utilizando.

El método que se emplea para quemar este producto es aún una limitante al no tener un procedimiento que sirva como base de estudio para poder determinar las condiciones óptimas para su funcionamiento. Los ladrilleros que emplean estos métodos aun no tienen parámetros que les puedan servir para mejorar su producción “calidad”, rendimiento y reducir sus mermas.

Existen estudios basados en el proceso de transferencia de calor [a] como el desarrollado [1] quien desarrollo el análisis y simulación que se lleva a cabo en un horno para producción de ladrillos, donde se evalúa la caída de presión que ocurre en el interior de este.

El perfil de temperatura que se midió en un horno durante el proceso de cocción con alimentación manual y mecánica [b] fue determinada por Rodríguez [2]. En esta publicación da un seguimiento a la operación realizada tradicionalmente durante la quema y se califica la calidad del producto terminado que se relaciona directamente con la temperatura alcanzada por el horno.

[c] Valverde realizó la evaluación de eficiencia energética utilizando como combustible la cascarilla de arroz [3]. Aquí se discuten los medios para cuantificar la eficiencia térmica y de la combustión, aplicando la norma soviética.

[d] Asimismo, Galindo llevó a cabo un análisis del coeficiente de transferencia de calor en un horno de ladrillo [4]. Se presenta la caracterización de las arcillas y pastas empleadas para fabricar ladrillo, así como el análisis químico, granulométrico, plástico y térmico de los materiales utilizados para obtener pastas óptimas en el proceso correspondiente de sinterización.

[e] Por otra parte, Santos [5] realizó evaluaciones de las propiedades físicas y mecánicas de ladrillos macizos cerámicos; caracterizando las materias primas y después se realizan pruebas destructivas y no destructivas en estos ladrillos.

[f] Sierra Vargas [6] publicó un artículo sobre la determinación de la eficiencia de la cocción con leña. En el estudio se identifica el tipo de especie leñosa utilizada en cada región y se determina su potencial energético para decidir el uso más adecuado de cada especie.

Estas investigaciones y/o publicaciones sirven como referencia para realizar la caracterización y optimización de un horno para producir ladrillo refractario, tema central de este estudio que permite evaluar y poder proponer mejoras tanto cualitativas como cuantitativas en el desarrollo y elaboración de ladrillo artesanal.

Para la elaboración de este proyecto se analizarán las condiciones de operación actuales y se propondrán parámetros adecuados para lograr rendimientos y eficiencias que reduzcan las mermas que se tienen hoy en día.

Además de aportar la caracterización y modificación de las fórmulas que se emplean para producir este producto y minimizar los defectos, bajar los costos de la no calidad y del desperdicio (*SCRAP*) producido.

Con la bibliografía mencionada se podrán hacer comparaciones y se evaluará la factibilidad y viabilidad de esta mejora, considerando que estos estudios realizados anteriormente tienen algunas variaciones con respecto al objeto de estudio principal.

## Objetivos

### General

- Realizar un estudio teórico-experimental del comportamiento de un horno que produce ladrillo y optimizar su eficiencia energética.

### Específicos

- Proponer una formulación que tenga mejores propiedades mecánicas y térmicas.
- Obtener un mayor rendimiento en la cantidad de artículos producidos.
- Diseñar la geometría óptima para dicho equipo.
- Determinar la cantidad y tipo de combustible a emplear.
- Establecer los parámetros de operación que permitan reducir el tiempo de sinterización de los ladrillos.

## Hipótesis

Se propondrá un material (nueva formulación) que permita reducir las mermas por mal sinterizado (exceso de temperatura) en el producto, además de que este nuevo ladrillo podrá ser utilizado para construir las paredes de dicho horno y trabajar en continuo por lo menos 6 quemas. Se mejorarán las condiciones de operación y rendimientos de dicho producto optimizando la cantidad y tipo de combustible empleado, con el consecuente beneficio económico para los productores del estado de Hidalgo.

## Justificación

El desarrollo de este proyecto es de gran importancia porque la industria ladrillera sigue teniendo un gran auge en la construcción, al ser un material que continúa usándose para la edificación de viviendas. Los artesanos que se dedican a fabricar este producto tienen ganancias reducidas por lo que no consideran que su proceso de fabricación pueda mejorarse sin perjudicar su economía. En nuestro país hay poco más de 16 mil ladrilleras y en nuestro estado existen cerca de 258.

El impacto que estos artesanos tienen desde la adquisición de su materia prima y las técnicas tan rudimentarias para elaborar el ladrillo y darle el tratamiento necesario influyen directamente en el producto obtenido.

El uso de combustibles como madera, aserrín, plástico, llantas, papel, periódico, etc. suelen ser utilizados. Como es de imaginarse estos materiales no son propios para esta actividad, pero, ante la reducción de costos resulta muy útil su uso.

Al utilizar estos materiales en el proceso de quema se puede observar una variación en el tiempo y en la temperatura que se tiene en el interior de estos hornos, ya que no se logra tener un poder calorífico estándar por el tipo de combustible empleado. Al terminar este proceso el enfriamiento es muy lento y por medio de técnicas empíricas han determinado dejar la mitad del tiempo que tardan en la cocción en el reposo aproximadamente (20 horas).

El tipo de contaminación que se emite es alta y consideran que así seguirá ya que no pueden invertir en cambiar su método de cocción porque se verán afectados sus ingresos y será muy elevado el costo de fabricación.

Es por ello que se pretende estudiar el comportamiento que se lleva a cabo en un horno para la producción de ladrillos analizando el perfil de temperatura, materia prima y combustible empleado, permitiendo obtener un combustible con el mayor rendimiento y menor costo posible.

# CAPITULO 1

---

## Marco Teórico

En esta sección se presenta la descripción de los materiales utilizados para la fabricación de ladrillo artesanal, así como los conceptos fundamentales que sustentan el proceso. Asimismo se describe los diferentes tipos de combustible y la operación de un horno tradicional.

En la actualidad el uso de productos en los que un proceso de transferencia de calor está presente es muy común, inclusive la mayoría de las personas que los utilizan no tienen idea de lo que está sucediendo por ser algo tan común y cotidiano.

Como ocurre en el proceso de elaboración de cerámica, vidrio, refractarios, aislantes, ladrillos, aceros; sin mencionar lo que sucede en la industria alimenticia con la elaboración de las botanas, el pan, las tortillas, por mencionar algunos ejemplos.

Para propósitos de ingeniería es necesario comenzar el estudio con información básica acerca de unos cuantos fenómenos. Las fases de una sustancia simple, sólida, líquida o gaseosa, están asociadas con su contenido de energía. En la fase sólida las moléculas o átomos están muy cercanos, dando esto rigidez. En la fase líquida existe suficiente energía térmica para extender la distancia de las moléculas adyacentes, de manera que se pierde la rigidez. En la fase de gas, la presencia de energía térmica adicional resulta en una separación relativamente completa de los átomos o moléculas, de manera que pueden permanecer en cualquier lugar de un espacio cerrado. También se ha establecido que, donde quiera que ocurra un cambio de fase fuera de la región crítica, se involucra una gran cantidad de energía en esa transición.

Las leyes que pueden aplicarse a transiciones de masa pueden ser inaplicables a transiciones moleculares o atómicas, y aquellas que son aplicables a bajas temperaturas pueden no serlo a temperaturas altas.

## [1.1 Materia prima](#)

Los materiales que se emplean en la fabricación de ladrillos son polvos que presentan una granulometría diferente los cuales son:

- Arcilla
- Barro
- Dolomita
- Caliza
- Alúmina
- Sílice
- Tezontle

A continuación, se describe cada uno de los materiales utilizados:

## ▪ Arcilla [7]

El término arcilla no sólo tiene connotaciones mineralógicas, sino también de tamaño de partícula, en este sentido se consideran arcillas todas las fracciones con un tamaño de grano inferior a 2 mm como se muestra en la (Fig.1). Según esto todos los filosilicatos pueden considerarse verdaderas arcillas si se encuentran dentro de dicho rango de tamaños, incluso minerales no pertenecientes al grupo de los filosilicatos (cuarzo, feldespatos, etc.) pueden ser considerados partículas arcillosas cuando están incluidos en un sedimento arcilloso y sus tamaños no superan los 2 mm .

Son constituyentes esenciales de gran parte de los suelos y sedimentos debido a que son, en su mayor parte, productos finales de la meteorización de los silicatos que, formados a mayores presiones y temperaturas, en el medio exógeno se hidrolizan.

Presentan una estructura basada en el apilamiento de planos de iones oxígeno e hidroxilos. Los grupos tetraédricos  $(\text{SiO})_4^{4-}$  se unen compartiendo tres de sus cuatro oxígenos con otros vecinos formando capas, de extensión infinita y fórmula  $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{2-}$ , que constituyen la unidad fundamental de los filosilicatos. En ellas los tetraedros se distribuyen formando hexágonos. El silicio tetraédrico puede estar, en parte, sustituido por  $\text{Al}^{3+}$  o  $\text{Fe}^{3+}$ .



[Figura 1. Arcilla mineral](#)

Estas capas tetraédricas se unen a otras octaédricas de tipo gibbsita o brucita. En ellas algunos  $\text{Al}^{3+}$  o  $\text{Mg}^{2+}$ , pueden estar sustituidos por  $\text{Fe}^{2+}$  o  $\text{Fe}^{3+}$  y más raramente por Li, Cr, Mn, Ni, Cu o Zn. El plano de unión entre ambas capas está formado por los oxígenos de los tetraedros que se encontraban sin compartir con otros tetraedros (oxígenos apicales), y por grupos  $(\text{OH})^-$  de la capa brucítica o gibsitica, de forma

que, en este plano, quede un (OH)- en el centro de cada hexágono formado por 6 oxígenos apicales.

- **Barro [8]**

Es una mezcla semilíquida de agua y tierra compuesta por sedimentos (Fig. 2), partículas de polvo y arcilla. Los depósitos de barro se endurecen con el paso del tiempo hasta convertirse en lutita.



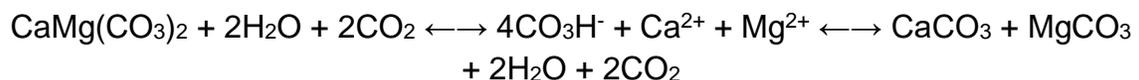
[Figura 2 Barro](#)

- **Dolomita [8]**

Es un mineral compuesto de carbonato de calcio y magnesio [CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>]. Se produce una sustitución por intercambio iónico del calcio por magnesio en la roca caliza (CaCO<sub>3</sub>) (Fig. 3).

Es un importante mineral de rocas sedimentarias y metamórficas, encontrado como mineral principal de las rocas llamadas dolomías y metadolomías, así como mineral importante en limolitas y mármoles donde la calcita es el principal mineral presente. También aparecen depósitos de dolomita en vetas hidrotermales, formando cristales que rellenan cavidades. Se ha encontrado también en serpentinitas y rocas similares.

La disociación natural de la dolomita por la acción del agua carbónica en rocas sedimentarias (dolomías) da lugar a numerosas formaciones cársticas, para dar calcita y magnesita pura, según la reacción reversible:



Abunda en la naturaleza en forma de rocas dolomíticas y se utiliza como fuente de magnesio y para la fabricación de materiales refractarios (es una roca sedimentaria química).

También se utiliza como fundente en metalurgia, manufactura de cerámica, pinturas y cargas blancas y como componente para fabricar el vidrio. Está totalmente proscrita como mineral en el clinker del hormigón por el contenido en MgO ya que da una alta expansividad. En cambio, como árido de hormigón valdría, siempre que se analice su reacción con el cemento.



[Figura 3 Dolomita](#)

- **Caliza [8]**

Es una roca sedimentaria como se observe en la (Fig. 4) está compuesta mayoritariamente por carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), generalmente calcita, aunque frecuentemente presenta trazas de magnesita ( $\text{MgCO}_3$ ) y otros carbonatos. También puede contener pequeñas cantidades de minerales como arcilla, hematita, siderita, cuarzo, etc., que modifican (a veces sensiblemente) el color y el grado de coherencia de la roca. El carácter prácticamente monomineral de las calizas permite reconocerlas fácilmente gracias a dos características físicas y químicas fundamentales de la calcita: es menos dura que el cobre (su dureza en la escala de Mohs es de 3) y reacciona con efervescencia en presencia de ácidos tales como el ácido clorhídrico.

Es una roca importante como reservorio de petróleo, dada su gran porosidad. Tiene una gran resistencia a la meteorización; esto ha permitido que muchas esculturas y edificios de la antigüedad tallados en caliza hayan llegado hasta la actualidad. Sin embargo, la acción del agua de lluvia y de los ríos (especialmente cuando se encuentra acidulada por el ácido carbónico) provoca su disolución, creando un tipo de meteorización característica denominada kárstica. No obstante, es utilizada en la construcción de enrocamientos para obras marítimas y portuarias como rompeolas, espigones, escolleras entre otras estructuras de estabilización y protección.

La roca caliza es un componente importante del cemento gris usado en las construcciones modernas y también puede ser usada como componente principal, junto con áridos, para fabricar el antiguo mortero de cal, pasta grasa para creación

de estucos o lechadas para «enjalbegar» (pintar) superficies, así como otros muchos usos por ejemplo en industria farmacéutica o peletera. Se encuentra dentro de la clasificación de recursos naturales entre los recursos no renovables (minerales) y dentro de esta clasificación, en los no metálicos, como el salitre, el aljez y el azufre.



[Figura 4. Caliza](#)

- **Alúmina**

Óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Junto con la sílice, es el componente más importante en la constitución de las arcillas y los esmaltes, confiriéndoles resistencia y aumentando su temperatura de maduración (Fig. 5).

El óxido de aluminio existe en la naturaleza en forma de corindón y de esmeril.

Tiene la particularidad de ser más duro que el aluminio y el punto de fusión de la alúmina son  $2072\text{ }^\circ\text{C}$  ( $2345,15\text{ K}$ ) frente a los  $660\text{ }^\circ\text{C}$  ( $933,15\text{ K}$ ) del aluminio, por lo que su soldadura debe hacerse a corriente alterna.

La industria del aluminio primario utiliza la alúmina fundamentalmente como materia prima básica para la producción del aluminio. Además, la alúmina se utiliza por sus propias cualidades como material cerámico de altas prestaciones en aplicaciones donde se necesite emplear un aislante eléctrico, en condiciones de altas temperaturas o buenas propiedades tribológicas.



[Figura 5 Alúmina](#)

- **Sílice [8]**

El óxido de silicio (IV) o dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) es un compuesto de silicio y oxígeno, llamado comúnmente sílice (Fig. 6). Este compuesto ordenado espacialmente en una red tridimensional (cristalizado) forma el cuarzo y todas sus variedades. Si se encuentra en estado amorfo constituye el ópalo, que suele incluir un porcentaje elevado de agua, y el sílex. Es uno de los componentes de la arena.

El óxido de silicio (IV) se usa, entre otras cosas, para hacer vidrio artificial, cerámicas y cemento.



[Figura 6 Sílice](#)

- **Tezontle [8]**

El tezontle es una roca roja de origen volcánico (ígnea) que se ubica en las laderas de los cerros, volcanes y depresiones. En Estados Unidos se le puede encontrar en el Valle de la Muerte, en Europa en el Volcán Stromboli y en México se lo encuentra en las sierras Oriental y Occidental y en volcanes como el Popocatepetl e Iztaccíhuatl.

Se produce a partir de piedra pómez, arena y magma. Su aspecto es deteriorado y esponjoso y algunas veces se convierte en una piedra dura. Se emplea en la

construcción de casas o diques, y en la industria minera por ser rico en minerales como calcio y zinc.

El tezontle tiene componentes a partir del bióxido de hierro, de ahí de su color rojizo como se muestra en la (Fig. 7). Es una piedra que no pesa, su textura es vesicular, burbujeada y porosa, de ahí de su esponjosidad. Entre sus propiedades se encuentra la de guardar el calor, pero no es permeable ni aislante. Algunos de los usos que se le da a esta roca son: arreglos florales, como cubierta en jardines xerófilos y/o cactarium, construcción de baños de temazcal, construcción de hornos de barbacoa y de pan, fabricación del tabicón negro. Molido se usa para relleno de calles de terracería y como fachada de algunas casas.



[Figura 7. Tezontle](#)

## [1.2 Transferencia de calor](#)

Es la ciencia que trata de predecir el intercambio de energía que puede tener lugar entre cuerpos materiales, como resultado de una diferencia de temperatura. La termodinámica enseña que esta transferencia de energía se define como calor. La transferencia de calor complementa los principios primero y segundo de la termodinámica, al proporcionar leyes experimentales adicionales que se usan para establecer la rapidez de la transferencia de energía [9].

### **Mecanismos de transferencia de calor**

Existen 3 modos de transferir calor:

- Conducción
- Convección
- Radiación

## CONDUCCION

Cuando en un cuerpo existe un gradiente de temperatura, la experiencia muestra que hay una transferencia de energía desde la región a alta temperatura hacia la región de baja temperatura. Se dice que la energía se ha transferido por conducción y que el flujo de calor por unidad de área es proporcional al gradiente normal de temperatura:

$$\frac{q}{A} \sim \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{Ec. (1)}$$

Al introducir la constante de proporcionalidad la Ec. 1 se convierte en la Ec. 1a como se muestra a continuación:

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{Ec. (1a)}$$

Donde  $q$  es el flujo de calor y  $\frac{\partial T}{\partial x}$  es el gradiente de temperatura en la dirección del flujo de calor. La constante positiva  $K$  se llama conductividad térmica del material. La Ec. 1a se llama ley de Fourier de la conducción de calor, define la conductividad térmica.

## CONVECCION

La convección es una de las tres formas de transferencia de calor. Se caracteriza porque se produce por medio de un fluido (líquido o gas) que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas. La convección se produce únicamente por medio de materiales, la evaporación del agua o fluidos. La convección en sí, es el transporte de calor por medio del movimiento del fluido. Por ejemplo, al trasegarlo mediante bombas o al calentar agua en una cacerola: el agua en contacto con la base de la cacerola asciende, mientras que el agua de la superficie, desciende, ocupando el lugar que dejó la caliente.

La transferencia de calor implica el transporte de calor en un volumen y la mezcla de elementos macroscópicos de porciones calientes y frías de un gas o un líquido. Incluye también el intercambio de energía entre una superficie sólida y un fluido o por medio de una bomba, un ventilador u otro dispositivo mecánico (convección mecánica, forzada o asistida).

En la transferencia de calor libre o natural, un fluido es más caliente o más frío. En contacto con una superficie sólida, causa una circulación debido a las diferencias de densidades que resultan del gradiente de temperaturas en el fluido.

La transferencia de calor por convección se expresa con la Ley del Enfriamiento de Newton Ec. 2:

$$\frac{dQ}{dt}q = hA(t_s - t_\infty) \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde h es el coeficiente de convección (o coeficiente de película), A es el área del cuerpo en contacto con el fluido,  $T_s$  es la temperatura en la superficie del cuerpo y  $T_\infty$  es la temperatura del fluido lejos del cuerpo.

## RADIACION

Cuando un cuerpo está más caliente que su entorno, pierde calor hasta que su temperatura se equilibra con la de dicho entorno. Este proceso de pérdida de calor se puede producir por tres tipos de procesos: conducción, convección y radiación térmica. De hecho, la emisión de radiación puede llegar a ser el proceso dominante cuando los cuerpos están relativamente aislados del entorno o cuando están a temperaturas muy elevadas. Así, un cuerpo muy caliente emitirá, por norma general, gran cantidad de ondas electromagnéticas. La cantidad de energía radiante emitida o calor radiado viene dada por la Ley de Stefan-Boltzmann. De acuerdo con esta ley, dicho calor radiado es proporcional a su temperatura absoluta elevada a la cuarta potencia:

$$P = \alpha(\sigma T^4)S \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde:

P: es la potencia radiada.

$\alpha$ : es un coeficiente que depende de la naturaleza del cuerpo;  $\alpha = 1$  para un cuerpo negro perfecto.

S: es el área de la superficie que radia.

$\sigma$ : es la constante de Stefan-Boltzmann, que tiene un valor de  $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

T: es la temperatura absoluta.

### 1.3 Caracterización de materiales

Las cerámicas son compuestos inorgánicos y no metálicos, de carbono, oxígeno, boro y silicio unidos en forma iónica. Tienen puntos de fusión relativamente altos,

grandes módulos elásticos, gran dureza y resistencia mecánica escasa conductividad eléctrica y térmica, son muy frágiles.

La mayoría de los usos de las cerámicas en la ingeniería son como materiales para altas temperaturas como refractarios en la industria de los materiales y de tratamientos térmicos, como revestimientos y materiales en los motores de turbinas de gas para uso aéreo y terrestre.

Se ha realizado mucha investigación sobre estos materiales que ha dado lugar a su clasificación como cerámicas tradicionales y avanzadas.

Cerámicas tradicionales son las que proceden o se elaboran de arcilla o minerales no arcillosos, siendo principalmente del grupo de los óxidos. Los productos que se elaboran son: refractarios, cemento, cerámicas blancas, esmalte en porcelana y productos estructurales de arcilla.

Cerámicas avanzadas o “técnicas, de ingeniería” se sintetizan por lo común con una gran pureza. Presentan propiedades mecánicas resistentes a la corrosión/oxidación o propiedades eléctricas, ópticas y magnéticas mejores que las tradicionales. Algunos de estos casos son los carburos, nitruros, boruros, óxidos puros, cerámicas magnéticas, ferroeléctricas, piezoeléctricas, superconductoras recién descubiertas.

EL tipo de estructura que presentan estos materiales es cristalina y depende de la razón de los radios iónicos y de la conservación de la neutralidad eléctrica.

#### Materiales utilizados principalmente

- Alúmina
- Sílice
- Cal viva
- Magnesio
- Carbonato de calcio
- Cal dolomítica
- Carbonato de potasio
- Carbonato
- Sulfato

#### Elaboración de cerámicas

En cualquier diagrama de fase se observa que el punto de fusión es muy alto. Los óxidos nunca se funden para modelarlos como se realiza en los metales.

#### 1.4 Propiedades mecánicas y térmicas

Las pruebas que se realizarán se harán con probetas que tengan las siguientes dimensiones:

Largo: 15 cm

Ancho: 2.5 cm

Espesor: 1 cm

Es por ello que se analizarán y evaluarán propiedades mecánicas y térmicas objeto principal de estudio y que a partir de ello se podrá determinar la viabilidad y/o factibilidad para la aprobación de dicha fórmula propuesta.

Se evaluarán las siguientes propiedades al ser un ladrillo se caracterizará y evaluará con las propiedades de una cerámica frágil, considerado así por sus propiedades químicas y de estructura atómica.

Cada una de las probetas realizadas se someterá a pruebas de compresión, flexión, porosidad, % contracción, módulo de ruptura, pérdidas por calcinación.

Una de las pruebas que nos da mayor grado de evaluación para estos materiales es el módulo de ruptura y la prueba de compresión, aunque este material no está sometido 100% a este tipo de carga es muy recomendable y conveniente que se realice este ensayo.

#### 1.5 Ladrillo: uso, propiedades y aplicaciones

##### TIPOS DE LADRILLOS

El ladrillo es una pieza cerámica muy utilizada en la construcción, fabricada a base de arcillas cocidas. Cada uno de los tipos de ladrillos que veremos tienen características especiales que los hacen apropiados para determinados casos.

Adobe de tierra: Está hecho de barro crudo, y se ha usado desde la antigüedad. Habitualmente se utiliza en construcciones, precarias, rústicas o en bioconstrucción principalmente por su capacidad de aislación térmica.



Ladrillo cocido de tierra: Es un ladrillo cocido de tierra o arcilla, fabricado forma artesanal. Las dimensiones varían de acuerdo al país y a las normas. No tiene perforaciones y sus caras lucen rústicas. También se lo conoce como ladrillo de tejar o manual tipo M.



Ladrillo macizo: Su manera de construcción, extrusionado o prensado, hace que tenga mejor acabado y que sus dimensiones sean exactas.



Ladrillo macizo con cazoleta: También conocido como ladrillo con rebaje, el cual es útil para albergar mortero y es especial para tabiques con llagas o juntas de poco espesor, o sin juntas.



Ladrillo perforado: Es un ladrillo que tiene perforaciones en la tabla de más del 10% de su superficie, en caso de ser menos se lo considera un ladrillo macizo. También se conoce como ladrillo liviano. Aumenta la resistencia del tabique al penetrar el mortero por las perforaciones.



Ladrillo refractario: Es usado en lugares donde habitualmente se producen fuego y altas temperaturas. Generalmente está constituido de los mismos materiales que un ladrillo común pero en distintas proporciones. Útil para calderas y chimeneas.



Ladrillo clínker o gresificado: Están compuestos de arcillas especiales cocidas a altas temperaturas, con lo que se obtiene un ladrillo de mayor densidad y baja absorción de agua. De terminación gres, esmaltado y rústico.

Ladrillo cara vista: Ladrillo gresificado, especial para fachadas y zonas donde el tabique estará al descubierto. Generalmente de acabado esmaltado.



Ladrillo hueco: Con perforaciones en el canto o en la testa, lo que reducen el volumen del material utilizado y con esto su peso. Se utilizan en tabiques que no requieran soportar mucha carga.



### Propiedades de los ladrillos más comunes

El ladrillo es un elemento básico para la construcción tradicional. Sin dudas es la pieza fundamental para levantar muros, sin dejar de mencionar que en líneas generales se trata de un rectángulo de arcilla cocida mezclada con otros materiales.

Puede tener diferentes tamaños y características diversas, por lo que en esta ocasión en particular describiremos tanto las distintas clases de ladrillos que existen como sus propiedades.

Los ladrillos macizos tipo P: Disponen de perforaciones en forma de círculo o rombo en una de sus caras, sobresalen por garantizar resistencia en los muros.

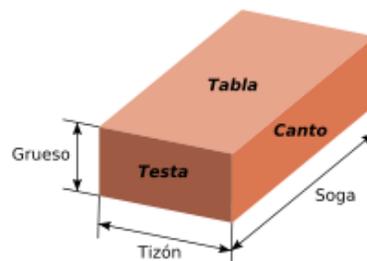
Los ladrillos de tipo H: Son huecos, cuentan con perforaciones pasantes, dobles o simples en las caras de los costados. Se utilizan especialmente para aquellos tabiques que no deben sostener grandes cargas. También son recomendables para paredes dobles, cuyo aspecto principal es el de tener material aislante entre ambas caras.

Ladrillo refractario: Se emplea cuando el muro necesariamente tiene que tolerar temperaturas altas por alguna razón determinada. Presentan altos contenidos de sílice y/o alúmina, sin dejar de mencionar que se utiliza principalmente en hornos y chimeneas.

Ladrillo de cara vista: También conocido como ladrillo de tipo V. Este se usa especialmente en las fachadas, ya que su terminación es sumamente agradable a la vista. Asimismo, no podemos dejar de mencionar que se distingue por ser resistente al agua. Estos ladrillos se fabrican con maquinarias y arcillas especiales a una temperatura que permite suprimir casi toda la porosidad. Esto hace que la pieza sea mucho más densa y resistente a la compresión que otros ladrillos convencionales.

En relación con las condiciones extremas que pueden soportar, es posible identificar varias clases de ladrillos. Los MW toleran situaciones climáticas intermedias (tales como escarcha y helada), los SW resisten situaciones adversas extremas (tales como congelación) y los NW son especiales para interiores, por el simple hecho de que no son capaces de sobrellevar cambios radicales de clima.

### ***Nombres de las partes de un ladrillo rojo***



### Medidas estándar de los ladrillos en México

Ladrillo: 1.5x12x24

Tabique macizo: 4x12x24,

Tabique con perforaciones: 6x12x24, 10x12x23, 12x12x24 (distintos tipos de perforaciones)

Tabique hueco vertical: 6x12x24

Tabique doble hueco vertical: 12x12x24

## 1.6 Tipos de biomasa

Leña, [ (Netpellet, 2016), 17 ]

La leña es el combustible por excelencia a lo largo de la historia. Sus mayores ventajas pueden ser su disponibilidad si tenemos cultivos o terrenos y sobre todo su mayor poder calorífico con respecto a combustibles como el pellet.

Su desventaja es su difícil automatización para calderas y estufas. Realmente hay calderas preparadas para trabajar con leña y briquetas, pero tienen que tener un largo y ancho homogéneo y resulta más engorroso.

Briquetas

Se trata de cilindros de hasta 50 cm de largos y unos 10 de anchos producidos por el prensado de serrín y virutas. Su fabricación es similar a la de los pellets y su uso como el de la leña.

Pellet

El pellet es un producto granulado que se produce a partir de las podas de montes (se usa el ramaje), el serrín de industrias madereras. Se produce un serrín de determinado tamaño y las prensas (o pelletizadoras) se encargan de hacer estos pequeños cilindros. No necesitan ningún tipo de aglomerante ya que las sustancias de la propia madera mantienen las partículas unidas.

Hueso de aceituna

Se obtiene de las almazaras como un subproducto de deshecho en el proceso de producción del aceite de oliva. Tras el trabajo sobre las aceitunas queda una masa de pulpa, piel y hueso. De ella se extrae el hueso con máquinas “deshuesadoras” que se encargan de extraerlo, limpiarlo y triturarlo para su uso. Al final se obtiene un producto de menor tamaño que el pellet (hay que usar quemadores especiales con el cenicero más fino) y hay que dejarlo para que pierda humedad durante cierto tiempo.

Cabe destacar, llegados a este punto, la importancia de la humedad para el uso de este tipo de combustibles. Un hueso de aceituna con un alto grado de humedad no quemará bien y ensuciará la caldera y las salidas de humos.

## Cáscara de almendra

Es usada menos que los dos materiales mencionados anteriormente, depende de las zonas y/o regiones. Es un proceso similar, durante la obtención de la almendra se aprovechan las cáscaras que se trituran hasta obtener un tamaño homogéneo para su uso.

La principal ventaja de este tipo de productos es que, al ser granulados, por una parte, se almacenan mejor, es más sencilla la alimentación de las calderas o estufas y por otra parte, no necesitan “ahogar” el fuego para regular la temperatura sino que la máquina se encarga de alimentar más o menos dependiendo de la necesidad y así se produce menos CO<sub>2</sub> al ser una combustión más completa.

Para seleccionar el combustible más adecuado, debe tomarse en cuenta no sólo el precio sino también su procedencia (aunque suelen ser más baratos los combustibles locales, no es así en el caso de los pellets, por ejemplo, que suelen ser más caros los nacionales).

## Ventajas e Inconvenientes



Con biomasa nos referimos a un material orgánico susceptible de ser aprovechado energéticamente. Por lo tanto, biomasa pueden ser muchas cosas, puede ser tanto de origen animal como vegetal. En este caso concreto se habla de la calefacción y la biomasa de uso común para calentar, siendo estas materias vegetales.

### Ventajas:

- Se considera que tiene una producción nula de CO<sub>2</sub> puesto que el que genera durante su combustión es el mismo que absorbieron las plantas cuando crecieron. Esto es matizable y en algunos casos de un modo importante. ¿Y el CO<sub>2</sub> que se genera durante la transformación del material para su aprovechamiento en la calefacción? Se observará

como unos tipos tienen un proceso más largo que otros y eso será fundamental en su precio y en su factor contaminante.

- No emite contaminantes sulfurados ni nitrogenados y apenas partículas sólidas.
- Puede ser una fuente de empleo rural y un aprovechamiento lógico de residuos de otras industrias que hasta ahora se despreciaban.
- Evita la dependencia de combustibles como el petróleo.

#### **Inconvenientes:**

- Mayor costo de producción.
- Son combustibles menos “puros” y por lo tanto tienen una densidad energética menor. Lo que significa que, para producir la misma energía con gasóleo, se ocupa menos espacio que con la biomasa.

Otro inconveniente de estos sistemas de calefacción que utilizan combustibles alternativos, es su alto costo respecto a las calderas convencionales. Esto se debe a que su uso está menos generalizado que aquellas que utilizan combustibles fósiles.

#### [1.7 Horno tradicional para producir ladrillo artesanal](#)

Los hornos artesanales que actualmente se utilizan en el sector ladrillero, son hornos cúbicos de base rectangular, de tiro ascendente natural, sus capacidades de carga oscilan entre los 10000 a 15000 ladrillos artesanales. La temperatura de dentro de la cámara de cocción del horno llega a los 300°C para dar lugar a la cocción llegando su temperatura de operación de (990-1000°C), posteriormente el enfriamiento a temperatura ambiente que es de (15-20°C), los ladrillos permanecen en el horno por un lapso de 30 horas.

Al ser un horno de bóveda se han realizado unos canales en la parte superior para poder cargar aserrín en los mismos que nos ayuda a mejorar la calidad y secado del producto, ya que el principal problema de estos hornos es que tiene mayor temperatura en la parte de la cámara de cocción, mientras que en la parte superior los ladrillos van quedando sin una quema total lo que produce (un color tenue y una apariencia porosa).

Se trata de un horno, vertical fijo con tres bocas inferiores de tamaño 4.5 x 2.8 x 5.2 m con una compuerta frontal superior que es donde se carga al horno, las paredes se encuentran recubiertas con ladrillos de adobe que sirve como aislante térmico y no permite que el calor escape hacia el exterior. **[10]**.

### 1.8 Operación del horno

La operación del horno consta de las siguientes etapas:

1. Se carga los materiales a quemarse, dejando espacios vacíos por donde pueda fluir el fuego y los gases de combustión. Algunos productores en las últimas capas de la carga incluyen carbón mineral con el objeto de uniformizar la temperatura de cocción de los productos.
2. Haciendo uso de leña (bolillos o rajas de eucalipto), se enciende lentamente por un lapso de 4 horas aproximadamente, hasta completar el secado de los productos a quema. Luego se continúa con la quema utilizando como combustibles aserrín, cáscara de café.

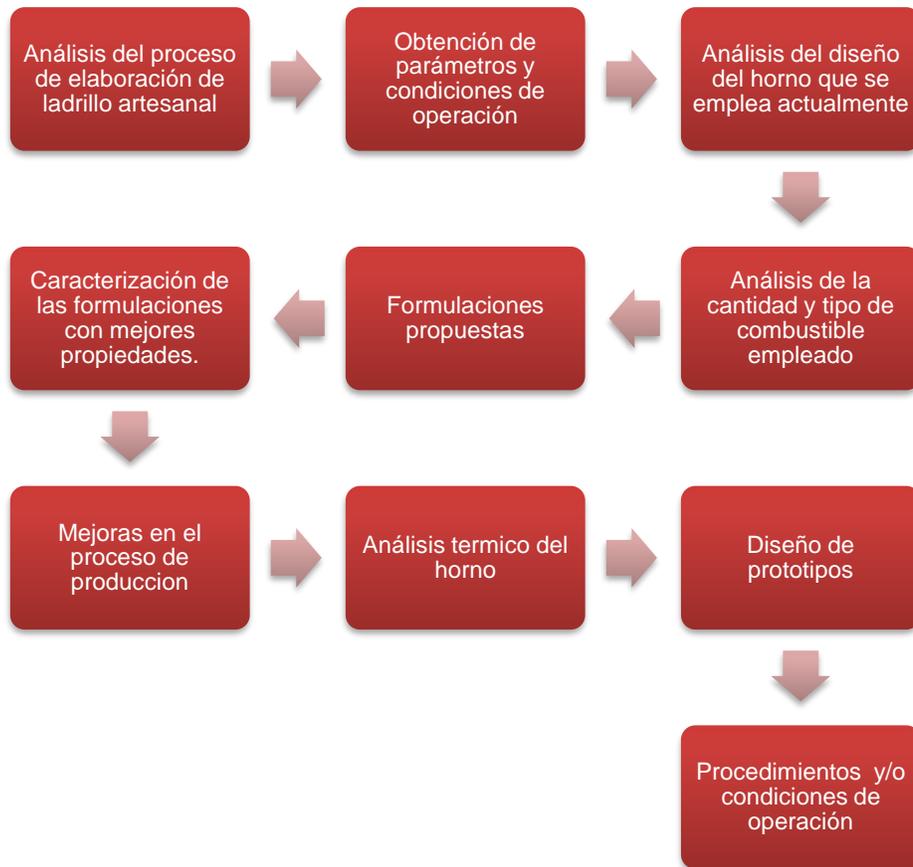
# CAPITULO 2

---

## Metodología

Se presenta la descripción metodológica para la optimización del proceso de elaboración de ladrillo artesanal, incluyendo los materiales, formulaciones, combustibles empleados y el análisis térmico del horno actual.

El proyecto estudio teórico-experimental para la optimización de un horno para producir ladrillo se divide en varias secciones como se muestra en la (Fig. 8) y en el Anexo A (tabla A1) describe brevemente las etapas que conforman dicho estudio



[Figura 8 Diagrama de metodología a seguir](#)

PROPUESTA: Analizar, Mejorar, Reformular y Optimizar el proceso para la elaboración de ladrillo artesanal aumentando la eficiencia del proceso y reduciendo las mermas.

### [2.1 Análisis del proceso de elaboración de ladrillo artesanal](#)

El proceso para elaborar ladrillo artesanal consta de las siguientes etapas que a continuación se mencionan, esta es la secuencia que normalmente siguen los productores:

- Obtención de materia Prima

Normalmente la ladrillera adquiere la arcilla de una tercera persona (Fig. 9) y para la obtención del combustible les es traído aserrín, o madera como tal.



[Figura 9 Arcilla adquirida por el productor](#)

- Cernido

Regularmente ciernen la arcilla con una malla, para reducirla a pequeñas partículas y retirar pequeñas piedras. La cantidad del material cernido depende de la cantidad de ladrillos que se va a preparar.

- Mezclado

El material es simultáneamente mezclado con cantidades suficientes de agua. No es una variable que tengan controlada. La mezcla consta de arcilla, tierra “lama” (tipo de tierra que sirve como abono para mejorar las áreas verdes en los jardines o cultivos), en algunos lugares utilizan estiércol, arena y agua; es realizada por más de una persona usando palas, normalmente este proceso requiere una jornada de 3 horas.

- Moldeo

Una vez que la preparación ha sido mezclada con la consistencia deseada, es trasladada en carretillas al secadero donde se colocan las gaveras (moldes de madera, Fig.10) sobre el piso y por llenado manual se van formando los ladrillos, el tiempo de reposo para desmoldar es de unos 2 minutos y continuar sucesivamente hasta que se acabe la mezcla.



[Figura 10 Gravera](#)

- Secado

El proceso se lleva a cabo en un periodo de 8 días muy soleados o de (15-20) días con poca luz solar.

- Cargado

Después de que el ladrillo pierde la humedad deseada viene el cargado del horno, este proceso se realiza en un día entero, acomodando correctamente el ladrillo en el interior del horno dejando pequeños huecos entre tabique y tabique para que el flujo de calor circule por todo el horno.

- Quema del ladrillo artesanal

El horno se enciende a cualquier hora del día, pero se recomienda sea en la mañana ya que requiere un tiempo de quemado de 36 a 50 horas dependiendo las dimensiones y región en la que se encuentre ubicado el horno, de la misma manera se continúa alimentando el combustible que se necesario.

- Enfriamiento y descarga

El tiempo de enfriamiento es de 72 a 96 h hasta llegar a la temperatura ambiente promedio de (25-30 °C), la descarga se lleva a cabo en un día, aunque puede permanecer cargado hasta el día de su venta final.

Como se menciona al inicio de esta sección esta serie de pasos se sigue por los productores de ladrillo, las mejoras que se proponen son la medición de las propiedades reológicas como se muestra en la (Tabla 1) de dicho material que para ellos es considerado como un lodo o barro, un material de construcción sin ningún tipo de tratamiento.

Tabla 1 Propiedades reológicas

Propiedades que deben considerarse en una pasta
<b>Densidad</b>
<b>Viscosidad</b>
<b>Tixotropía</b>

## 2.2 Obtención de parámetros y condiciones de operación

Los parámetros operacionales varían de una región a otra por las condiciones climáticas. La Tabla 2 muestra las condiciones promedio de operación que prevalecen en el estado de Hidalgo cada una de las regiones analizadas se identifican como Zona I y Zona II.

Tabla 2 Parámetros promedio de operación

<b>Variable de control</b>	<b>Zona I</b>	<b>Zona II</b>
Tipo de horno	Rectangular/Cuadrado	Rectangular
Temperatura de quema	900°C	Desconocida
Tiempo de quema	36 horas	45 horas
Tiempo de enfriamiento	48-72 horas	96 horas
Capacidad de horno	8000 piezas	9000 piezas
Humedad promedio	1.3%	2%

Las condiciones de operación son factores importantes para poder reducir en cantidad (%) las mermas que se tienen actualmente.

Tener un control adecuado del % de humedad es el primer factor importante para poder tener un producto con calidad y aspecto físico que es importante para su venta.

## 2.3 Análisis del diseño del horno que se emplea actualmente

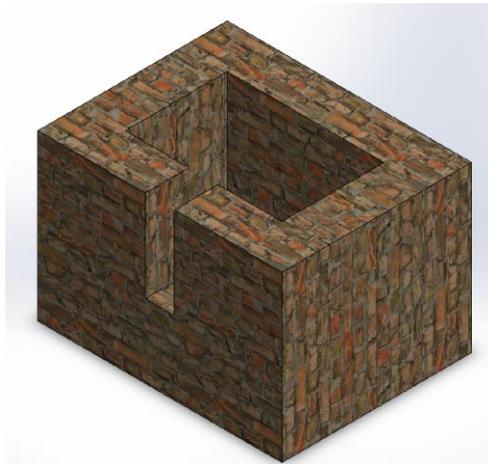
Los hornos que actualmente se emplean para la quema de ladrillo cuentan con los siguientes componentes, que a continuación se mencionan:

- Soporte triangular (Fig.11)



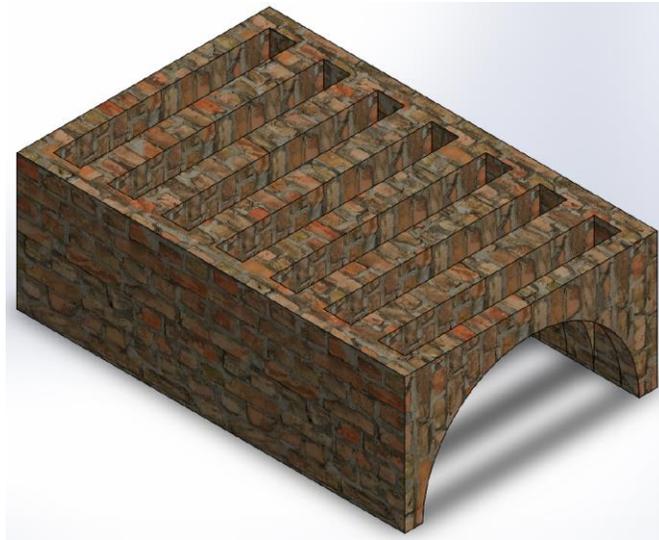
[Figura 11 Soporte triangular](#)

- Cámara de cocción (Fig. 12)



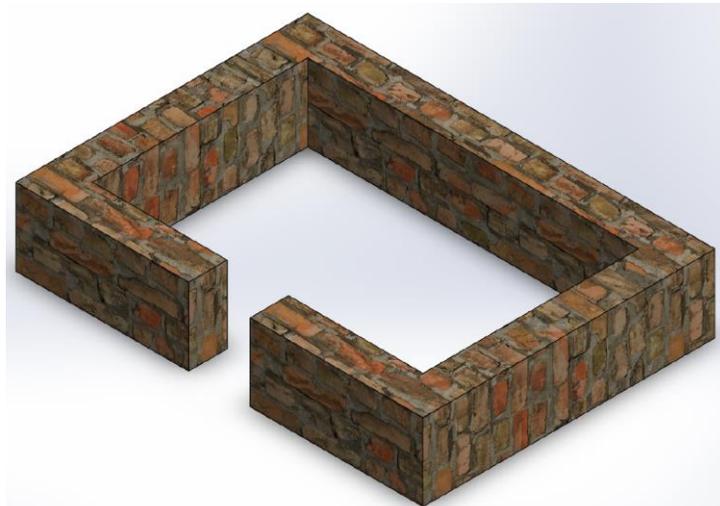
[Figura. 12 Cámara de cocción](#)

- Parrilla (Fig. 13)



[Figura. 13 Parrilla](#)

- Base (Fig. 14)



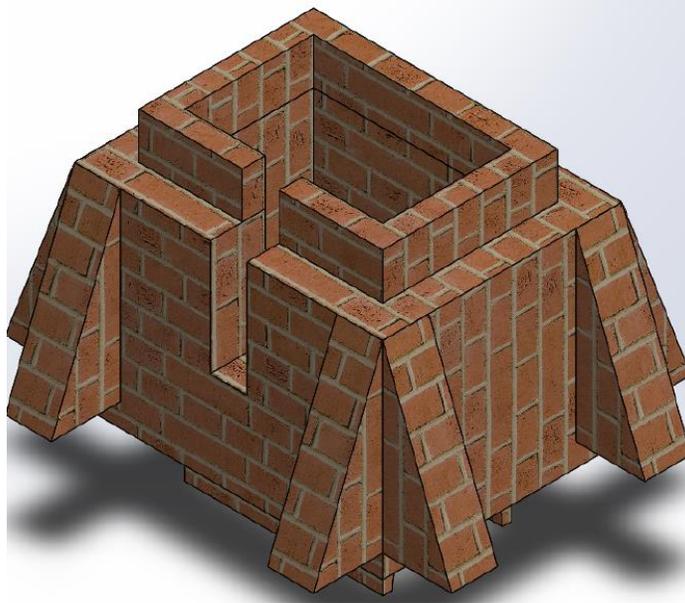
[Figura. 14 Base](#)

Cada una será modificada en espesores de acuerdo con las formulaciones propuestas.

Se tiene en cuenta que al adquirir mayor resistencia y mayor coeficiente de transferencia de calor al ser reformulado podrá tener un mayor ciclo de vida y rendimiento que servirá para ahorrar tiempo en construir el horno, se pretende utilizar este horno por lo menos en 12 quemas y no en 2 como se hace actualmente.

La estructura que tendrá el ladrillo será redondeada en las aristas para reducir pérdidas de calor, evitar fisuras, dar mayor estabilidad y reducir mermas por

calcinación. En la Fig. 15 se muestra el ensamble del diseño actual de un horno con un ladrillo común de arista a 90°.



[Figura. 15 Diseño actual](#)

#### [2.4 Análisis de la cantidad y tipo de combustible empleado](#)

Los combustibles que se emplean actualmente para alimentar dichos hornos son madera (cimbra y/o aserrín) comúnmente leña, tarimas, llantas, plástico inclusive papel. El no tener una homogeneidad en el combustible incide directamente en las condiciones de calor que se suministra a dicho horno ya que como se muestra en la Tabla 3.

[Tabla. 3 Cp de combustibles](#)

(Robert H. Perry, 2010)

<b>Material</b>	<b>Cp, Cal/g°C</b>
Madera	0.45-.65
Plástico	0.3
Papel	0.32

La cantidad de combustible empleado varía de una región a otra por las condiciones climáticas y las creencias de los productores, pero ellos tienen como única medida el alimentar continuamente el horno para que no pierda temperatura sin importar los kg que no son una variable medible únicamente es el estar alimentando continuamente para que no descienda la temperatura del interior y ocasiones que los ladrillos queden crudos. La cantidad aproximada de combustible son 200 kg de madera en promedio ya que la humedad de esta influye directamente.

## 2.5 Caracterización de las formulaciones con mejores propiedades.

Se considera necesario evaluar cada uno de los parámetros que se mencionan a continuación:

- Pérdidas por calcinación (C)
- Porosidad (A)
- Contracción lineal (L)
- % de humedad (H)
- Módulo de ruptura (R)
- Esfuerzo a la compresión (E)

Para evaluar cada una de las propiedades mencionadas anteriormente se emplean las siguientes ecuaciones [11,12] que son independientes una de otra. El tamaño de la probeta que se evalúa cuenta con las siguientes dimensiones, 2.5x1 x15 cm respectivamente (Fig. 16).

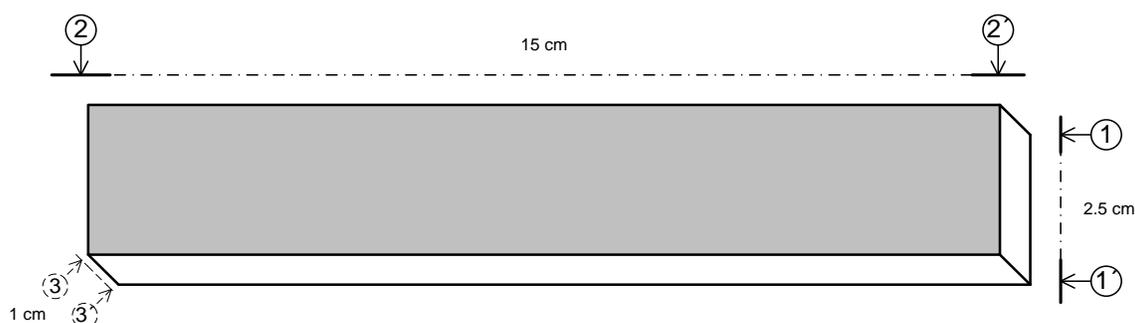


Figura. 16 Probeta para pruebas

- Pérdidas por calcinación

La Ec. (4) permite calcular el % de material que se pierde al sinteriza **INDICE** usar materiales que contienen C en su estructura común que suceda.

$$C = \frac{P_V - P_C}{P_V} * 100 \quad (\text{Ec. 4})$$

- Porosidad

La Ec. (5) nos ayuda a determinar qué tan factible es la formulación propuesta y si no influirá en las propiedades mecánicas y térmicas del ladrillo.

$$A = \frac{M_H - M_S}{M_H} * 100 \quad (\text{Ec. 5})$$

- Contracción lineal [13]

La Ec. (6) es fundamental para poder caracterizar las formulaciones propuestas y considerar su factibilidad de acuerdo al análisis dimensional que requiere la pieza a elaborar.

$$L = \frac{10.1 - D_C}{10.1} * 100 \quad (\text{Ec. 6})$$

- % de humedad

En la Ec. (7) se considera H, un factor sumamente importante para reducir mermas y estabilizar el proceso de secado.

$$H = \frac{P_H - P_S}{P_H} * 100 \quad (\text{Ec. 7})$$

- Módulo de ruptura [14]

$$R = \frac{3P * L}{2b * d^2} \quad (\text{Ec. 8})$$

A partir de la Ec. (8) se puede evaluar si las formulaciones propuestas contienen los materiales necesarios para ser empleados en la construcción por estar sometidas a tensión y compresión en algún momento de su vida útil en la mampostería.

Otro factor que se consideró en esta sección del proyecto fue la energía calórica (Q) que se obtiene utilizando la Ec. (9).

- Energía calórica [15]

$$Q = \frac{k}{\varepsilon} * (T_1 - T_2) * \psi \quad (\text{Ec. 9})$$

## 2.6 Mejoras en el proceso de producción

Las mejoras que se harán en el proceso son las siguientes:

- Controlar la granulometría de los materiales empleados.
- Agregar un aditivo como  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  para reducir el tiempo de secado.
- Medir la densidad de la mezcla.
- Medir el % volumen de agua que se adiciona.

Cada una de las formulaciones propuestas fue evaluada con una densidad de 1.60-1.70 g/cm<sup>3</sup>. Se controló el porcentaje de humedad teniendo como un máximo 20%.

## 2.7 Análisis térmico del horno actual

En esta parte del proyecto se hará un balance del flujo de calor que se emplea actualmente en el proceso de elaboración de ladrillo artesanal dependiendo de la geometría que se esté analizando (rectangular o cuadrada) y la temperatura promedio de la región. Se utilizará la Ec. (9).

También se utilizará el  $Q_{\text{TOTAL}}$  de quema como se muestra en la Ec. 10 y la eficiencia térmica del proceso actual y el de la nueva formulación.

- Calor total de quema

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{paredes}} + Q_{\text{techo}} \quad (\text{Ec. 10})$$

- Eficiencia térmica

$$\eta = \frac{\text{Calor suministrado}}{\text{Calor de cocción}} \quad (\text{Ec. 11})$$

## 2.8 Análisis de la transferencia de calor dentro del horno

### 2.8.1 Datos promedios de operación de un horno para producir ladrillo

Datos obtenidos empíricamente

- Energía promedio utilizada para secar los ladrillos = 26829.79 MJ
- Energía promedio utilizada para secar la leña = 2132.5 MJ
- Energía para secar el aserrín = 477.56 MJ
- Energía promedio suministrada por la leña = 76010.629 MJ
- Energía promedio suministrada por el aserrín = 62669.673 MJ
- Energía total suministrada al horno = 138680.3 MJ
- Calor específico del aserrín seco = 15 MJ

#### \* Temperatura de operación

Se utilizará una temperatura ambiente de 20°C, que es el valor de la temperatura promedio de la región que se utilizará para el análisis. Para los cálculos se considera este valor.

$$T_{\text{ambiente}} = 20^{\circ}\text{C}$$

#### \* Temperatura de flama

Se considera que la temperatura de flama es teórica y se hará un cálculo del calor que suministra.

$$Q_{\text{ASERRIN}} = \text{Energía Suministrada Aserrin} \\ - \text{Energía Perdida Secado Ladrillos y Aserrin}$$

$$Q_{\text{ASERRIN}} = 62669.673 - 27307.35$$

$$Q_{ASERRIN} = 35362323 \text{ KJ}$$

$$T_f = \left( \frac{Q}{C_{P \text{ ASERRIN}}} \right) + \left( \frac{C_{P \text{ AIRE}}}{C_{P \text{ ASERRIN}}} \right) (T_{\text{AMBIENTE}})$$

$$T_f = \left( \frac{35362323 \text{ KJ}}{15000 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}^\circ\text{k}}} \right) + \left( \frac{1.012 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}^\circ\text{k}}}{15000 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}^\circ\text{k}}} \right) (293^\circ\text{K})$$

$$T_f = 2357.49^\circ\text{C}$$

\* Razón de pérdida de calor por conducción del horno propuesto a través de las paredes

\* Base del horno y techo

- $K = 0.72 \text{ W / m }^\circ\text{C}$ , (ver anexos tabla A5).
- $A = (4 \text{ m}) (4 \text{ m}) = 16 \text{ m}^2$
- $T_1 = 1000^\circ\text{C}$
- $T_2 = 20^\circ\text{C}$
- $L = 0.5 \text{ m}$

$$Q = KA \frac{(T_1 - T_2)}{L}$$

$$Q = \left( 0.72 \frac{\text{W}}{\text{m}^2^\circ\text{C}} \right) (16 \text{ m}^2) \frac{(1000 - 20)^\circ\text{C}}{(0.5 \text{ m})} = 22.57 \text{ KW}$$

$$Q = 22.57 \text{ KW} * 2$$

$$Q = 45.15 \text{ KW}$$

\*Área de las otras paredes del horno: Área = (1 m) (4 m) = 4 m<sup>2</sup>

$$Q = KA \frac{(T_1 - T_2)}{L}$$

$$Q = \left( .72 \frac{\text{w}}{\text{m}^2^\circ\text{C}} \right) (4 \text{ m}^2) \frac{(1000 - 18)^\circ\text{C}}{(1 \text{ m})} = 5.35 \text{ KW}$$

$$Q = 5.35 \times 4$$

$$Q = 21.43 \text{ KW}$$

$$Q_{total \text{ conduccion}} = 25.15 \text{ KW} + 21.43$$

$$Q_{total \text{ conduccion}} = 66.58 \text{ KW}$$

El resultado anterior representa la pérdida de calor por conducción del interior al exterior del horno; esta pérdida de calor toma en cuenta las diferentes áreas y espesores de las paredes.

\* Pérdida total de calor por conducción en toda la cámara de cocción del horno

$$Q_{total \text{ conduccion}} = 45.15 \text{ KW} + 21.43 \text{ KW}$$

$$Q_{total \text{ conduccion}} = 66.58 \text{ KW}$$

# CAPITULO 3

---

## Propuesta de mejora

En este capítulo se realiza el análisis térmico del horno y se presentan las formulaciones propuestas para mejorar la calidad del ladrillo artesanal producido en la región del Estado de Hidalgo. Asimismo se analizan las fallas más comunes que se presentan en el proceso y la solución respectiva.

### 3.1 Análisis térmico del horno

#### \* Temperatura de flama

Se considera que la temperatura de flama es teórica y se hará un cálculo del calor que suministra.

$$Q_{ASERRIN} = \text{Energia Suministrada Aserrin} \\ - \text{Energia Perdida Secado Ladrillos y Aserrin}$$

$$Q_{ASERRIN} = 62669.673 - 27307.35$$

$$Q_{ASERRIN} = 35362323 \text{ KJ}$$

$$T_f = \left( \frac{Q}{C_P ASERRIN} \right) + \left( \frac{C_P AIRE}{C_P ASERRIN} \right) (T_{AMBIENTE})$$

$$T_f = \left( \frac{35362323 \text{ KJ}}{15000 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}^\circ\text{k}}} \right) + \left( \frac{1.012 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}^\circ\text{k}}}{15000 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}^\circ\text{k}}} \right) (291^\circ\text{K})$$

$$T_f = 2357.49^\circ\text{C}$$

\* Razón de pérdida de calor por conducción del horno propuesto a través de las paredes

\* Base del horno y techo

- $K = 1.34 \text{ W / m }^\circ\text{C}$ , (ver anexos tabla A5).
- $A = (1 \text{ m}) (1 \text{ m}) = 1 \text{ m}^2$
- $T_1 = 1100^\circ\text{C}$
- $T_2 = 18^\circ\text{C}$
- $L = 1 \text{ m}$

$$Q = KA \frac{(T_1 - T_2)}{L}$$

$$Q = \left(1.34 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}\right) (1 m^2) \frac{(1000 - 18)^\circ C}{(1 m)} = 1.31 KW$$

$$Q = 1.31 KW * 2$$

$$Q = 2.63 KW$$

\*Área de las otras paredes del horno: Área = (1 m) (.7 m) = .7 m<sup>2</sup>

$$Q = KA \frac{(T_1 - T_2)}{L}$$

$$Q = \left(1.34 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}\right) (.7 m^2) \frac{(1000 - 18)^\circ C}{(1 m)} = 0.9211 KW$$

$$Q = 0.9211 x 4$$

$$Q = 3.68 KW$$

$$Q_{total \text{ conduccion}} = 2.63 KW + 3.68$$

$$Q_{total \text{ conduccion}} = 6.31 KW$$

El resultado anterior representa la perdida de calor por conducción del interior al exterior del horno, este valor de perdida de calor toma en cuenta las diferentes áreas y espesores de las paredes.

\* Pérdida total de calor por conducción en toda la cámara de cocción del horno

$$Q_{total \text{ conduccion}} = 6.31 KW + 2.63 KW$$

$$Q_{total \text{ conduccion}} = 8.94 KW$$

### 3.2 Formulaciones propuestas

Para poder evaluar las propiedades térmicas, mecánicas y caracterizar las formulaciones propuestas se tienen que comparar con la mezcla empleada actualmente por los productores de ladrillo

Se proponen 11 formulaciones identificadas por una letra y un número consecutivo, tal y como se muestra en la Tabla 4.

**Tabla 4 Formulaciones propuestas**

1A		2A	
ADITIVO	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	ADITIVO	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>
FORMULACIÓN	AGUA	FORMULACIÓN	AGUA
	ARENA SILICA		ARCILLA
	BARRO		BARRO
	TEZONTLE		DOLOMITA
	ALUMINA		CALIZA
	SODA		ALUMINA
			ARENA SILICA
		TEZONTLE	
1B		2B	
FORMULACIÓN	AGUA	FORMULACIÓN	AGUA
	ARENA SILICA		ARCILLA
	BARRO		BARRO
	TEZONTLE		DOLOMITA
	ALUMINA		CALIZA
			ALUMINA
			ARENA SILICA
		TEZONTLE	
3A		4A	
ADITIVO	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	ADITIVO	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>
FORMULACIÓN	AGUA	FORMULACIÓN	AGUA
	ARCILLA		ARENA SILICA
	BARRO		SODA
	ALUMINA		DOLOMITA
	ARENA SILICA		CALIZA
	SODA		ALUMINA
	GRAVA		ARCILLA
	ASERRIN		
5A		5B	
ADITIVO	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	FORMULACIÓN	AGUA
FORMULACIÓN	AGUA		ARENA SILICA
	ARENA SILICA		SODA
	SODA		DOLOMITA
	DOLOMITA		CALIZA
	CALIZA		ALUMINA
	ALUMINA		BARRO
	BARRO		
6A		7A	
ADITIVO	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	FORMULACIÓN	AGUA
FORMULACIÓN	AGUA		TEZONTLE
	TEZONTLE		GRAVA
	GRAVA		ASERRIN
	ASERRIN		ARCILLA
	BARRO		ALUMINA
	ARCILLA	CALIZA	
8A		FORMULACIÓN	AGUA
FORMULACIÓN	AGUA		TEZONTLE
	TEZONTLE		ARENA JALES
	ARENA JALES		ASERRIN
	ASERRIN		ARCILLA
	ARCILLA		BARRO
	BARRO		

Las formulaciones propuestas tienen en cuenta aumentar la resistencia, reducir las pérdidas por contracción y por calcinación además de mantener la humedad lo más baja posible para reducir las fisuras y el tiempo de secado.

Es por ello que en algunas formulaciones se incluye un aditivo que sirve para secar más rápido y deflocular dichas pastas.

### 3.3 Procedimientos y/o condiciones de operación

En esta sección se mencionarán algunos de los problemas que existen, así como la mejora y/o propuesta que habrá en el proceso.

#### **Problemas que se tienen en el funcionamiento de un horno tradicional**

1. **Combustión incompleta de los combustibles:** El obtener una combustión total se realiza por un equilibrio entre la cantidad de combustible y la cantidad de oxígeno del aire necesario para esta reacción química. La deficiencia de alguno produce la emisión de gases tóxicos como el monóxido de carbono, anhídrido carbónico y gases sulfurosos junto con humo negro o carbón particulado, lo que produce que se contamine la atmósfera y contribuye con el calentamiento global. Como resultado de esta quema deficiente, se requiere gastar más combustible que el requerido porque la eficiencia térmica es muy baja, lo que redundará en el alto costo de las quemaduras con el consiguiente encarecimiento de los procesos de producción.
2. **La mayor parte de los hornos son abiertos:** Produce que el gradiente térmico o la diferencia de temperaturas entre la base y parte alta de la carga en la cámara de cocción sea muy grande por lo que las quemaduras son deficientes, pudiendo fundirse la carga cercana a las llamas del hogar y quedar casi cruda la carga colocada en la parte más alta. Además, los hornos abiertos pierden la mayor parte de la energía térmica producida por el combustible, reduciéndose la eficiencia térmica de este en la cocción de la carga.

3. **Calidad deficiente de los productos:** Como consecuencia de las quemas deficientes se ofertan productos de calidad dudable, pues la mezcla cerámica no llega a la “sinterización”, quedando con un alto nivel de porosidad, baja resistencia al golpe, cizallamiento, abrasión y tracción. Sin contar la presencia de gránulos que al quemarse generan nódulos de cal que por higroscopía rompen las estructuras de los ladrillos.
  
4. **Excesiva generación de desperdicios sólidos:** se produce una gran cantidad de desperdicios sólidos como ladrillos rotos, fundidos o mal quemados que modifican el entorno dando una impresión de desorden. Estos materiales deben ser reprocesados, molidos y reciclados como materiales para futuras cargas de materia prima pero su pequeña presencia en las formulaciones haría que se almacenen grandes cantidades y el consumo sea mínimo.

### **Soluciones para optimizar el funcionamiento de un horno tradicional**

1. **Combustión incompleta de los combustibles:** al emplear biomásas con un alto poder calorífico se aprovechará el oxígeno que se tiene en exceso y se reducirá la cantidad de combustible que se consume actualmente lo que se traduce en menor costo de la operación y reducción en las horas de quema del producto.
  
2. **La mayor parte de los hornos son abiertos:** los prototipos propuestos como diseño cumplen con la primera variable para analizar son cerrados y por lo tanto tienen condiciones de operación controladas en cuanto al aprovechamiento del calor que se tiene en el interior de estos lo que se traduce en quemas homogéneas reduciendo la pérdida de calor al exterior.
  
3. **Calidad deficiente de los productos:** al tener un control en la temperatura por no perderse en el medio ambiente se logrará que los ladrillos no presenten fisuras por exceso de calor y que queden crudos por falta de

temperatura en la parte superior del horno mejorando el aspecto y propiedades de los mismos.

4. **Excesiva generación de desperdicios sólidos:** al tener el proceso más controlado se reducirá la cantidad de desperdicio por ruptura, exceso o falta de temperatura siendo este el principal problema en las mermas.

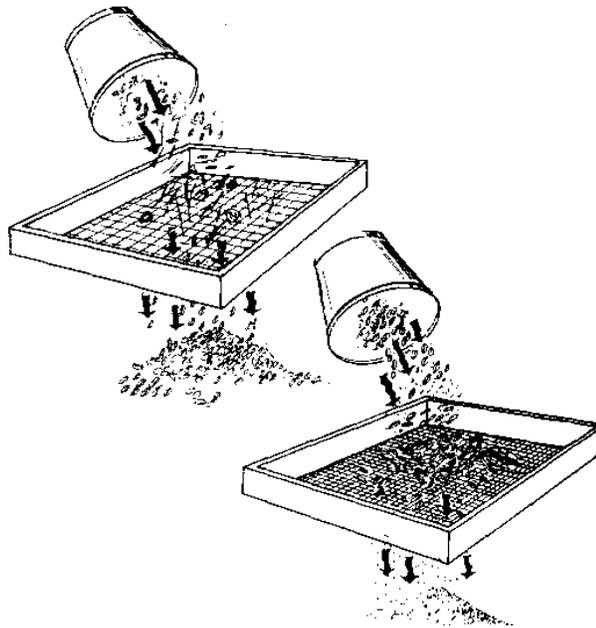
## MANUAL DE PREPARACION DE PASTA PARA FABRICAR LADRILLO

1. Asegurarse que el material no tenga ningún tipo de material que pueda implicar una contaminación Figura 16 (plástico, madera, cartón, etc.)



[Figura 16. Material contaminado.](#)

2. Cribar el material para evitar que se tengan trozos de piedras o material aglutinado como se muestra en la Figura 17.



[Figura 17. Proceso de la Criba.](#)

3. Por cada kilo de material para preparar la mezcla, agregar:  
Mínimo 15% peso de agua

Máximo 20%<sub>peso</sub> de agua

Medir la densidad del material (1.6-1.65 g/cm<sup>3</sup>)

Nota: si el material presenta humedad irse al porcentaje mínimo, la humedad recomendable del material es de (0.8-1.2%). Si al agregar el %<sub>peso</sub> máximo de agua se aprecia una consistencia demasiado densa, agregar Na<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> para aumentar la tixotropía del material.

4. El mezclado debe ser homogéneo ya que si quedan grumos o material sin mezclarse se tendrá una composición diferente y al conformar los ladrillos no tendrán las mismas características, es recomienda que el mezclado sea por medio mecánico “agitador”, como se muestra en la Figura. 18.



[Figura 18. Proceso de mezclado.](#)

5. Una vez que la pasta esté lista se puede iniciar el vaciado de los ladrillos dejar secar al aire libre en un lugar donde no se tenga presencia de humedad “lluvia” directa, el agregar más agua en la mezcla causara que se tenga perdida en las propiedades mecánicas y químicas del material.
6. El material “ladrillo” debe perder humedad antes de su quema de lo contrario romperá, tendrá fisuras, exceso o falta de cocción, deformaciones, perdidas por contracción lineal mayor, etc.  
La humedad que se considera es de 12-15% en estas condiciones se considera “óptimo” para iniciar el proceso de sinterización.
7. El acomodo de los ladrillos debe de ser en el mismo sentido y de la misma manera en el que se acomoda la base para que el flujo de calor sea uniforme en el interior y en las paredes.

# CAPITULO 4

---

## Pruebas experimentales

En esta sección se presentan las pruebas experimentales realizadas para determinar la formulación óptima requerida para la fabricación de ladrillo en un horno convencional.

## 4.1 Pruebas experimentales

### **4.1.1 Prueba de absorción de agua**

Consiste en la determinación de las medidas y pesos de las probetas de análisis. La prueba de absorción de agua consiste en saber el porcentaje de absorción de agua de las probetas actuales. Los instrumentos para la realización de esta prueba fueron: una balanza granataria, un termómetro y una mufla (105 – 170 °C), bajo la norma mexicana NMX-C-404-ONNCCE (2005), en la Figura 19 se muestran las probetas utilizadas.



Figura 19. Probeta.

Para la determinación de la absorción de agua para cada probeta, se utilizó la siguiente ecuación:

$$A = \frac{M_{humeda} - M_{seca}}{M_{seca}} \times 100$$



Figura 20. Ladrillos en la primera entrada al horno.

La norma mexicana NMX-C-404-ONNCCE (2005), especifica que el porcentaje de absorción de agua promedio en un ladrillo debe ser menor a 21%, este dato es importante porque en los resultados anteriores se presenta un comportamiento diferente en los ladrillos que contiene aserrín, estos ladrillos absorben agua en un promedio de 11.90 por ciento.

Por lo tanto, cabe mencionar que el contenido de aserrín en un ladrillo mejora la propiedad de absorción de agua en el material.

#### [4.2 Prueba de resistencia a la compresión](#)

La segunda prueba que se realizó a los ladrillos fue la prueba de compresión, esta prueba se realizó con la ayuda de la máquina universal existente en el Instituto Tecnológico de Pachuca, tal como se muestra en la Figura 21.



[Figura 21. Prueba de compresión a las probetas del arenal.](#)

Después que se terminó de realizar la prueba, se promediaron los resultados del esfuerzo máximo a compresión de los ladrillos. Se obtuvo así una resistencia promedio de 144.37 Kg/cm<sup>2</sup> que es mayor a la resistencia mínima de 60 Kg/cm<sup>2</sup> para tabique de barro que se menciona en la norma MX-C-004-0NNCCE (2005).

### 4.3 Contracción lineal y peso

Los resultados obtenidos de los pesos de las probetas se realizaron en el laboratorio de metrología tal como se muestra en la Figura 22, los pesos obtenidos de las probetas propuestas se muestran en la tabla 5:

Las medidas de las probetas propuestas son las siguientes:

- Largo: 15 cm.
- Ancho: 3 cm.
- Espesor: 1 cm.

Tabla5 Pesos de las probetas en verde.

<b>Probetas</b>	<b>Pesos (gramos)</b>	<b>Medidas de los puntos de contracción uno y dos respectivamente (cm)</b>
<b>1 B</b>	70	9.2, 9.5
<b>2 B</b>	74.5	9.5, 9.6
<b>5 B</b>	68	9.3, 9.6
<b>8 A</b>	66	9.4, 9.5
<b>7 A</b>	73	9.9, 9.5



Figura 22. Pesos y medidas de las probetas propuestas.

### 4.4 Sinterización de las probetas

Se realizó la sinterización de las probetas propuestas (con las formulaciones propuestas), para ello se utilizó una mufla con una capacidad de temperatura

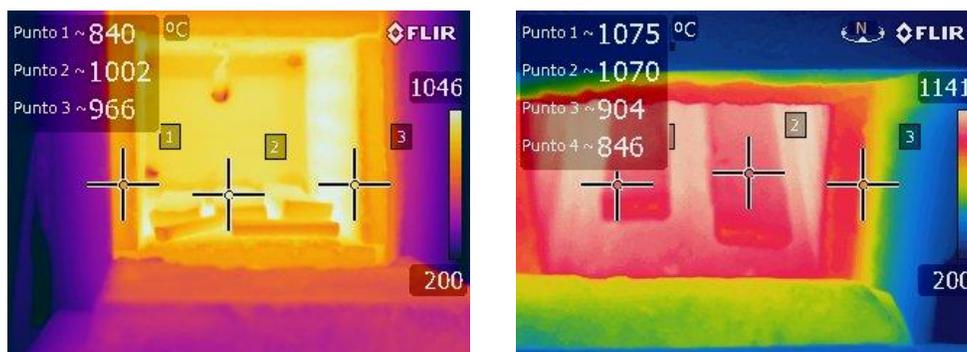
máxima de 12000 °C como se muestra en la Figura 23 la quema de las probetas se realizó de la siguiente manera: primero se calentó la mufla a una temperatura de 700 °C, después se fue aumentando la temperatura en intervalos de 50 °C hasta llegar a una temperatura de 1100 °C.



[Figura 23. Mufla para la cocción de las probetas.](#)

Para la medición de las temperaturas dentro del horno se utilizó una cámara térmica para observar la una temperatura máxima de quema.

A continuación, se muestran las diferentes mediciones de temperaturas que se realizaron a las probetas en el proceso de quema dentro de la mufla con ayuda de una cámara termográfica (Figura 24).



[Figura 24. Probetas en proceso de sinterizado.](#)

Los valores de las temperaturas que se muestran demostraron que la mufla opera de una manera eficiente porque se llegó a la temperatura deseada.

#### 4.5 Contracción lineal

La tabla 6 muestra los pesos de las probetas sinterizadas y lo puntos de contracción.

Tabla 6. Probetas sinterizadas.

<b>Probetas</b>	<b>Pesos (gramos)</b>	<b>Medidas de los puntos de contracción uno y dos respectivamente (cm) de las probetas propuestas</b>
<b>1 B</b>	64	9.1, 9.4
<b>2 B</b>	63	9.4, 9.6
<b>5 B</b>	54	9.1, 9.4
<b>8 A</b>	53	9.3, 9.4
<b>7 A</b>	62	9.8, 9.5

#### 4.6 Módulo de ruptura y compresión de las probetas

Ecuación para el cálculo del esfuerzo de compresión y de módulo de ruptura de las probetas:

$$\sigma_{flexion} \frac{(M)kg.cm(C)cm}{(I)cm^4}$$

$$\sigma_{Compresion} \frac{Carga\ Ultima \left(\frac{Kg}{cm^2}\right)}{Area (cm^2)}$$

- I = Momento de inercia
- M = Momento = (F)(D)

La tabla 7 muestra los resultados de los modulos de ruptura de las diferentes probetas propuestas.

Tabla 7 Prueba de módulo de ruptura

PRUEBA DE MÓDULO DE RUPTURA

**PROBETA 5 B:**

**MEDIAS (largo, ancho, espesor) = 14.2 cm, 2.9 cm, 1 cm.**

**CARGA INICIAL = 1 Kg**

**CARGA ULTIMA DE FLEXIÓN = 4 Kg (a la mitad)**

**ESFUERZO DE FLEXIÓN = 54.93 Kg / cm<sup>2</sup>**

**PROBETA 7 A**

**MEDIAS (largo, ancho, espesor) = 14.3 cm, 2.8 cm, 1.1 cm.**

**CARGA INICIAL = 1 Kg**

**CARGA ULTIMA DE FLEXIÓN = 4 Kg**

**ESFUERZO DE FLEXIÓN = 54.93 Kg / cm<sup>2</sup>**

**PROBETA 2 B**

**MEDIAS (largo, ancho, espesor) = 14.4 cm, 2.9 cm, 1 cm.**

**CARGA INICIAL = 2 Kg**

**CARGA ULTIMA DE FLEXIÓN = 3 Kg**

**ESFUERZO DE FLEXIÓN = 33.31 Kg / cm<sup>2</sup>**

**PROBETA 1 B**

**MEDIAS (largo, ancho, espesor) = 14 cm, 2.9 cm, 1.2 cm.**

**CARGA INICIAL = 1 Kg**

**CARGA ULTIMA DE FLEXIÓN = 2.8 Kg**

**ESFUERZO DE FLEXIÓN = 40.55 Kg / cm<sup>2</sup>**

**PROBETA 8 A**

**MEDIAS (largo, ancho, espesor) = 13.9 cm, 2.9 cm, 1.2 cm.**

**CARGA INICIAL = 1 Kg**

**CARGA ULTIMA DE FLEXIÓN = 2.5 Kg**

**ESFUERZO DE COMPRESIÓN = 36.20 Kg / cm<sup>2</sup>**

Tabla 8. Prueba de compresion

PRUEBA DE COMPRESIÓN

**PROBETA 5 A**

**ÁREA = 6.2 cm X 2.9 cm = 17.98 cm<sup>2</sup>**

**CARGA INICIAL = 10 Kg**

**PRIMER FISURA = 370 Kg**

**CARGA ULTIMA = 3510Kg**

**ESFUERZO DE COMPRESIÓN = 195.22 Kg / cm<sup>2</sup>**

**PROBETA 7 A**

**ÁREA = 6.5 cm X 2.7 cm = 17.55 cm<sup>2</sup>**

**CARGA INICIAL = 10 Kg**

**PRIMER FISURA = 550 Kg**

**CARGA ULTIMA = 3000 Kg**

**ESFUERZO DE COMPRESIÓN = 170.94 Kg / cm<sup>2</sup>**

**PROBETA 4 A**

**ÁREA = 6.9 cm X 2.8 cm = 19.32 cm<sup>2</sup>**

**CARGA INICIAL = 10 Kg**

**PRIMER FISURA = 250 Kg**

**CARGA ULTIMA = 4050 Kg**

**ESFUERZO DE COMPRESIÓN = 209.62 Kg / cm<sup>2</sup>**

**PROBETA 1 B**

**ÁREA = 6 cm X 2.4 cm = 14.4 cm<sup>2</sup>**

**CARGA INICIAL = 10 Kg**

**PRIMER FISURA = 300 Kg**

**CARGA ULTIMA = 1350 Kg**

**ESFUERZO DE COMPRESIÓN = 93.75 Kg / cm<sup>2</sup>**

**PROBETA 8 A**

**ÁREA = 7.8 cm X 4.2 cm = 32.76 cm<sup>2</sup>**

**CARGA INICIAL = 10 Kg**

**PRIMER FISURA = 550 Kg**

**CARGA ULTIMA = 4580 Kg**

**ESFUERZO DE COMPRESIÓN = 139.8 Kg / cm<sup>2</sup>**

Para la realización de esta prueba se utilizó la máquina universal para prueba de módulo de ruptura, tal como se muestra a continuación en la figura 25.



[Figura 25. Pruebas para determinar el módulo de ruptura.](#)

Después de haber terminado las pruebas de módulo de ruptura a las probetas propuestas se procedió a realizar la prueba de compresión a las probetas propuestas (Figura 26).



[Figura 26. Prueba de compresión.](#)

Por lo tanto, ya después de haber realizado las pruebas de módulo de ruptura y de compresión se determina que las probetas propuestas cumplen con las normas mexicanas NMX-C-004-ONNCCE (2005) para compresión y con la norma mexicana NMX-C-191-ONNCCE (2004) para flexión.

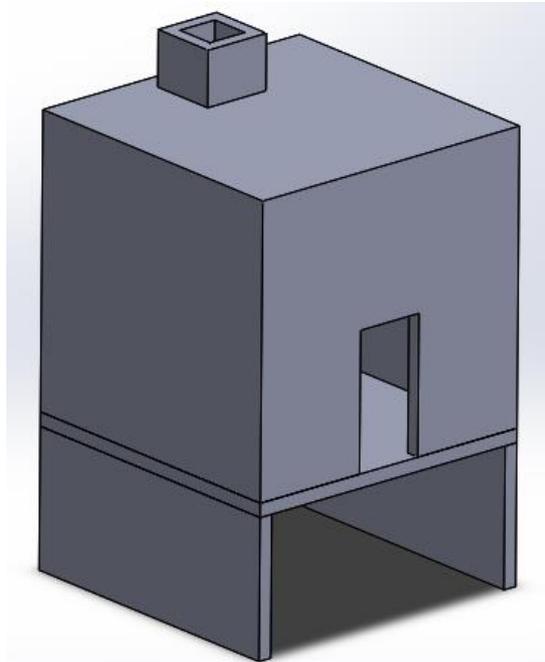
#### [4.7 Diseño de prototipos](#)

Como parte de este estudio se incluye la construcción de un prototipo que tiene algunas similitudes con el diseño empleado actualmente, es un horno cuadrado de

1m<sup>2</sup> tiene algunas adaptaciones para mejorar el consumo energético y aprovecharlo en el proceso evitando pérdidas por conducción en el interior del horno “del combustible a las paredes del horno” y de convección en el interior de este.

Es un diseño funcional que muestra la fusión de un horno tradicional para producir ladrillo y un horno subterráneo.

La Fig. 27 muestra el diseño propuesto y la Fig. 28 el prototipo denominado HCP (horno cuadrado plano).



[Figura. 27 Diseño del horno cuadrado propuesto](#)



[Figura. 28 Prototipo HCP](#)

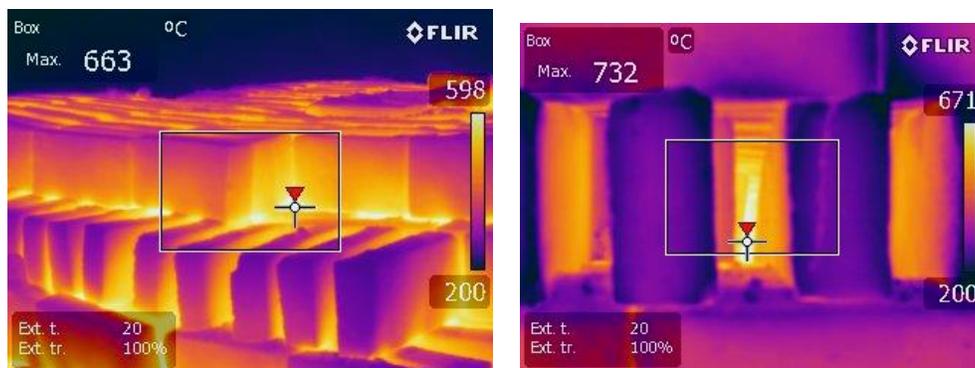
Para la construcción del prototipo se emplea la formulación propuesta en base a las especificaciones desarrolladas, lo que permitirá evaluar la resistencia en la construcción y la eficiencia real que se necesita para estimar el rendimiento real que se obtendrá.

En la Fig 29 se muestra el prototipo realizado con la formulacion propuesta y con las condiciones de operación que se indican.



[Figura 29. Prototipo HCP con la formulación propuesta.](#)

La Fig. 30 muestran el acomodo de los ladrillos dentro del horno que se contruyo con la formulacion propuesta



[Figura 30. Acomodo de ladrillos para quema dentro del prototipo.](#)

# CAPITULO 5

---

## Análisis de Resultados

Se presentan los resultados obtenidos y se hace un análisis de las implicaciones y beneficios en el proceso de fabricación de ladrillo artesanal en hornos convencionales.

A cada una de las formulaciones propuesta se les caracteriza y se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 9, la cual incluye cinco parámetros de evaluación que permitirán comprobar si se pueden emplear como nuevas mezclas.

**Tabla 9 Pérdidas por calcinación**

Formulación	C (Pérdidas por calcinación)
3 <sup>a</sup>	12%
4 <sup>a</sup>	20%
6 <sup>a</sup>	13%
7 <sup>a</sup>	15.1%
8 <sup>a</sup>	19.7%
LN	10%
LF	9%
1B	8.6%
2B	15.4%
5B	20.6%



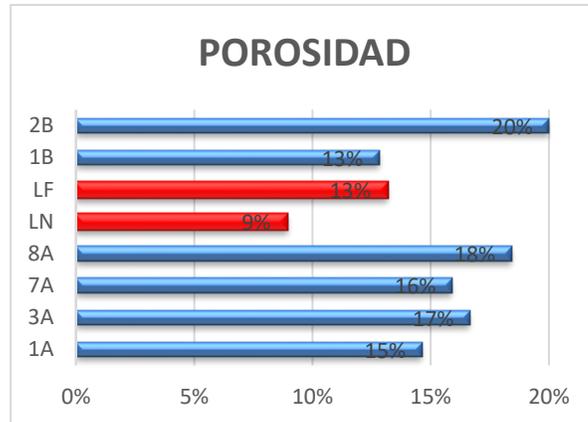
**Figura 31. Gráfica de pérdidas por calcinación.**

La tabla 9 y Fig. 31 muestran las pérdidas que tendrá cada una de las probetas al ser sometidas a sinterización.

**Tabla 10 Porosidad**

Formulación	A (Porosidad)
1 <sup>a</sup>	15%
3 <sup>a</sup>	17%
7 <sup>a</sup>	16%
8 <sup>a</sup>	18%
LN	9%
LF	13%
1B	13%
2B	20%

En la gráfica de la Fig.32 se muestran los datos que se obtienen al someter las probetas a la prueba de absorción de agua durante 24 hr. Al ser mayor la porosidad se tienen más huecos en la estructura del material que hacen que la pieza sea más ligera y que pueda absorber tanto calor como humedad del medio haciéndola un poco más frágil por su conformación, siendo la prueba de módulo de ruptura y compresión las más importantes.



**Figura 32. Gráfica de Porosidad.**

En la tabla 11 se observa el % de contracción y/o encogimiento lineal que sufren las probetas y si es o no una formulación óptima para poder fabricar ya que al perder longitud se debe crear un molde con un sobre diseño para compensar dicha pérdida de longitud en todas sus caras.

**Tabla 11. Contracción lineal.**

<b>Formulación</b>	<b>L (Contracción lineal)</b>
3 <sup>a</sup>	1.68%
6 <sup>a</sup>	1.78%
7 <sup>a</sup>	0.51%
8 <sup>a</sup>	1.06%
LN	7.92%
LF	2.48%
1B	1.07%
2B	0.52%
5B	2.11%



**Figura 33. Pérdidas por contracción.**

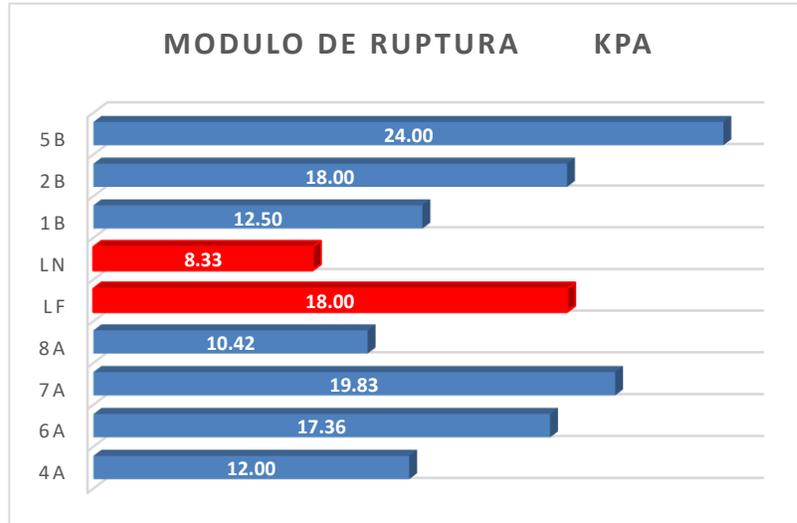
La Figura 34 y la Tabla 12 muestran los datos que se obtuvieron para la prueba de módulo de ruptura.

**Tabla 12 R (Modulo de ruptura)**

<b>Formulación</b>	<b>R (MPa)</b>
4 <sup>a</sup>	12.00
6 <sup>a</sup>	17.36
7A	19.83
8 <sup>a</sup>	10.42
LN	18.00
LF	8.33
1B	12.50

2B	18.00
5B	24.00

---

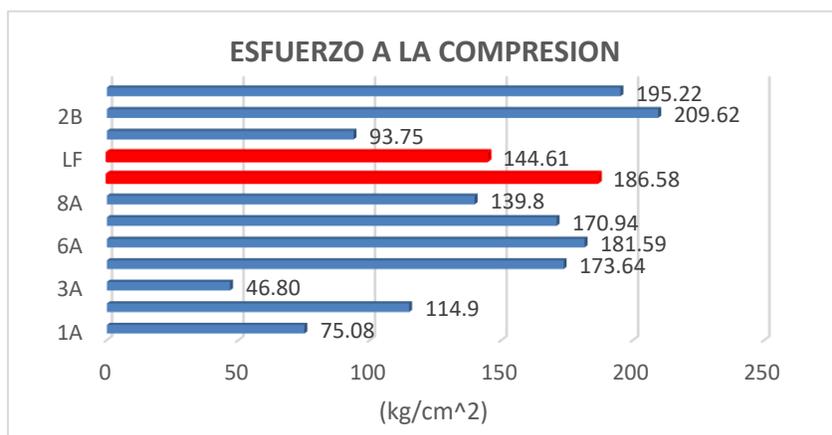


**Figura 34. Módulo de ruptura.**

**Tabla 13 E (Esfuerzo a la compresión)**

Formulación	E (kg/cm <sup>2</sup> )
1A	75.08
2A	114.9
3A	46.8
4A	173.64
6A	181.59
7A	170.94
8A	139.8
LN	186.58
LF	144.61
1B	93.75
2B	209.62
5B	195.22

---



**Figura 35 Esfuerzo a la compresión**

La Tabla 14 muestra las temperaturas a las cuales fueron valoradas las fórmulas propuestas y los efectos que tuvieron al someterse al proceso de sinterizado.

**Tabla 14 Temperaturas de evaluación**

Formulación	450-960 °C	970-1100 °C
1 <sup>a</sup>	*	Ruptura
2 <sup>a</sup>	*	Ruptura
3 <sup>a</sup>	*	*
4 <sup>a</sup>	*	Reblandeció
5 <sup>a</sup>	*	*
6 <sup>a</sup>	*	*
7 <sup>a</sup>	*	1000°C
8 <sup>a</sup>	*	1000°C
LN	*	Ruptura
LF	*	Ruptura
1B	*	*
2B	*	*
5B	*	*

La Tabla 15 muestra un Q total para un horno tradicional de ladrillo cuadrado y rectangular de la Zona I y II.

**Tabla 15 (Q) Energía calórica (KW/m<sup>2</sup>)**

<b>Zona I</b>			
<b>Dimensión (m)</b>	<b>Tipo</b>	$\epsilon$	<b>Q</b>
2.8*4.3*4.5	Rectangular	1.2	19.67
4*4*4	Cuadrado	1	33.30

<b>Zona II</b>			
<b>Dimensión (m)</b>	<b>Tipo</b>	$\epsilon$	<b>Q</b>
3*4*4	Rectangular	0.8	27.67
3*6*4	Rectangular	0.8	40.48
5*4*5	Rectangular	1	41.53

En la tabla 16 se muestran los datos obtenidos del calor que se suministra en un horno convencional cuadrado con la fórmula tradicional y el que se empleará utilizando la nueva formulación, de la misma forma se evalúa el coeficiente global de transferencia de calor en la tabla 17.

**Tabla 16 Calor total horno común vs nueva formulación**

<b>Calor (calentamiento + quema)</b>	
HORNO COMÚN	700 KJ/h
ESPESOR	40-50 cm
HORNO NUEVA FORMULACIÓN	525.16 KJ/h
ESPESOR	7 cm

**Tabla 17 Coeficiente global de transferencia de calor**

<b>COEFICIENTE GLOBAL</b>	
PAREDES	1.85 W/m <sup>2</sup> °C
TECHO	2.95 W/m <sup>2</sup> °C
PISO	2.1 W/m <sup>2</sup> °C

La tabla 18 y 19 respectivamente contienen los datos del calor total de cocción que se emplea en el proceso actual y el de la nueva formulación.

**Tabla 18 Calor total de cocción actual**

<b>Calor de cocción actual</b>	
Calor de cocción ladrillos	7,540,890 kcal
Calor de suministrado combustible	40,450,000 Kcal

**Tabla 19 Calor total de cocción nueva formulación**

<b>Calor de cocción nueva formulación</b>	
Calor de cocción ladrillos	3,783,000 kcal
Calor de suministrado combustible	7,489,900 Kcal

**Tabla 20 Optimización del proceso (eficiencia del proceso)**

<b>EFICIENCIA TERMICA</b>	
ACTUAL	18.64%
PROPUESTA	50.50%

## Análisis de datos y resultados

Los datos mostrados en las tablas y gráficos de la sección de resultados nos permiten evaluar y analizar las formulaciones propuestas con base a los datos obtenidos en su caracterización y compararlos con los que se tienen actualmente con el ladrillo artesanal que se elabora en las regiones de estudio.

Las formulaciones que fueron propuestas y que obtienen los resultados más favorables para este estudio son la 2B que solo tiene una porosidad elevada 20% como se muestra en la Fig. 20

Las formulas 7A y 6A respectivamente son alternativas viables y factibles para poderse analizar, solamente hace falta hacer algunas modificaciones en su formulación para que puedan ser consideradas como alternativas.

La 1B es una opción, pero como se observa en la Fig. 23 y tabla 32 no tiene buenas propiedades mecánicas, pero ocurre lo contrario con la 5B esta propuesta en particular tiene muy buenas propiedades de resistencia mecánica.

No se pueden dejar sin considerar la 3A, 1A, 8A y 4A. Serán puestas a prueba en condiciones normales de operación y se comprobara que tan importante es el tener todas las variables de caracterización en una sola formulación propuesta de mejora y si es una propiedad imperativa para su conformación

Con base en los resultados obtenidos al sinterizar cada una de las formulaciones propuestas en la Tabla 4.7 cabe destacar que solo 2 tuvieron fractura al estar sometidas a una temperatura entre (970-1100°C) y una reblandeció en la cara inferior a los 1100°C, teniendo en cuenta que las mezclas utilizadas actualmente no resistieron una temperatura mayor a los 970°C, lo cual contribuye a la formación de fisuras y roturas en el proceso que se cuantifican en grandes mermas por no tener un control de la temperatura que se tiene en el interior del horno.

La tabla 36 y 37 muestran respectivamente los datos del calor suministrado en un horno tradicional de geometría cuadrada con la propuesta de formulación y la que se emplea actualmente por los productores, a su vez se calcula el coeficiente global de transferencia de calor.

Las tablas 38 y 39 muestran los resultados obtenidos al evaluar el calor de quema y el de combustión que se emplea y finalmente la tabla 40 muestra la eficiencia térmica que se tiene actualmente y la que se calcula con base a los datos de la nueva formulación.

## Conclusiones

Como se observó en la sección de análisis y resultados la formulación 2B supera en mucho las expectativas al tener casi todas las variables de control por arriba de los estándares utilizados actualmente en la elaboración de dicho ladrillo artesanal, para que cumpla en su totalidad pueden modificarse reformulando para disminuir su porosidad agregando algún material nuevo o balanceando la composición actual.

Lo mismo puede hacerse con la 3A, 1B, 6A, 7A, 5B, 1A, 8A Y 4A; pero obtenida una formulación con mayores atributos será la indicada para iniciar el mejoramiento en el material utilizado para construir un horno artesanal tema central de dicho proyecto.

No se puede hacer a un lado la temperatura al ser un factor de suma importancia y no es medida al igual que la humedad y la cantidad de combustible empleado por ser un proceso netamente artesanal, pero al ser analizado cuidadosamente tiene un gran potencial de explotación para generar mejoras en el proceso de fabricación desde la materia prima hasta el proceso de sinterización.

Se propone en esta sección del proyecto mejorar operativamente y ajustar variables reológicas que inciden directamente en el producto que se obtiene finalmente es por ello que se obtienen parámetros que se llevaran a cabo por los productores junto con las mejoras en su proceso que se describen en la sección 3.7.

El utilizar estas nuevas formulaciones reducirá el tiempo y la cantidad de hornos que se construyen anualmente al ser un material que posee propiedades refractarias le da mayor conductividad térmica, y reducirá los costos de fabricación; pudiendo ser un producto que puedan ofrecer con una mayor rentabilidad.

El diseño de este prototipo con características similares a las que tienen los hornos actuales permite hacer una comparación en el funcionamiento. Este prototipo es una fusión de un horno tradicional para ladrillo y un horno subterráneo cumpliendo el mismo principio de operación.

Lograr mayor eficiencia y rendimiento en función del combustible empleado es otra de las variables que se consideran en el procedimiento de mejora del proceso y que se evaluara ya que la optimización es parte de este proyecto tanto en eficiencia energética, costos de combustible y principalmente el tiempo de quema que se emplea.

## Glosario

**Cerámicas avanzadas:** Presentan propiedades mecánicas resistentes a la corrosión/oxidación o propiedades eléctricas, ópticas y magnéticas mejores que las tradicionales.

**Cerámicas tradicionales:** son las que proceden o se elaboran de arcilla o minerales no arcillosos, siendo principalmente del grupo de los óxidos.

**Diagrama de fase:** representación entre diferentes estados de la materia, en función de variables elegidas para facilitar el estudio del mismo.

**Deflocular:** es la conversión un material sin fluidez, (masa pastosa de alta densidad), en un fluido susceptible de escurrirse sin agregar líquidos adicionales (de ahí el término reología, que en griego significa escurrido).

**Sinterización "metalurgia de polvos":** proceso que consiste en la quema "cocción" de materiales cerámicos para pasar de un estado en verde "crudo" a un producto bizcochado".

**Fundente:** amplia gama de productos químicos que se utilizan en los procesos de fusión de los minerales para rebajar el punto de fusión y eliminar parte de la escoria del propio proceso de fusión

**Imperfección:** pequeños poros o agujeros, inclusiones o microgrietas

**Silicatos:** son el grupo de minerales de mayor abundancia, pues constituyen más del 95% de la corteza terrestre, además del grupo de más importancia geológica por ser petrogénicos, es decir, los minerales que forman las rocas.

**Transferencia de calor:** es la relación que existe con la razón de intercambio de calor entre cuerpos calientes y fríos llamados fuente y receptor "recibidor"

**Clinker:** Sustancia que se obtiene como resultado de la calcinación en horno, de mezclas de calizas arcillosas preparadas artificialmente con adicción eventual de otros materiales.

**Propiedades reológicas:** Una de varias características del flujo de un material, tales como un fluido de perforación, un fluido de terminación, un fluido de reacondicionamiento o el cemento. A las "propiedades reológicas" se las conoce más a menudo como los parámetros de fluido plástico de Bingham, PV (viscosidad plástica) y YP (umbral de fluencia plástica), medidos por el reómetro de indicación directa.

**Reología:** La reología es el estudio del flujo y la deformación de la materia sometidas a fuerzas, y que por lo general se mide utilizando un reómetro.

## Referencias

[1]

Afanador Garcia, G. G. (2012). Propiedades físicas y mecánicas de ladrillos macizos cerámicos para mapostería. *CIENCIA E INGENIERIA NEOGRANADINA*, 43-58.

[2]

J. Rodríguez, F. D. (2004). Perfil de temperatura en un horno ladrillero. *REVISTA MEXICANA DE INGENIERIA QUIMICA*, 209-217.

[3]

Agustín Valverde, S. (2007). Evaluación de la eficiencia energética de un horno que utiliza como combustible cascarilla de arroz. *SCIENTIA ET TECHNICA*, 175-180.

[4]

Jose Arturo Galindo, L. A. (2003). Coeficiente de transferencia de calor y caída de presión en un horno de ladrillo. *INGENIERIA MECANICA TECNOLOGIA Y DESARROLLO*, 48-57.

[5]

Jose Dario Santos, P. M. (2011). Caracterización de arcillas y preparación de pastas cerámicas para la fabricación de tejas y ladrillos de la región de Santander. *DYNA*, 53-61.

[6]

Sierra Vargas, G. F. (2014). Determinación de la eficiencia de la cocción con leña en las veredas de Usme, Bogotá. *INGENIERIA MECANICA*, 185-194.

[7]

Emilia García Romero, M. S. (25 de noviembre de 2015). *Arcillas propiedades y usos*. Obtenido de Arcillas propiedades y usos: <http://www.uclm.es/users/higueras/yymm/Arcillas.htm>

[8]

Malvern. (2016). Obtenido de <http://www.malvern.com/es/products/measurement-type/rheology-viscosity/>

[9]

Holman, J. P. (1998). Transferencia de calor. En J. Holman, *Transferencia de calor* (pág. 484). España: Mc Graw Hill.

[10]

Robert H. Perry, D. W. (2010). Manual del ingeniero químico. En D. W. Robert H. Perry, *Manual del ingeniero químico*. Madrid: Mc Graw-Hill .

[11]

NMX-C-037-ONNCCE (2005), I. d.-b. (2005). Determinación de la absorción de agua. Mexico, Mexico: ONNCCE.

[12]

NMX-C-404-ONNCCE (2005), I. d.-b. (2005). Determinación y metodos de prueba. México , México

[13]

Whitewares, A. (. (Febrero de 2004). Contracción lineal en seco y por quema (ASTM C326-03).

[14]

Whitewares., A. (. (Febrero de 2004). Determinación del módulo de ruptura en seco para arcillas y cuerpos cerámicos (ASTM C689-03a).

[15]

Pope, J. E. (2012). *Soluciones prácticas para el ingeniero mecánico*. Mexico: McGraw-Hill.

[16]

Kern, D. Q. (2008). Procesos de tranferencia de calor. En D. Q. Kern, *Procesos de tranferencia de calor* (pág. 980). Mexico: Grupo Editorial Patria.

[17]

*Netpellet*. (7 de 06 de 2016). Obtenido de <http://www.netpellet.com/>

[18]

G., M. (2011). *Determinacion de los perfiles de temperatura de un horno para ladrillo del sector chambo*. Ribamba: Tesis de grado, Escuela Superior Politecnica de Chimborazo.

[19]

Frank Kreith, R. M. (2012). *Principios de transferencia de calor*. Mexico, D.F.: CENGAGE Learning.

*Oilfield Glossary en Español*. (2016). Obtenido de [http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/r/rheological\\_property.aspx](http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/r/rheological_property.aspx)

## Anexos (información complementaria)

### Anexo A

Imágenes de la construcción y desarrollo del prototipo



## Anexo B

Tabla B1. Propiedades de materiales de construcción.

TABLA A-5					
Propiedades de materiales de construcción (conclusión)					
(a una temperatura media de 24°C)					
Material	Espesor, L mm	Densidad, $\rho$ kg/m <sup>3</sup>	Conductividad térmica, k W/m · K	Calor específico, $c_p$ kJ/kg · K	Valor R (para los espesores de la lista, L/k), K · m <sup>2</sup> /W
<b>Material para techos</b>					
Tejas de asbesto-cemento		1 900	—	1.00	0.037
Asfalto en rollos		1 100	—	1.51	0.026
Tejas de asfalto		1 100	—	1.26	0.077
Techado incorporado	10 mm	1 100	—	1.46	0.058
Pizarra	13 mm	—	—	1.26	0.009
Tejas de madera (simples o con cara de plástico/película)		—	—	1.30	0.166
<b>Materiales para revoque</b>					
Revoque de cemento, agregado de arena	19 mm	1 860	0.72	0.84	0.026
Revoque de yeso:					
Agregado ligero	13 mm	720	—	—	0.055
Agregado de arena	13 mm	1 680	0.81	0.84	0.016
Agregado de perlita	—	720	0.22	1.34	—
<b>Material para forro exterior (sobre superficies planas)</b>					
Tejas de asbesto-cemento	—	1 900	—	—	0.037
Forro de tablero duro	11 mm	—	—	1.17	0.12
Forro de madera (rebajada)	25 mm	—	—	1.30	0.139
Forro de madera (contrachapada, traslapada)	10 mm	—	—	1.21	0.111
Forro de aluminio o acero (sobre encofrado):					
Con respaldo hueco	10 mm	—	—	1.22	0.11
Con respaldo de tablero aislante	10 mm	—	—	1.34	0.32
Vidrio arquitectónico	—	2 530	1.0	0.84	0.018
<b>Maderas</b>					
Maderas duras (arce, roble, etc.)	—	721	0.159	1.26	—
Maderas suaves (abeto, pino, etc.)	—	513	0.115	1.38	—
<b>Metales</b>					
Aluminio (1 100)	—	2 739	222	0.896	—
Acero dulce	—	7 833	45.3	0.502	—
Acero inoxidable	—	7 913	15.6	0.456	—

Fuente: Las tablas A-5 y A-6 se adaptaron tomándolas del *Handbook of Fundamentals* de la ASHRAE (Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, 1993), Cap. 22, tabla 4. Usadas con autorización.

## Anexo C

**Tabla A.1. Etapas de conformación del proyecto (estructura básica)**

ETAPAS DEL PROYECTO	
Fuentes bibliográficas (marco teórico sustentable)	
Estudio de campo	
	Proceso de fabricación
	Caracterización de los materiales
	Cuantificadores <u>rtdo</u> , <u>eff</u> , <u>disp</u> , calidad, mermas, costos
	Parámetros operacionales (dimensiones, % humedad, porosidad, resistencia a la compresión, choque térmico, atributos visuales)
Análisis termodinámico de horno actual	
Conclusiones preliminares	
Análisis de alternativas, propuestas y/o soluciones para proponer un diseño	
Análisis de combustibles alternos	
	Combustibles utilizados actualmente
	Propuesta de combustible alternativo
Análisis termodinámico del diseño propuesto	
	Geometría/Combustible/Tipo de alimentación/Perfil de temperatura
Análisis de alternativas diseño propuesto vs diseño actual	
Propuesta porque se debe de analizar y considerar como un proyecto sustentable	
Propuesta y/o desarrollo de una integración de energía (*)	
Conclusiones del proyecto	