

Mejoramiento de la eficiencia térmica de un horno convencional para fabricar ladrillo artesanal

GÓMEZ, Abdiel, JIMÉNEZ, Isamar, ÁVILA, Osiris, RESÉNDIZ, Celerino

Recibido Febrero 15, 2016; Aceptado Octubre 07, 2016

Resumen

Se presenta un estudio teórico-experimental de un horno convencional de producción de ladrillos para mejorar su eficiencia térmica. Se llevó a cabo un análisis de la transferencia de calor en el horno, determinando los perfiles de temperatura dentro del horno, así como el flujo de calor requerido para la cocción adecuada de los ladrillos. Al mismo tiempo se realizaron pruebas experimentales en probetas fabricadas conforme a la norma aplicable, ensayando once formulaciones distintas; para la mejor combinación, los resultados fueron: pérdidas por calcinación: 15%, porosidad: 20%, contracción lineal: 0.52%, módulo de ruptura: 18 MPa y esfuerzo a la compresión: 209.62 kg/cm². Para un flujo de combustible (aserrín) de 0.44 kg/s, la energía perdida del horno hacia el exterior fue de 267.65 kJ/s. Conforme a los datos obtenidos en campo, el rango de temperatura de operación del horno es de 970-1220 °C. Con ayuda del Software ANSYS FLUENT © se obtuvo la geometría más adecuada para el proceso: la adición de canales de encendido y una chimenea a la salida, mejoraron considerablemente los parámetros del horno convencional, resultando un flujo de calor máximo en el horno de 3747.7 W/m² y una pérdida total de calor en el horno de 2336.2 W/m².

Palabras clave: Hornos, transferencia de calor, ladrillos, eficiencia térmica.

Abstract

A theoretical and experimental study of a conventional furnace brick production appears to improve thermal efficiency. An analysis of heat transfer in the furnace were made, determining the temperature profiles in the furnace and the heat flow required for proper firing of the bricks. At the same time experimental tests on specimens manufactured in accordance with the applicable standard were made, tested eleven different formulations; for the best combination, the results were: losses by calcination: 15%, porosity: 20% linear shrinkage: 0.52%, modulus of rupture: 18 MPa and compressive strength: 209.62 kg / cm². For a fuel flow (sawdust) of 0.44 kg / s, the energy lost to the outside of the furnace was 267.65 kJ / s. According to the data obtained in the field, the range of operating temperature of the oven is 970-1220 ° C. With the help of Software ANSYS FLUENT © the most suitable geometry for the process it is obtained: the addition of channels on and a chimney at the exit, greatly improved the parameters of conventional oven, resulting in a maximum heat flux in the oven 3747.7 W / m² and a total loss of heat in the oven 2336.2 W / m².

Keywords: furnaces, heat transfer, bricks, thermal efficiency.

Citación: GÓMEZ, Abdiel, JIMÉNEZ, Isamar, ÁVILA, Osiris, RESÉNDIZ, Celerino. Mejoramiento de la eficiencia térmica de un horno convencional para fabricar ladrillo artesanal. Revista Tecnología e Innovación 2016, 3-9 : 85-94

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: agmerca63@gmail.com).

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

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 verse perjudicada su economía; en nuestro país hay poco más de 16 mil ladrilleras y en nuestro estado existen cerca de 258 (Moreno, 2015).

El impacto que estos artesanos tienen desde la adquisición de sus materias primas y las técnicas tan rudimentarias para elaborar el ladrillo y darle el tratamiento necesario influyen directamente en el producto obtenido. Los combustibles comúnmente utilizados son: madera, aserrín, plástico, llantas, papel, periódicos, entre otros. Resulta evidente que estos materiales no son propios para esta actividad, pero su uso se debe fundamentalmente al bajo costo de adquisición.

Al utilizar estos materiales en el proceso de cocción 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 tan diverso de combustible empleado. Al terminar el 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 estos hornos artesanales emiten es muy alto; sin embargo, los productores se muestran reacios a invertir recursos para cambiar su método de cocción, ya que consideran que sus ingresos se verán afectados debido al alto costo de fabricación (Juárez, 2015).

Es por ello que el propósito de este trabajo fue realizar un estudio teórico-experimental de un horno convencional de producción de ladrillos para mejorar su eficiencia térmica.

Los hornos utilizados actualmente en el sector ladrillero, básicamente 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 calentamiento dentro de la cámara de cocción dentro del horno llega a los 300°C para luego dar lugar a la cocción llegando su temperatura hasta los 990-1000°C, y posteriormente ir al enfriamiento a temperatura ambiente que es de 15 °C; los ladrillos permanecen en el horno por un lapso de 30 horas (Maria, 2011).

Los principales problemas que se presentan durante el funcionamiento de los hornos convencionales son (Gómez et al., 2015):

Combustión incompleta de los combustibles empleados: lo cual produce emisión de gases contaminantes como el CO, CO₂ y gases sulfurosos además de baja eficiencia térmica lo que redundará en un aumento en el costo de las quemaduras con el consecuente encarecimiento de los procesos de producción.

Gradiente de temperaturas considerablemente alto entre la base y la parte alta de la carga: esto se debe a que la mayoría de los hornos son abiertos, este hecho hace que las quemaduras sean deficientes. Además los hornos abiertos pierden la mayor parte de la energía térmica producida por el combustible.

Generación de desperdicios sólidos (mermas): cada quemadura de 500 a 1000 ladrillos son los que no se quemaron al 100%, salen muy quemados o presentan algunas características mecánicas deficientes.

Calidad deficiente de los productos: como consecuencia de las quemas deficientes se ofertan productos de dudosa calidad, pues la mezcla cerámica no llega a la quema completa o a la “sinterización”, quedando con un alto nivel de porosidad, baja resistencia al impacto, cizallamiento, abrasión y tracción

Caracterización del horno convencional

Con base en la información obtenida en campo (Horno “La Gloria” en Actopan, Hgo.), se procedió a dimensionar el horno utilizando el Software Solidworks©.

Planta baja del horno: Ancho = 3 m, Alto = 2 m, Largo = 5 m, Espesor de las paredes = 0.60 m.

Las dimensiones de las columnas son de 1.2 m x 1.2 m; éstas van colocadas en las esquinas del horno para darle mayor soporte cuando esté en operación.

Posteriormente se modeló la planta alta del horno, la cual tiene las siguientes dimensiones: Alto = 2 m; Espesor de pared = 0.30 m; Ancho = 3 m; Largo = 5 m.

A continuación se modeló el canal de encendido y la puerta de admisión del combustible que lleva el horno. Puerta de admisión del combustible: Ancho = 80 cm; Alto = 80 cm. Canal de encendido: Ancho = 80 cm; Profundidad = 1 m; Largo = 5 m. El canal de encendido es donde se agrega el combustible.

Por último se modeló la puerta de admisión para la carga del horno, la cual tiene las siguientes dimensiones: Alto = 1.50 m; Ancho = 1 m; Altura a partir del suelo = 0.80 m. En la Figura 1 se aprecian los elementos del horno.

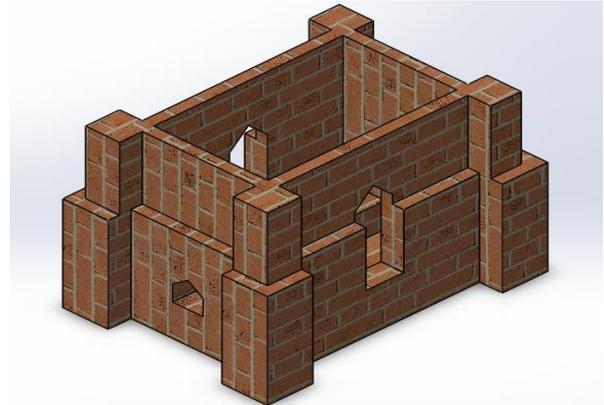


Figura 1 Modelo completo del horno “La Gloria”.

Utilizando la metodología existente en la literatura (Cengel, 2004) se determinaron los coeficientes de transferencia de calor por convección para el horno actual. Los datos disponibles son: Altura = 4 m, $T_s = 300\text{ }^\circ\text{C}$, $T_i = 950\text{ }^\circ\text{C}$, emisividad del ladrillo rojo: $\epsilon = 0.96$, $K = 0.72\text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$; las propiedades del aire se toman a $625\text{ }^\circ\text{C}$. En la Tabla 1 se muestran los valores obtenidos.

Interior	$h_1 = 5.6788 \frac{W}{m^2\text{ }^\circ\text{C}}$
Exterior	$h_2 = 3.209 \frac{W}{m^2\text{ }^\circ\text{C}}$

Tabla 1 Coeficientes convectivos para el horno actual.

Análisis numérico del horno actual

A continuación y con ayuda del software ANSYS Fluent ©, se realizó un análisis térmico de flujo permanente (Steady-State Thermal) en 2D para mostrar el efecto de las temperaturas, el flujo de calor total y la dirección del flujo de calor total que se tiene dentro y fuera de la cámara de cocción del horno actual. Con base en los datos proporcionados por el operador del horno “La Gloria”, la temperatura en el interior del horno fue de $950\text{ }^\circ\text{C}$ y la temperatura exterior, de $20\text{ }^\circ\text{C}$. El análisis se realizó considerando convección natural en el interior y exterior del horno.

En la Figura 2 se presenta la sección transversal del horno en donde se aprecia las temperaturas a las que se somete el horno actual.

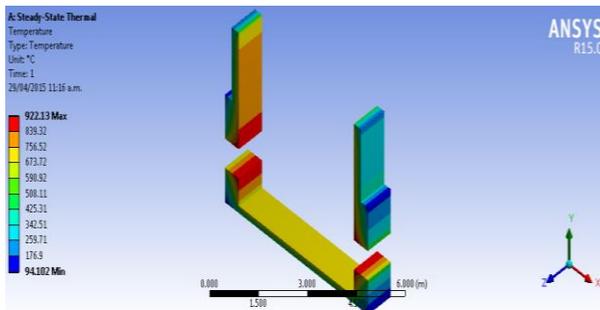


Figura 2 Temperaturas del horno actual en la cámara de cocción y en el exterior (sección trasversal).

Se puede apreciar que la temperatura máxima de 922.13 °C se encuentra en las esquinas de los canales de encendido del horno, la cual no es uniforme en todo el interior del horno. Esto provoca que algunos ladrillos queden muy quemados y otros no alcanzan a quemarse completamente. (Juárez, 2015). En la Figura 3 se muestra la distribución de temperaturas en las paredes (exterior e interior) del horno actual.

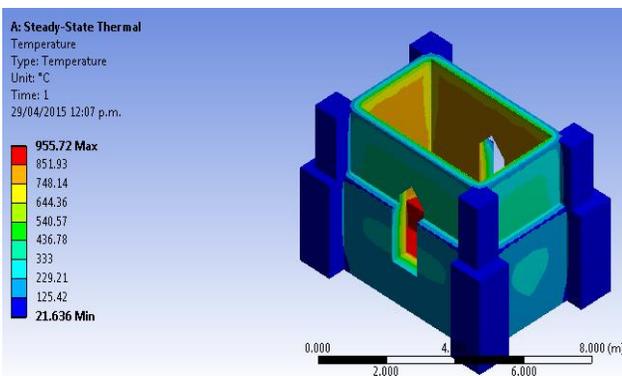


Figura 3 Distribución de temperaturas en las paredes del horno actual.

Modelado del horno propuesto

Nuevamente se utiliza el Software Solidworks© para realizar el diseño del horno propuesto.

El primer cambio fue la implementación de tres canales de encendido en la parte inferior del mismo, en lugar de uno en los hornos actuales de tipo intermitente.

Su función es distribuir el calor en el interior del horno de manera uniforme en la cámara de cocción de abajo hacia arriba (ascendente).

De esta manera se evita que en las esquinas del horno se presenten temperaturas bajas provocando que los ladrillos se cosan de manera incorrecta. En la Figura 4 se presenta el modelo de los canales de encendido.

La incorporación de un techo con chimeneas, permite un mayor control de la temperatura del horno (mayor estabilidad térmica), esto es porque el horno tiene la capacidad de llegar a una temperatura máxima promedio de 1200 °C (dato proporcionado por ecología). A partir de esta temperatura, el horno ya no permite que se le siga agregando calor, sino que trata de sacarlo a la atmósfera de alguna manera porque la cámara de cocción del horno tiene una capacidad de temperatura máxima promedio predeterminada.

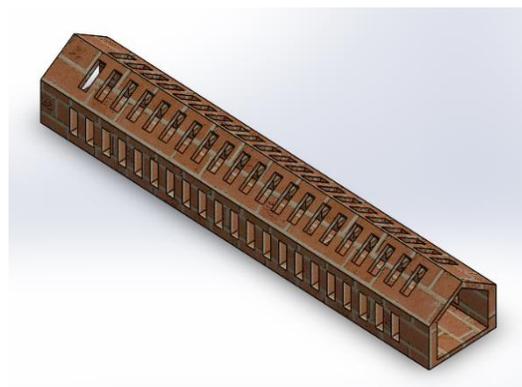


Figura 4 Modelo de los canales de encendido del horno.

La Figura 5 presenta la imagen del modelo de las chimeneas para la salida de los gases del horno gases del horno.

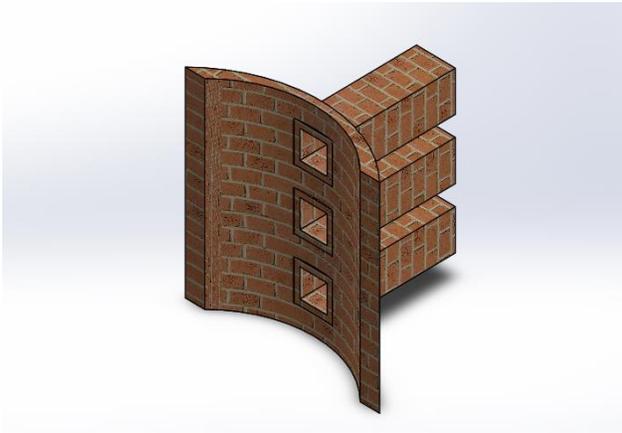


Figura 5 Modelo del techo mostrando de las tres chimeneas incorporadas al diseño del horno.

Medidas del horno

- Altura de la planta alta = 3 m (sólo se le aumenta 1.5 m más para las chimeneas).
- Altura de la planta baja = 1.5 m.
- Altura de la puerta de la planta baja = 0.75 m.
- Altura de la puerta planta alta = 3 m.
- Altura de los cimientos = 0.80 m.
- Altura total de la cámara de cocción = 5.45 m.

Las medidas de los espesores de pared quedaron de la siguiente manera:

- Espesor de las paredes, planta baja: 1 m.
- Espesor de las paredes, planta alta: 0.50 m.

La Figura 6 muestra el diseño del horno completo con los canales de encendido en la planta baja (tres canales de encendido), canales de encendido de ayuda en la planta alta (dos canales de ayuda) y chimeneas en la parte superior del horno (tres chimeneas).

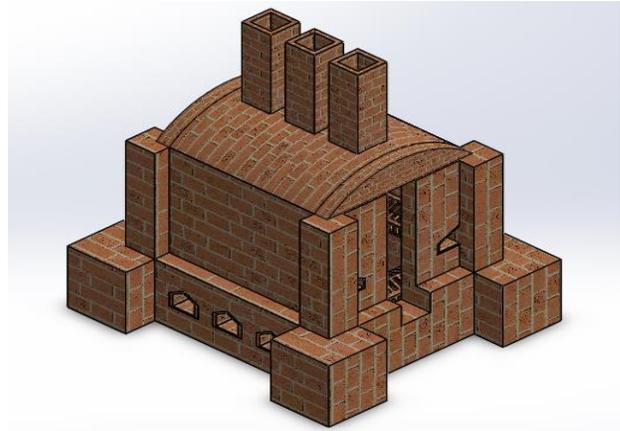


Figura 6 Diseño completo del horno propuesto.

Análisis numérico del horno propuesto

Continuando con la metodología utilizada en la sección anterior, se realizó un análisis térmico de flujo permanente (Steady-State Thermal) en 2D con ayuda del software ANSYS Fluent ©, para mostrar el efecto de las temperaturas, el flujo de calor total y la dirección del flujo de calor total para el horno propuesto.

En la Figura 7 se presenta la sección transversal del horno en donde se aprecia la distribución de temperaturas en las paredes del horno.

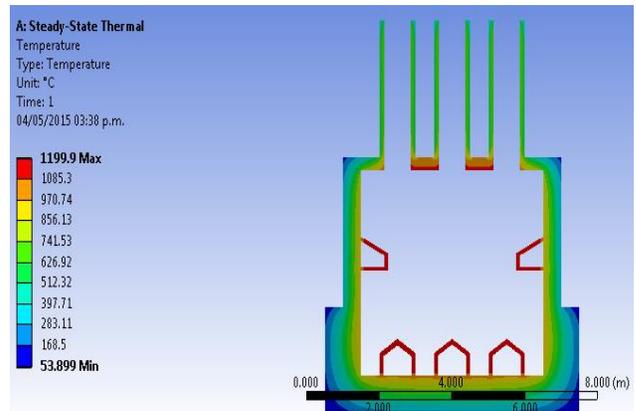


Figura 7 Vista de la sección transversal del horno con la distribución de temperaturas.

Se observa que la temperatura tiene una distribución más uniforme en toda la sección transversal del horno: entre 970.74 °C y 1085.3°C, con un valor máximo de 1199.9 °C (color rojo).

La Figura 8 muestra la vista lateral del horno en donde se puede apreciar el efecto de las temperaturas en el exterior del horno.

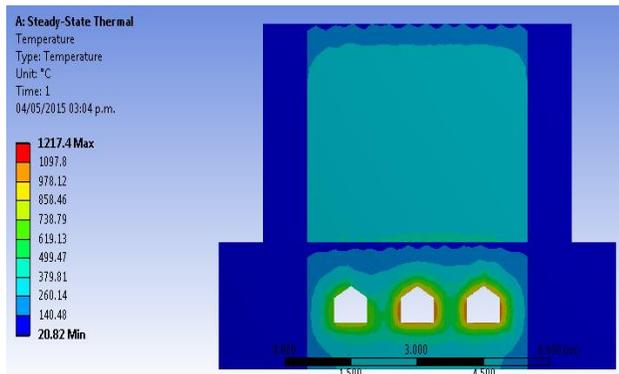


Figura 8 Vista lateral del horno en donde se aprecia la distribución de temperaturas en el exterior.

También se realizó un análisis de flujo total de calor dentro del horno (análisis en 3D), considerando convección natural en el interior y exterior del horno, tal y como se muestra en la Figura 9. Se puede observar claramente que el flujo de calor máximo en el horno se encuentra en la parte de los canales de encendido.

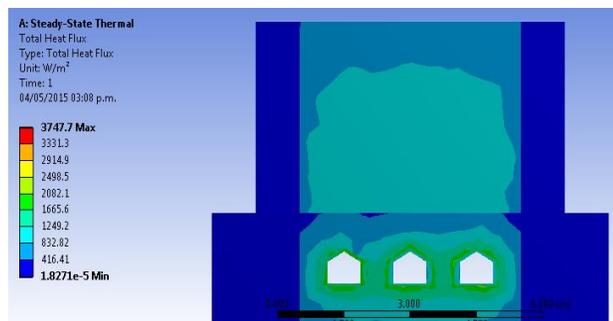


Figura 9 Vista lateral del horno en 3D con la distribución del flujo de calor total en el exterior.

En la Figura 10 se presenta la vista isométrica del horno, en donde se observa el efecto del flujo total de calor en el horno.

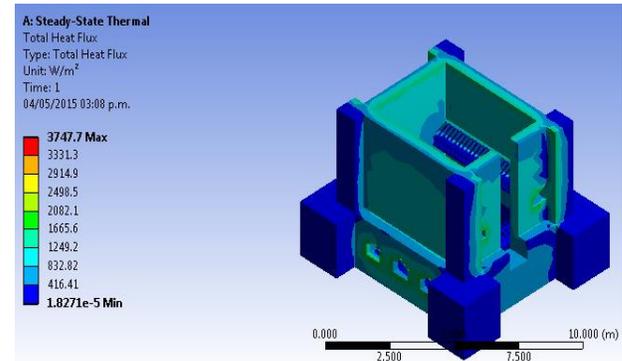


Figura 10 Vista isométrica con la distribución del flujo de calor total en el exterior e interior del horno.

Por último, se realizó un análisis de la dirección del calor dentro y fuera del horno; en la Figura 11 se muestra la dirección que toma el flujo total de calor del horno cuando se encuentra en operación (de derecha a izquierda).

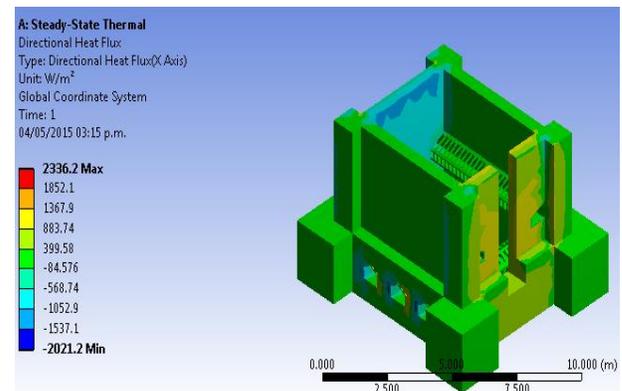


Figura 11 Vista isométrica que muestra la dirección del flujo de calor total en el horno.

Al incorporar el techo con chimeneas en el horno, la dirección del calor es de abajo a hacia arriba (ascendente), por lo que la temperatura de la cámara de cocción del horno permanece estable.

Resultados

Mediante un análisis termodinámico en APDL de ANSYS Fluent© se obtuvieron los perfiles de temperatura en la cámara de cocción del horno actual en operación, tal y como se muestra en la Figura 12.

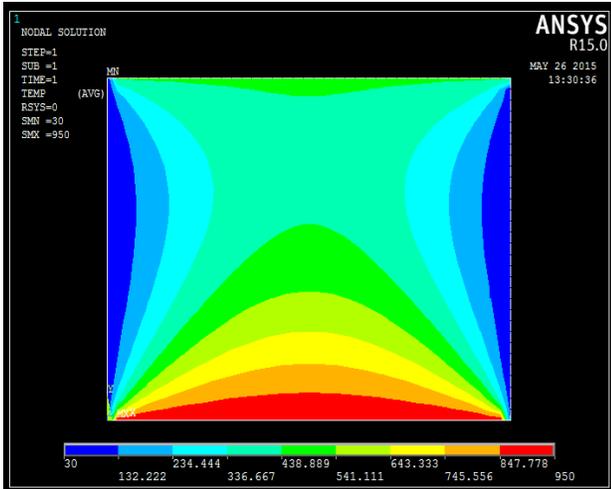


Figura 12 Perfiles de temperaturas del horno actual “La Gloria”.

En forma análoga, se realizó el mismo análisis termodinámico en APDL de ANSYS Fluent© para obtener los perfiles de temperaturas dentro del horno propuesto, para verificar si los ajustes realizados fueron satisfactorios.

Para verificar el funcionamiento óptimo del horno, se realizaron dos análisis:

El primero fue hecho sin tomar en cuenta las chimeneas y los canales de ayuda de encendido en el horno.

La Figura 13 presenta el efecto de la transferencia de calor por convección natural interna dentro del horno (con $h = 3.27 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$) en una distribución de temperaturas dentro de la cámara de cocción del horno.

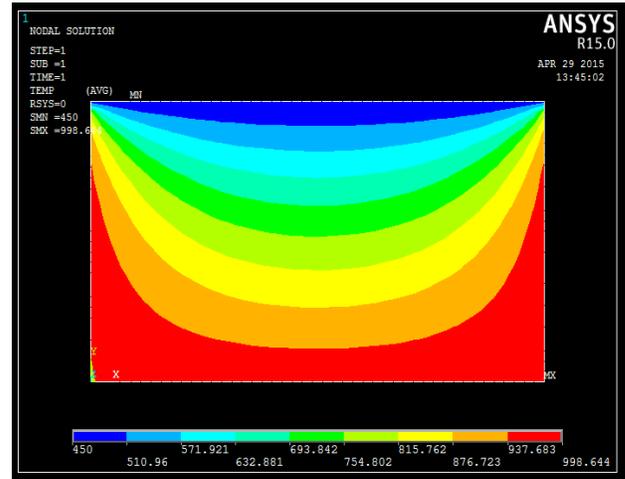


Figura 13 Distribución del calor dentro de la cámara de cocción sin canales de ayuda de encendido.

La temperatura que se utilizó en el interior del horno fue de 1000°C y la temperatura en la parte superior del horno se consideró de 450°C (valores obtenidos de la investigación de campo y bibliográfica).

En la Figura 14 se muestra la curva característica de operación del horno sin tomar en cuenta las chimeneas ni los canales auxiliares de encendido, graficándose las temperaturas Vs la distancia vertical del flujo de calor dentro de la cámara de cocción del horno.

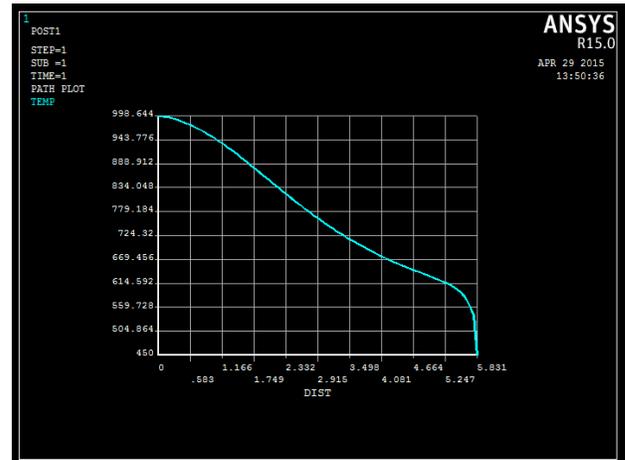


Figura 14 Curva característica de operación del horno.

Se aprecia que la temperatura no permanece uniforme con a lo largo de la cámara de cocción (tiene una caída de temperatura notable); esto se debe a que en el interior del horno no existe una distribución uniforme del calor por lo que se debe tomar en cuenta este fenómeno en la optimización del horno.

El segundo análisis se realizó tomando en cuenta los canales de ayuda de encendido en la parte de la planta alta del horno y el techo con las chimeneas.

En la Figura 15 se muestra el efecto de las temperaturas en un medio convectivo con un valor del coeficiente de calor por convección natural de $3.27 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$, con temperaturas en el interior y en la parte superior del horno de 1000°C y $978.12 \text{ } ^\circ\text{C}$, respectivamente (obtenido de ANSYS).

Asimismo se observa que la distribución del calor dentro de la cámara de cocción con los canales de ayuda de encendido es más uniforme; esto permite que la temperatura dentro del horno se mantenga más constante en la mayor parte de la cámara de cocción (color rojo).

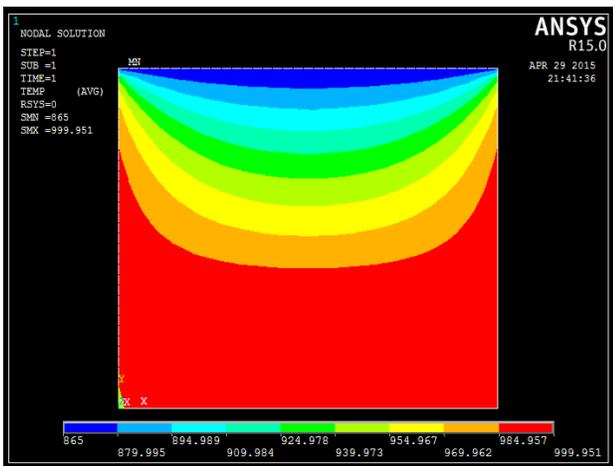


Figura 15 Distribución de temperaturas en el horno, con canales de ayuda de encendido

Cabe mencionar que al emplear un techo en el horno favorece que la temperatura del horno no cambie considerablemente, evitando también que en la parte superior del horno se presenten temperaturas menores a la temperatura de cocción de los ladrillos. En este caso la temperatura que se tiene en la parte superior del horno es de $978.14 \text{ } ^\circ\text{C}$ (dato agregado al programa APDL), mostrado en color azul.

En la Figura 16 se muestra la curva característica de operación del horno tomando en cuenta las chimeneas en el techo del horno y los canales auxiliares de encendido.

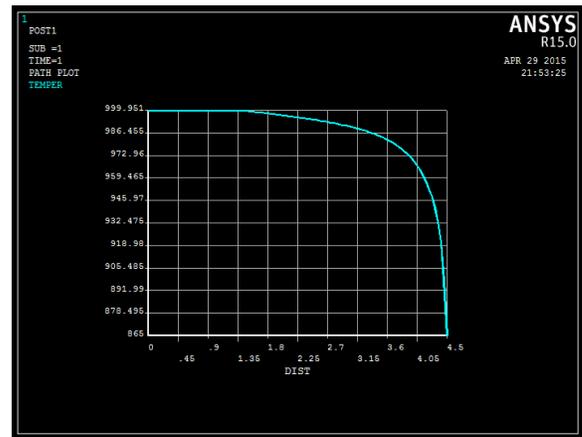


Figura 16 Curva característica de operación del horno con canales de encendido de ayuda y chimeneas.

Se puede observar que la temperatura es más uniforme dentro de la cámara de cocción del horno propuesto en comparación con el horno actual “La Gloria”.

Pruebas Experimentales

Como un complemento de esta investigación, se realizaron pruebas experimentales para determinar la mejor combinación de materiales para la fabricación de ladrillo artesanal, ensayando 11 formulaciones distintas. Por cuestiones de espacio, sólo se presentan los resultados de dichas pruebas para la formulación óptima, clasificada como la 2B (ver Tabla 2).

Formulación	Prueba	Valor obtenido
Agua, arcilla, barro, dolomita, caliza, alúmina, arena sílica, tezontle	Porosidad	20%
	Pérdidas por calcinación	15.4%
	Pérdidas por contracción lineal	0.52%
	Esfuerzo a la compresión	209.62 kg/cm ²
	Módulo de ruptura	18 MPa

Tabla 2 Resultados de las pruebas experimentales realizadas a la probeta 2B.

Los valores obtenidos experimentalmente están dentro del rango que señalan la norma aplicable, e incluso, como en el caso del esfuerzo a la compresión, la superan (Norma NMX-C-404-1997-ONNCCE).

Conclusiones

La temperatura máxima de operación del horno a la cual se coccionan los ladrillos fue de 1217.4 °C, este valor es similar a los datos obtenidos en el estudio de campo.

El flujo de calor máximo en el horno fue de 3747.7 W/m² y se localiza en los canales de encendido. Por lo tanto se determina que en los canales de encendido es donde se debe tomar control para ir incrementando de manera adecuada la temperatura y así permitir que la cocción de los ladrillos sea la adecuada.

El cálculo del flujo total de calor direccional sirvió para determinar el lugar de la salida de los gases de combustión a la atmósfera, el cual tuvo un valor máximo de 2336.2 W/m². Este flujo máximo se localiza en la puerta de admisión de los ladrillos.

Con base en los resultados obtenidos, podemos establecer que la utilización de canales de ayuda de encendido y un techo con chimeneas en el horno es muy conveniente, dado que tales incorporaciones provocan que el calor fluya de manera más constante y uniforme en todo el proceso de cocción del ladrillo. Esto se aprecia perfectamente en la curva característica de operación del horno, mostrada en la Figura 16: a lo largo de la cámara de cocción no se tiene una caída de temperatura, como ocurre cuando no se toman en cuenta los canales auxiliares de encendido y las chimeneas.

Referencias

- Cengel, Y (2004). Transferencia de calor y masa. México, Mc Graw Hill.
- Gómez, A; Jiménez, I. y Ávila, E. (2015). “Caracterización y Reformulación de Materiales para la Elaboración de Ladrillo Artesanal”. Memorias del XXI Congreso Internacional Anual de la SOMIM, 23-25 de Septiembre, 2015. Coatzacoalcos, Ver. pp. 663-669.
- Juárez, L. (2015). “Estudio Teórico-Experimental de la Optimización de un Horno para Fabricar Ladrillos”, Informe de Residencia Profesional, Instituto Tecnológico de Pachuca.
- Moreno, M. (2015), “Caracterización de un Horno Convencional para la Fabricación de Ladrillo”, Informe Técnico Final de Proyecto de Investigación, Instituto Tecnológico de Pachuca.
- Álvarez, S. F. (2014). “Optimización del proceso de mezcla de arcilla para la producción de ladrillos, en el sector artesanal”. Universidad de Cuenca. Sitio web: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/5529/1/TESIS.pdf>

García, C. A. et al. (2013). “Resistencia mecánica de ladrillos preparados con mezclas de arcilla y lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales”. *Tecnura*, Vol. 17, núm. 38, pp. 68-81 Universidad Distrital Francisco José de Caldas Bogotá, Colombia.

Gomezcoello, J. L. (2012). “Análisis Comparativo de la Contaminación Atmosférica Producida por la combustión en ladrilleras artesanales utilizando tres tipos de combustibles”. U. P. Salesiana. Sitio web: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5226/1/UPS-CT002748.pdf>

García, A. et al. (2012). “Propiedades físicas y mecánicas de ladrillos macizos cerámicos para mampostería Ciencia e Ingeniería Neogranadina”. Vol. 22, núm. 1, pp. 43-58. Universidad Militar Nueva Granada Bogotá, Colombia.

María G., (2011). "Determinar Los Perfiles De Temperatura De Un Horno Para Ladrillos Del Sector Chambo", Tesis De Grado, Riobamba, Escuela Superior Politécnica De Chimborazo.

Rodríguez, J. et al. (2004). “Perfiles de temperatura en un horno ladrillero”. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, Vol. 3, núm. 2, 2004, pp. 209-217, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa México.

Normas Mexicanas CMT-2-01-001/02 (2012). Características de los materiales. Parte 2 Materiales para estructuras, Título 01 Capítulo 001 Materiales y bloques cerámicos, de Secretaria de comunicación y Transportes. Sitio web: <http://normas.imt.mx/normativa/N-CMT-2-01-001-02.pdf>

Norma Mexicana NMX-C-006-1976, Ladrillos y Bloques Cerámicos de Barro, Arcilla y/o similares.

Norma Mexicana NMX-C-404-1997-ONNCCE. Industria de la Construcción – Bloques, Tabiques o Ladrillos y Tabicones para uso estructural – Especificaciones y Métodos de Prueba.