



La Ingeniería Estructural de Fuego un enfoque nacional y ejemplo de aplicación

The Structural Fire Engineering a national approach and case of study

Ruvalcaba-Ayala Fabián René

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Civil

Subdirección de Estudios de Posgrado

Correo: fabian.ruvalcabaa@uanl.mx

Covarrubias-Navarro Mario

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Civil

Subdirección de Estudios de Posgrado

Correo: mario.covarrubiasnv@uanl.edu.mx

Resumen

Este artículo inicia con una introducción al tema de la Ingeniería Estructural de Fuego como una especialidad de diseño que brinda estabilidad en las edificaciones cuando los elementos estructurales se someten a altas temperaturas durante un incendio. El comportamiento de los materiales de la construcción ante esta acción de diseño se estudia por medio de pruebas estándar, cuyos resultados se utilizan en la toma de decisiones al momento de diseñar los elementos. Además, se presenta una investigación experimental con el objetivo de determinar la reducción de la resistencia a la compresión bajo la acción de altas temperaturas de muretes de mampostería de concreto ligero. Los muretes se expusieron a temperaturas de 20°C, 200°C, 400°C, 600°C, 700°C y 800°C.

Descriptores: Fuego, mampostería, mortero, compresión, bloques, concreto.

Abstract

This paper begins with a brief review of Structural Fire Engineering as a design speciality that provides stability to constructions when structural elements are subjected at high-temperature during a fire. Construction material behavior subjected to fire action is studied through fire standard tests and the results are used to take decisions at the moment of designing elements. It is also presented an experimental investigation, whose aim is to determine the reduction of the compressive strength of lightweight concrete masonry wallets at high temperatures. The wallets were exposed to 20°C, 200°C, 400°C, 600°C, 700°C y 800°C temperatures.

Keywords: Fire, masonry, mortar, compression, blocks, concrete.

INTRODUCCIÓN

Las edificaciones se diseñan para poder resistir acciones, las cuales tienen una determinada incertidumbre probabilística de ocurrencia, sin embargo, los códigos de construcción exigen que se consideren en las etapas de proyección, especialmente en el desarrollo estructural de los elementos. Las acciones pueden ser gravitacionales y accidentales; donde las primeras son las de mayor presencia, le siguen las cargas que por su fuente no hay una seguridad completa en cuanto a la magnitud, tiempo de acción, y ocurrencia.

Las cargas accidentales (sismo, viento, mareas, fuego, etcétera) son fenómenos ampliamente estudiados, y cada uno de ellos ha generado una rama completa dentro de la ingeniería estructural (ingeniería sísmica, ingeniería de vientos, ingeniería de fuego). El objetivo de este artículo consiste en mostrar los aspectos que establece la *Ingeniería Estructural de Fuego* (IEF) para revisar, evaluar, diseñar, desarrollar y mejorar acciones para tener construcciones en México más resistentes durante la acción de incendio. Como un ejemplo de aplicación se presentan resultados experimentales obtenidos de muretes de mampostería sometidos a altas temperaturas.

Se sabe que la ocurrencia de un incendio en construcciones se afecta por varios factores inciertos, que son tan diversos como la basta configuración de la estructuración, espacios y usos de las edificaciones; asimismo, diversas opiniones han concluido que la no linealidad de la probabilidad de un fuego está relacionada con las dimensiones de las edificaciones (Lin, 2005).

El fuego como una acción de diseño es un punto en la ingeniería que no se ha desarrollado en México, para comprender cuál es el comportamiento de las estructuras y el nivel de seguridad que se puede implementar principalmente a los usuarios y después al inmueble bajo la acción de las altas temperaturas existentes en un incendio a gran escala.

LA INGENIERÍA APlicADA AL FUEGO

La *Ingeniería de Seguridad de Fuego* (ISF) lida con la relativa falta del estado del arte en esta materia, y aunque se conocen los aspectos de la ciencia del fuego, no es así para los de la ciencia de la seguridad (Watts, 1999).

La ISF rompe con los paradigmas al desarrollarse como una multi-disciplina, que evalúa las estrategias necesarias para garantizar la seguridad de las edificaciones bajo la acción del fuego al brindar una protección pasiva (que no requieren energización) y activa

(energización necesaria) (Bailey, 2004). De acuerdo con el Instituto de Ingenieros de Fuego del Reino Unido, la ISF incorpora a la definición la aplicación de ciencia y principios de ingeniería, códigos y juicio experto; basado en el entendimiento del fenómeno, efecto, y seguridad de los usuarios e inmuebles ante la acción del fuego. Ahora bien, se puede puntualizar específicamente lo que concierne a la seguridad como:

- 1) Salvar la vida de los ocupantes
- 2) Proteger las vidas de los servicios de emergencia
- 3) Proteger la integridad del edificio
- 4) Salvar edificaciones adyacentes (Denoël, 2007)

Dentro de la ISF, la *Ingeniería de Protección de Fuego* (IPF) provee de un nivel de protección a las edificaciones al utilizar medios activos como alarmas, sistemas de aspersión y cualquier sistema automático contra un incendio. Los aspectos pasivos se aplican en el diseño del edificio, en su resistencia de carga y la limitación o contención del crecimiento del fuego. En esta categoría la *Ingeniería Estructural de Fuego* (IEF) es como una rama que incorpora el diseño de los elementos estructurales, teniendo en cuenta las acciones de las altas temperaturas.

La tendencia de la IEF es lograr un entendimiento general del comportamiento de las estructuras bajo cargas térmicas y estructurales conjugadas. El estudio y juicio del conjunto de acciones permite desarrollar las bases para un diseño basado en el desempeño para las acciones de fuego, la cual comienza con la selección de un fuego de diseño de exposición, tomando principalmente una curva tiempo-temperatura, que se encuentra en función de la carga de fuego, ventilación y propiedades térmicas de los elementos circundantes; sigue un análisis de las cargas térmicas y su consecuencia mecánica combinada con otras cargas mecánicas de diseño; asimismo, continua con un análisis de desempeño y se evalúa, reconfigurando si es necesario hasta obtener la respuesta deseada (Beyler *et al.*, 2007).

En los últimos años resurgió la importancia del entendimiento de la interacción fuego-estructura, que se estudia por la IEF, debido a diversos eventos destacados de interés internacional en la década pasada, en este caso, el colapso de las torres gemelas, sede del World Trade Center en Nueva York, EUA en 2001, evento desafortunado donde hubo pérdidas humanas y millones de dólares en daños. Este suceso concluyó explicando que la explosión no fue la causa del colapso, sino el daño generado por el fuego del combustible de las aeronaves, el cual se estima que 30% se consumió en la explosión inmediata al impacto y el resto se quemó en un incendio

intenso a temperaturas aproximadamente entre 800°C y 1000°C, generando posibles fallas en los elementos de la armadura de acero que conformaba los pisos (Quintiere *et al.*, 2002), como efectos de pandeo en columnas debido a expansiones térmicas, concluyendo que las temperaturas críticas estructuralmente fueron alrededor de los 400°C (Porcari *et al.*, 2015).

En el año 2005, otro caso de incendio ocurrió en la torre Windsor en Madrid, España; un sistema de losa de concreto con columnas de acero perimetral de 32 niveles con un núcleo central de concreto reforzado. Fue un incendio en el piso 21 que se extendió a todos los niveles superiores durante el periodo de una hora y tuvo una duración entre 18 a 20 horas, generó colapsos de losas por encima del nivel 17, concluyéndose que debido a los daños del edificio no podía repararse, por lo tanto, se demolió en su totalidad (Bailey, 2004). Casos más recientes como el ocurrido en Caracas, Venezuela (2005) con el edificio Tajamar en el parque central, el cual perjudicó a 900 inquilinos; ó finalmente, el del edificio residencial del centro en Xinhua, China donde se reportaron pérdidas humanas.

A nivel nacional se tienen eventos de alerta en cuanto a la seguridad contra incendios tanto de medios pasivos como activos, por ejemplo, en 2011, el incendio provocado en el Casino Royale en la ciudad de Monterrey, que derivó en pérdidas humanas, pero dada la gran relevancia del caso no existe un estudio documentado en cuanto a los daños estructurales derivados del incendio. Lo mismo en el caso de la guardería ABC en Hermosillo, Sonora en 2009, o lo ocurrido en la discoteca Lobohomo de la Ciudad de México en 2000.

El desarrollo de estos hechos trágicos ha causado que el enfoque de la seguridad en el caso de incendio sea de vital importancia para salvaguardar las edificaciones y sus ocupantes. Por lo tanto, es de importancia significativa que se comprenda la aplicación que la IEF puede tener en los métodos o procedimientos que se siguen en el diseño de elementos en las edificaciones, por ello, se deben incluir los aspectos de mayor relevancia en cuanto al comportamiento del fuego y pruebas estandarizadas que desarrollan conocimiento si se aplica en la experimentación y conclusión de resultados para la toma de decisiones en cuanto a la elaboración de proyectos de construcción.

ESCIENARIOS DE FUEGO

Para comprender el comportamiento del fuego es necesario entender cómo se produce, se desarrolla y se extingue con el fin de obtener datos de los factores que afectan la duración e intensidad (temperaturas). Los

escenarios pueden ser muy diversos, ya que involucra variables dimensionales, configuración y de compartimentación.

El aspecto de compartimentación o fuego compartamental es esencial en la edificación (figura 1), este factor en una estructura es ideal, ya que tiene como objetivo además de separar funciones de las áreas, el servir como de contención al fuego (Purkiss, 2007) debido a sus elementos separadores (muros, entrepisos), donde este es el escenario más crítico tanto para los elementos verticales (muros, columnas), como de los horizontales (vigas, losas), el diseño de dichos elementos debe ser tal, que contengan el menor daño y conserven sus propiedades de aislamiento en contra del espaciamiento del fuego (IStructE, 2007). En el fuego compartamental la transferencia de calor con sus tres aspectos de relevancia radiación, convección y conducción, se presentan como resultado de la presencia de gases con un perfil de temperatura variable desde la parte superior a la inferior, que tiende a llenar el compartimento fuera de la zona del fuego (Zhang *et al.* 2012). Además, los gradientes térmicos en los espesores de los elementos verticales y horizontales pueden ser muy contrastantes, generando fenómenos muy particulares dependiendo el tipo de material que se utilice, así como del uso de retardantes o aislantes.

Las temperaturas y los tiempos que se presentan en un fuego compartamental siguen un patrón similar, que se divide en tres etapas evidentes: desarrollo, intensidad completa, y declinación. Un aspecto de importancia es que entre la fase de desarrollo y la de intensidad completa se presenta un crecimiento muy acelerado de la temperatura conocido como combustión súbita generalizada (flash-over) tal como se observa en la figura 2, este ocurre cuando todas las superficies combustibles en el compartimento se queman por la radiación y por la rápida ignición de los gases emanados del fuego que simultáneamente queman todos los combustibles (Fitzgerald, 2004).

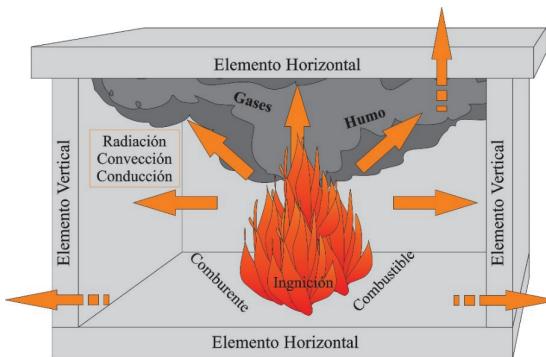


Figura 1. Esquemático de un fuego compartamental

Es complejo poder imitar todas las condiciones reales existentes y las curvas de tiempo temperatura con el fin de hacer pruebas experimentales a los materiales y sistemas constructivos, estas pruebas se hacen en hornos especializados; para ello se recurrió a la ASTM (ASTM, 2000) y el ISO (ISO, 1999) (figura 3), estas dos normas elaboradas por organismos diferentes establecen curvas que son semejantes entre sí, sin embargo, se realizaron estudios para comparar si existen niveles diferentes de severidad en la exposición, concluyendo que dentro de períodos cortos de 1.5 horas son ligeramente mayores por la curva de ASTM, no obstante, más allá de ese tiempo las diferencias son despreciables (Harmathy *et al.*, 1987). En Europa el Comité Europeo de Normalización (CEN) establece la curva en concordancia con la ISO en la norma EN 1991-1-2 (CEN, 2002). En México, el estándar que se utiliza para probar elementos, componentes y productos de construcción para resistir al fuego se establece por ONNCCE como la norma NMX-C-307 (ONNCCE, 2009), esta norma tiene concordancia parcial con la ISO de acuerdo con el apartado 12, y establece coincidencia con las tablas de la curva de temperatura.

ESTUDIOS DE EDIFICACIONES A GRAN ESCALA

Hacer estudios experimentales de edificaciones a escala real resulta costoso y requiere mucho tiempo, además, son de utilidad para observar el comportamiento en conjunto de todos los sistemas estructurales que conforman una edificación.

La prueba Cardington fue un programa basado en una serie de pruebas a gran escala de edificaciones reales (madera, acero-concreto compuesto y concreto), a

partir de las cuales se derivan muchos estudios comparativos y se alimentan modelos computacionales.

Derivado de esta serie de pruebas, en 2005, se realizó un caso de estudio (BRE, 2005) donde probaron la integridad de la compartimentación por parte de muros, la relación entre fuegos estándar y paramétricos, el efecto del incremento de claros, el impacto de cargas impuestas y la influencia de la protección de fuego aplicada en una edificación a escala real comparando su respuesta con modelos analíticos de elementos finitos.

La SFPE (Society of Fire Protection Engineers, Reino Unido) en 2006 contempló la revisión del comportamiento de las estructuras con fuego (Lamont *et al.*, 2006) específicamente de marcos de acero, así también realizó un comparativo de una edificación diseñada bajo prescripción de códigos y otra basada en diseño por desempeño, donde utilizó modelos computacionales y comparó resultados experimentales de la prueba Cardington (Kirby, 1998).

PRUEBAS ESTANDARIZADAS

Las pruebas estandarizadas de resistencia a altas temperaturas para elementos de la industria de la construcción, generalmente obtienen datos referentes a los cambios de resistencia, comportamiento y propiedades, tanto físicas como en su estructura química, sin embargo, la generalización del comportamiento preciso de cada material tiene un amplio rango debido a que incluso un mismo material con diferencias en sus componentes puede dar en ciertos casos diferencias significativas (Abrams, 1979).

Existen diversos estándares para la determinación de la resistencia al fuego en elementos de la industria

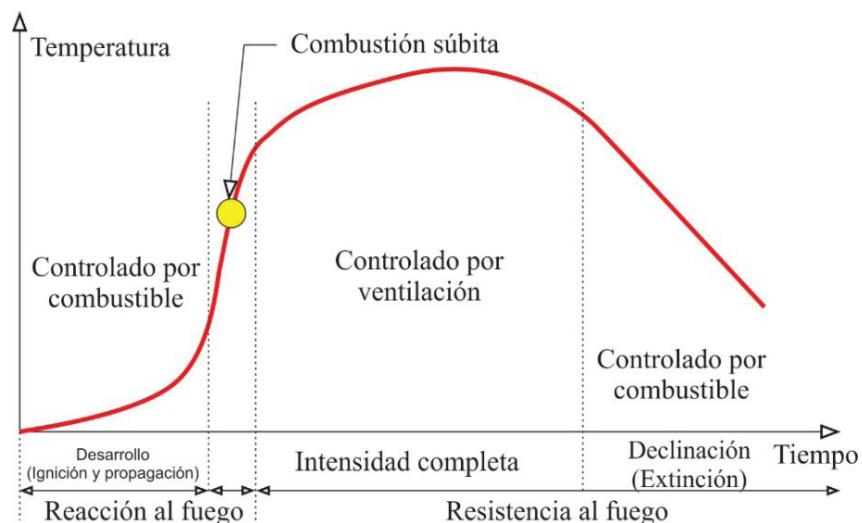


Figura 2. Gráfica tiempo-temperatura de fases de un fuego compartamental (Denoël, 2007)

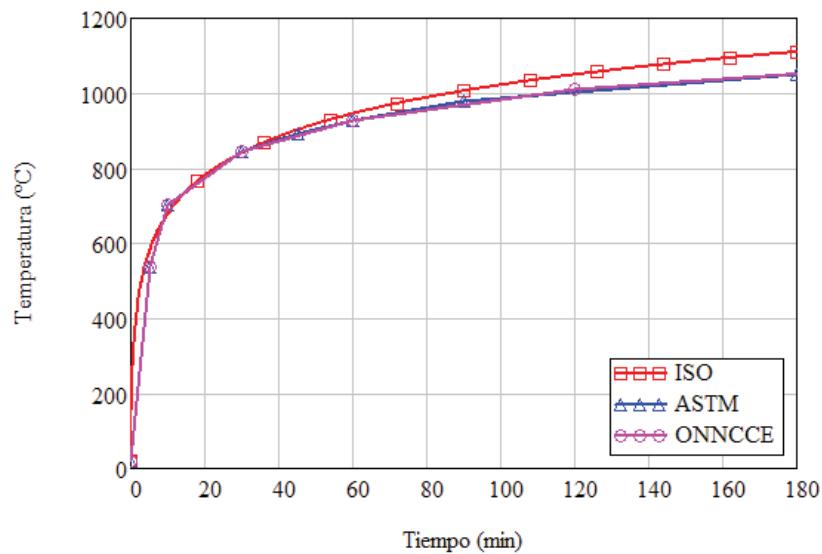


Figura 3. Gráfico de comparación de curvas tiempo-temperatura establecidos por la ASTM, el ISO y ONNCCE

de la construcción que pueden aplicarse por la ASTM con el código E-119-14 (ASTM, 2014), este comprende los procedimientos y configuración de los especímenes, así como especificaciones en cuanto al tipo de elemento (muro estructural, muro divisorio, losas, pisos, columnas, etcétera). En semejanza, se tiene en Europa el estándar EN 1363-1 (CEN, 1999) con el apartado de requerimientos generales, que subdivide en apartados individuales cada tipo elemento estructural. En México se cuenta con la NMX-C-307 (ONNCCE, 2009) como principal guía, la cual guarda cierta concordancia con los estándares internacionales.

El concepto de resistencia al fuego se define en la NMX dentro del apartado 4.21, que es semejante a otros estándares y se define como: "La propiedad de un producto, recubrimiento, elemento o componente de cons-

trucción de soportar la exposición al fuego o dar protección contra él, se caracteriza por la facultad de circunscribir un incendio o de continuar ejerciendo una función estructural determinada o ambas" (ONNCCE, 2009). En general, la resistencia al fuego se mide en función del tiempo de exposición (30, 60, 90, 120min) con el cumplimiento de ciertos criterios: resistencia estructural "R" manteniendo su capacidad de carga a través del tiempo requerido en exposición al fogo; aislamiento "I" cuando la temperatura promedio en la cara no expuesta o la temperatura máxima en cualquier punto no exceden ciertos límites, e integridad "E", que se satisface cuando se previene el paso de llamas o gases calientes a través del elemento. Las diferentes combinaciones de los criterios específicamente en muros permiten obtener un valor de resistencia de fuego que clasifique al elemento como de carga o separador, o su conjunto (BSI, 2005), (figura 4).

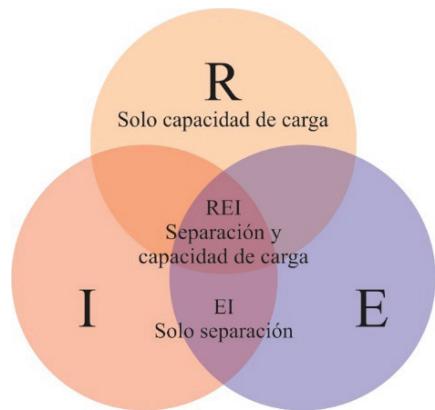


Figura 4. Conjuntos de criterios de resistencia de fuego en muros

ESTUDIO DE MUROS DE MAMPOSTERÍA A ALTAS TEMPERATURAS

La mampostería tiene un amplio uso como elemento vertical de carga o como elemento separador de espacios, por lo que al formar parte de un compartimento este puede someterse a altas temperaturas durante la acción de un incendio. Los materiales de los que está hecha la mampostería son variados, va desde concretos, arcillas, silicatos de calcio y celulares. Aun cuando los materiales son inherentemente resistentes al fuego, estos tienen un tiempo de resistencia (Hendry, 2001) que es objeto de estudio y considerado por reglamentos al momento del diseño. La diversidad de materiales da

como resultado un grande y variable rango de caracterización. En las propiedades térmicas de los materiales la conductividad es dependiente de la densidad, por lo que un material que tenga una alta densidad obtiene valores de conductividad mayores haciendo que este parámetro sea el más importante en la caracterización (Purkiss, 2007).

Un factor importante en la estabilidad de muros de mampostería es el coeficiente de expansión térmica o dilatación, el cual debido a las altas temperaturas y fuertes gradientes en el espesor de los muros pueden generar deformaciones diferenciales, ya que la cara expuesta se expande más rápido que la cara fría en el caso de muros expuestos a altas temperaturas en una sola cara; además, la degradación del material de la cara caliente genera deformaciones fuera del plano conocidas como inclinaciones térmicas que generalmente causan excentricidades a las cargas aplicadas y, por consecuencia, flexiones al plano del muro. Los materiales con valores de conductividad térmica menores son los más susceptibles a generar gradientes muy altos (Nadjai *et al.*, 2006). La relación de esbeltez de los muros, las condiciones de frontera y condiciones de carga influyen activamente en el tipo de deformación térmica resultante (Nadjai *et al.*, 2003b; Russo y Sciarretta, 2013), cuando existe una degradación de los materiales en la cara expuesta, la excentricidad puede generar que la inclinación térmica se revierta principalmente cuando se somete a la carga total de diseño (figura 5).

El contenido de agua dentro de las unidades de mampostería y morteros es benéfico como mecanismo de disipación de calor en las primeras etapas de calentamiento (Nguyen y Meftah, 2012). Esta disipación se observa cuando en acción de fuego la temperatura interna del muro de mampostería presenta una meseta por el calor latente del agua, alrededor de los 80-100°C

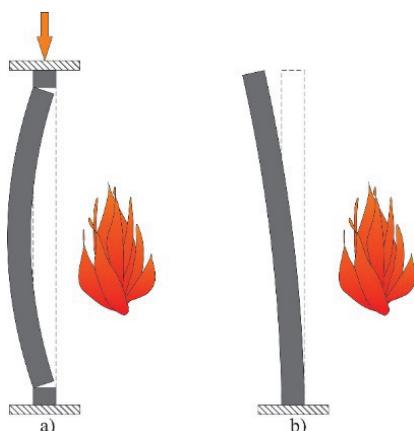


Figura 5. a) Inclinación térmica típica de muros de carga y b) de separación

o cercanas a la fase de evaporación del agua, y su duración depende de la cantidad y el tiempo en el que ocurre una evaporación total (Ruvalcaba *et al.*, 2010).

El mecanismo de transferencia de calor que ocurre en las piezas se crea principalmente por radiación y convección para piezas huecas (Nguyen y Meftah, 2012), y por conducción para piezas sólidas. Donde la conducción ocurre en las particiones sólidas, la convección y radiación en las caras externas, y solo la radiación dentro de las cavidades. De esta manera, en piezas huecas la transferencia de la cara expuesta a la no expuesta es más rápida que en las piezas sólidas (Nguyen *et al.*, 2009).

En el diseño de estos elementos se revisan las combinaciones REI, pero en estudios previos se observa que el criterio más crítico es I (aislamiento) despreciando del tipo o espesor de los especímenes (Andreini y Sasso, 2011) que es favorecido por el contenido de agua en las piezas. Respecto a cuál falla primero, si el mortero o la pieza, dependerá del que tenga un menor aislamiento. La inestabilidad se alcanza únicamente por el desplazamiento horizontal ocasionado por la inclinación térmica (N. and R., 1990) que se mitiga por la imposición de carga que reduce ese desplazamiento (Nadjai *et al.*, 2003a).

Las fallas por grietas o el colapso de las unidades de mampostería no son comunes y pueden despreciarse, como regla general, en un índice de la resistencia al fuego en muros de mampostería (Allen y Hamarthy, 1972). El mecanismo de falla estructural más crítico se refiere al desconchamiento de los elementos, que ocurre cuando la presión de poro y los esfuerzos térmicos exceden la resistencia de tensión del material (Al-Sibahy y Edwards, 2013), ocurriendo principalmente en la cara expuesta al fuego (Nguyen *et al.*, 2010). Se ha propuesto el uso de fibras para mitigar este problema y aumentar la capacidad de incidencia de la temperatura (Matesová *et al.*, 2006). El problema principal es la pérdida de material, que en muros se refiere al espesor del muro, por lo tanto, ocurren excentricidades de carga que se suman a la inclinación térmica.

Debido a que la mampostería se utiliza como elemento de protección, se obtuvieron varios parámetros de evaluación para determinar la resistencia residual dependiente de la temperatura y tiempos de exposición con pruebas de ultrasonido radiológicas (Li *et al.*, 2010), así como del cambio en la coloración de los materiales (Hager, 2011). La resistencia residual también se afecta por la tasa de calentamiento y enfriamiento, material y tipos de agregados (Russo y Sciarretta, 2012).

El desarrollo de la investigación de la mampostería recientemente tiene herramientas computaciona-

les como el *Método del Elemento Finito* (MEF), que a través de los métodos experimentales ha logrado alimentar los modelos analíticos en cuanto al comportamiento de las propiedades físicas de los materiales dependientes del tiempo.

El módulo elástico de los materiales muestra un debilitamiento general que se traduce como pérdida de rigidez (Ruvalcaba *et al.*, 2010) y por lo tanto, se deriva en un mecanismo de daño principalmente para los materiales a base de cemento, no así para el caso de piezas de arcilla que reportan un incremento de rigidez según estudios recientes (Nguyen *et al.*, 2009).

La resistencia a la compresión se reduce con el aumento de la temperatura para los componentes a base de cemento después de los 500°C (Arioz, 2007), aunque en las arcillas hay un aumento súbito de la resistencia antes de esta temperatura presenta una reducción acelerada después los 500°C. En cuanto al comportamiento de las curvas de esfuerzo deformación, las deformaciones máximas aumentan con la temperatura, no así con las arcillas que muestran lo contrario (Russo y Sciazzetta, 2013).

EJEMPLO DE APLICACIÓN EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE MAMPOTERÍA A ELEVADAS TEMPERATURAS

Se realizó un programa experimental para investigar las propiedades de muretes de mampostería, enfocándose en la reducción de la resistencia a la compresión y al comportamiento térmico a 20°C, 200°C, 400°C, 600°C, 700°C y 800°C. La investigación se realizó con base en códigos europeos.

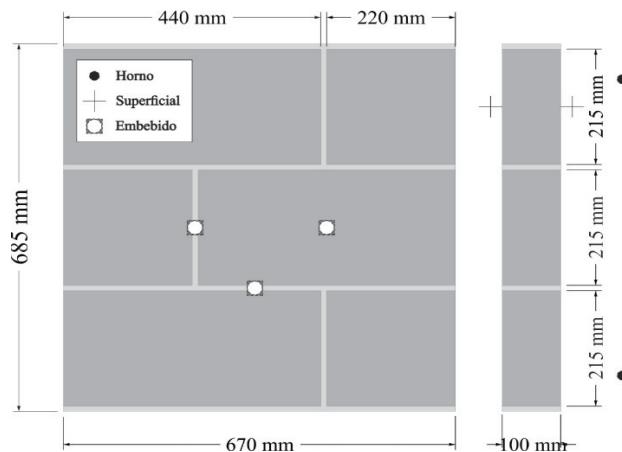


Figura 6. Geometría de muretes y posición de termopares (Ruvalcaba, 2011)

MATERIALES

Para la conformación de los morteros empleados se siguieron los lineamientos de la BS 12 (BSI, 1996) y BS EN 197-1 (BSI, 2011) para el cemento; asimismo para la cal, BS EN 459-1 (BSI, 2010) con una cal hidratada (CL-90); y para la arena natural la BS 882 (BSI, 1992). En la preparación del mortero la mezcla de cemento, cal hidratada y arena, tuvo una proporción de 1:1:5 por volumen y una proporción de agua/cemento de 1.7 (BSI, 1999; BSI, 2005), donde esta es una proporción común en la construcción de muros de bloques de concreto.

Las piezas de bloques se mostraron sólidas y conformadas por concreto ligero y con resistencia nominal de 74 kg/cm², con dimensiones 440x215x100mm, siguiendo el estándar BS EN 771-3 (BSI, 2003).

ESPECÍMENES

En el aspecto geométrico cada uno de los muretes constaba de tres líneas que contenían uno y medios bloques con juntas de morteros verticales y horizontales de 10 mm siguiendo la norma BS 1052 (BSI, 1999). Se colocaron termopares tipo K embebidos en bloques y morteros, así como termopares superficiales, tal como se muestra en la figura 6.

EQUIPO

Se construyó un equipo de prueba formado por un marco de carga, un sistema de medición (LVDT) y un horno eléctrico rectangular DaVinci de tres paneles



Figura 7. Equipo de prueba de carga y temperatura (marco, celda y horno), (Ruvalcaba, 2011)

con capacidades hasta los 1100°C y velocidad de 10°C/min. Las temperaturas, fuerzas y deformaciones se midieron utilizando un adquisidor de datos. Para el sistema de carga se utilizó un gato hidráulico de 10 ton sujeto a un marco de carga de acero y una celda de carga para lectura.

DESARROLLO DE LA PRUEBA EXPERIMENTAL

Los muretes probados siguieron las condiciones establecidas en la BS 772-1 (BSI, 2000) para las pruebas de compresión donde se establece una velocidad de carga de 10 kN/min que se alcanzó en esta investigación. Los especímenes se colocaron dentro del horno, una vez calibrados todos los sistemas del equipo de prueba se procedió a calentarlos hasta la temperatura indicada, por ejemplo a 200°C, aplicándose una velocidad de carga de 600°C/hora.

Al lograrse el equilibrio térmico dentro del horno, se procedió a aplicar cargas de compresión vertical hasta lograr la falla a velocidad de carga específica. Cargas de falla y deformaciones verticales se registraron con los equipos.

De forma similar a lo que se desarrolló en los muretes, el programa experimental incluyó la caracterización de los bloques de concreto empleados en los muretes, así como algunas pruebas en especímenes de mortero. Más detalles del programa experimental se pueden observar en Ruvalcaba (2011).

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los resultados se dividen en dos partes, resultados térmicos que involucran el desarrollo de la temperatura interna de los especímenes; y una fase estructural que

muestra el comportamiento de la resistencia a la compresión de los muretes.

RESULTADOS TÉRMICOS

Los resultados de tres muretes para cada rango de temperatura se resumen en las curvas resultantes de temperatura de los termopares embebidos en los bloques, donde se consideran como el punto más importante que ofrece el mejor indicativo de las temperaturas dentro de los muretes.

Se puede apreciar en la figura 8 que todas las curvas se interrumpen por períodos de mesetas, estas se asocian a la energía de absorción por cambio de fase (líquido que se transforma en vapor) que ocurrió alrededor de los 100°C; y su duración perdura hasta el punto de evaporación total del agua contenida.

La duración para lograr el equilibrio térmico en cada grupo de temperatura varió significativamente, en el caso de los bloques calentados a 200°C, se logró un mayor tiempo en comparación con los especímenes a mayor temperatura. Se asume que para los muretes de 200°C hubo una pérdida importante de calor debido al procedimiento aplicado de aislamiento.

RESULTADOS ESTRUCTURALES

Los resultados de las pruebas de compresión de los muretes sometidos al régimen de estado estable para cada rango, se resumen en una relación de esfuerzo deformación de los muretes para todos los grupos de temperatura. Donde se observa que las curvas de los especímenes probados a los 20°C y 200°C presentan una diferencia menor, la cual es prácticamente inexistente hasta los 1.5 N/mm². De acuerdo con estos resultados,

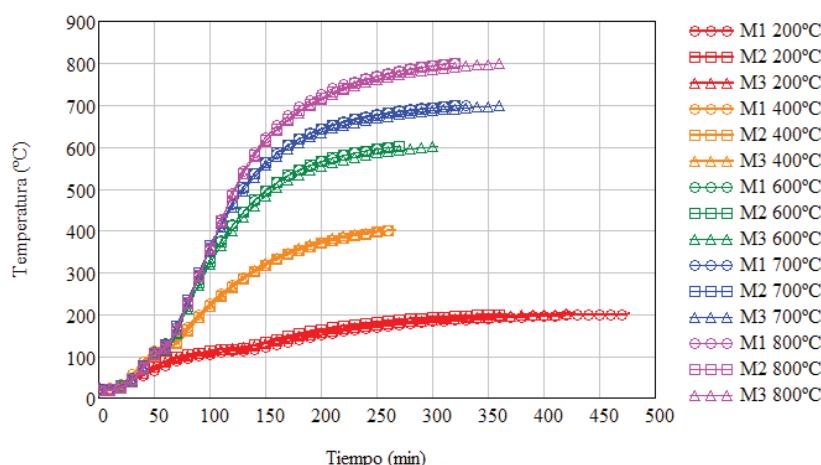


Figura 8. Evolución de la temperatura interna de los muretes de mampostería

se pueden integrar tres grupos: el primero en las pruebas hasta los 200°C, donde la resistencia se reduce mínimamente; el segundo grupo contiene los rangos de 200°C a 600°C, en los cuales existe una reducción de resistencia moderada; y finalmente el grupo entre los 600°C a 800°C, en donde los esfuerzos resistentes tuvieron una decremento mayor (figura 9).

La reducción de la resistencia presenta un decremento de 3% a los 200°C; en 400°C en el orden de 9%; seguido de 19% a los 600°C; y una caída intensa a 60% a los 700°C y 83% a los 800°C. Las pruebas también mostraron que los desplazamientos verticales se incrementaron con la temperatura obteniendo 27.6 mm a los 800°C.

En cuanto al módulo de elasticidad se observó un decremento de 33% a los 200°C comparado con el módulo obtenido en temperatura ambiente; 40% para los 400°C; 65% a los 600°C; a los 700°C el módulo elástico mostró solo el 11% del módulo original; y la prueba de los 800°C obtuvo una reducción de hasta 98% del original. Los especímenes comenzaron a presentar daño por temperatura desde los 400°C, mostrando el desprendimiento de algunas partículas de los agregados empleados para la fabricación de los bloques, este fenómeno llamado desconchamiento (spalling) propició aparición de grietas y aberturas rápidamente.

A partir de los 600°C el desconchamiento fue más severo, caracterizándose por la ruptura de las caras de los muretes donde se atribuye principalmente a los esfuerzos tensores transversales. En los 700°C la falla se mostró por una combinación de diferentes factores como cortante en un plano inclinado a través de los bloques, además de un daño severo por el desconchamiento causante de múltiples grietas y aberturas, los cuales indujeron a la falla; observándose por último expansiones térmicas importantes. En el rango de los 800°C se

observó una degradación notoria de los materiales mostrando claramente una curvatura vertical lateral, que se acompañó de una falla típica de cortante a lo largo del plano inclinado a través de los bloques, el desconchamiento fue notoriamente masivo.

CONCLUSIONES

La Ingeniería Estructural de Fuego revela la importancia de considerar los efectos de la degradación de los materiales ante la acción de altas temperaturas. Esta rama se basa en las pruebas estándares de resistencia a altas temperaturas con el fin de obtener valores específicos de resistencia y comportamientos no lineales de los sistemas estructurales. Las pruebas de resistencia realizadas a los muretes permitieron obtener valores específicos que tienen que tomarse en cuenta al momento de diseñar elementos estructurales como muros de mampostería de concreto ligero cuando un evento de incendio no controlado se presente en la vida útil de la edificación, de esta investigación se puede concluir que:

1. Los muretes de mampostería experimentaron una reducción en la resistencia a compresión entre 9% a 83% para los rangos de 400°C a 800°C.
2. En el comportamiento de la relación del esfuerzo deformación se observó una degradación del módulo elástico entre 33% a 98% en el rango de 200°C a 800°C.
3. Las fallas principales en los especímenes a temperatura ambiente fueron una combinación de cortante cónico y grandes grietas horizontales.
4. Los especímenes calentados y probados sobre los 200°C se caracterizaron por fallas de agrietamiento diagonal.

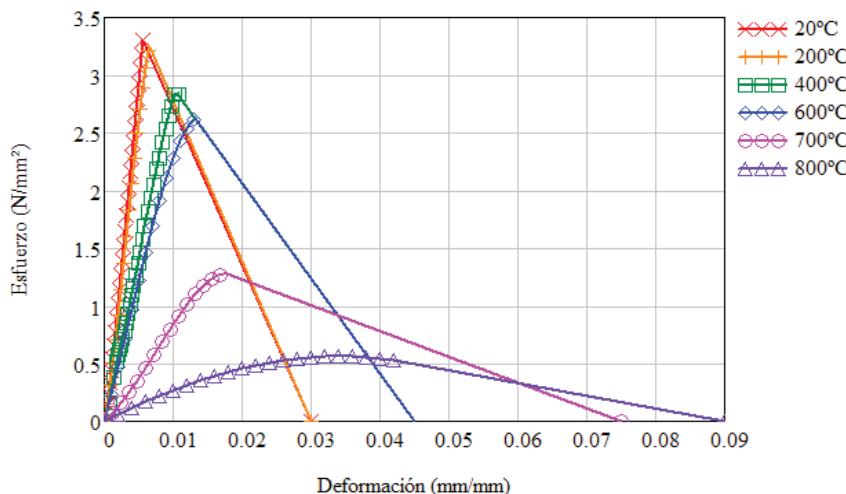


Figura 9. Relación promedio de esfuerzo-deformación en compresión de muretes

5. Se presentaron fenómenos como el desconchamiento moderadamente explosivo en muretes expuestos por encima de los 400°C, así como expansiones crecientes con la temperatura.

Es importante destacar las diferencias de comportamiento que pueden existir debido a la regionalización de los materiales, así como de los costos y la complejidad de hacer pruebas experimentales a mediana y grande escala de los sistemas estructurales. Por ello, se proponen estudios de comportamiento experimental de los materiales de la construcción nacionales para obtener parámetros que se apliquen a modelos analíticos y con ellos predecir el comportamiento de toda la estructura.

El resultado más importante de la aplicación de las pruebas de resistencia y comportamiento de los materiales sometidos a altas temperaturas es proveer herramientas de diseño y criterio para los ingenieros proyectistas y agregar una acción de diseño que brindará seguridad, protección y control en la probabilidad de la ocurrencia de un incendio en las edificaciones nacionales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de Manchester por las pruebas realizadas y el apoyo, así como a la Facultad de Ingeniería Civil-UANL por las facilidades otorgadas. También reconocen el apoyo a través de los proyectos: "PROMEP 103.5/13/8942", "PAIFIC/2015-1" y "PAICYT 2015-IT528-15".

REFERENCIAS

- Abrams M.S. Behavior of inorganic materials in fire, en: S.E.E. y Hamarthy T.Z. *Design of buildings for fire safety*, ASTM STP 685, 1979, pp. 14-73.
- Al-Sibahy A. y Edwards R. Behaviour of masonry wallets made from a new concrete formulation under combination of axial compression load and heat exposure: Experimental approach. *Engineering Structures*, volumen 48 (número 0), marzo 2013:193-204.
- Allen L.W. y Hamarthy T.Z. Fire endurence of selected concrete masonry walls. *ACI Journal Proceedings*, volumen 69 (número 9), septiembre 1, 1972: 562-568.
- Andreini M. y Sassu M. Mechanical behaviour of full unit masonry panels under fire action. *Fire Safety Journal*, octubre, volumen 46 (número 7), 2011: 440-450.
- Arioz O. Effects of elevated temperatures on properties of concrete. *Fire Safety Journal*, volumen 42 (número 8), noviembre 2007: 516-522.
- ASTM. Standard test methods for fire tests of building construction and materials, en: *Fire-resistance fo building materials and elements*. PA, USA: ASTM International, 2000, vol. E119-00a, p. 21.
- ASTM. Standard test methods for fire tests of building construction and materials, en: *Fire-resistance fo building materials and elements*. PA, USA, ASTM International, 2014, vol. ASTM E-119-14.
- Bailey C.G. One stop shop in structural fire engineering, en: Manchester, UK: University of Manchester, 2004.
- Beyler C., Beitel J., Iwankiw N., Lattimer B., et al. *Fire resistance testing for performance-based fire design of buildings*, Quincy, USA, N.F.P., association, 2007.
- Bre. The integrity of compartmentation in buildings during fire, UK, B.R.E. LTD, 2005, 213140 (1).
- BSI. Specification for aggregates from natural souces for concrete, en: Londres, BSI, 1992, vol. BS 882:1992, p. 14.
- BSI. Specification for Portland cement, en: Londres, BSI, 1996, vol. BS 12:1996, p. 16.
- BSI. Methods of test for masonry. Determination of compressive strenght, en: Londres: BSI, 1999, vol. BS EN 1052-1:1999, p. 12.
- BSI. Methods of test for masonry units. Determination of compressive strenght, en: Londres, BSI, 2000, vol. BS EN 772-1:2000, p. 14.
- BSI. Specification for masonry units. Aggregate concrete masonry units (dense and ligh-weight aggregates),en: Londres, BSI, 2003, vol. BS EN 771-3:2003, p. 42.
- BSI. Design of masonry structures-Part 1-2: General rules-Structural fire design, en: Eurocode 6 UK, British Standars Institution, 2005, vol. BS EN 1996-1-2:2005, p. 81.
- BSI. Building lime. Definitions, specifications and conformity criteria, en: Londres, BSI, 2010, vol. BS EN 459-1:2010, p. 52.
- BSI. Cement. Composition, specifications and conformity criteria for common cements, en: Londres, BSI, 2011, vol. BS EN 197-1:2011, p. 50.
- CEN. Fire resistance test-Part 1, general requierements, en: Bruselas, Belgica, European Committee for Standardization, 1999, vol. EN 1363-1.
- CEN. Action on structures-Part 1-2, actions on structures exposed to fire, en: Eurocode 1. Bruselas, Belgica, CEN, 2002, vol. EN 1991-1-2.
- Denoël J.F. *Fire safety and concrete structures*, translated by ECP, F.O.T.B.C.I. (FEBELCEM), Belgica,de Bouwkroniek, 2007, 87 p. ISBN 2-9600430-3-0.
- Fitzgerald R.W. *Building fire performance analysis*, West Sussex, Inglaterra, John Wiley & Sons, Ltd, 2004, 513 p. ISBN 0-470-8326-9.
- Hager I. Colour change of heated concrete-RGB colour histogram analysisi as a method for fire damage assessment of concrete, en: C.T.U.I. PRAGE, *Application of Structural Fire Engineering*, Praga, Czech Republic. COST, 2011, p. 103-108.
- Harmathy T.Z., sultan M.A., Maclaurin J.W. Comparison of severity of exposure in ASTM E 119 and ISO 834 Fire Resistance

- Tests. *Testing and Evaluation*, volumen 15 (número 6), noviembre 1987: 371-375.
- Hendry E.A.W. Masonry walls, materials and construction. *Construction and Building Materials*, volumen 15 (número 8), diciembre 2001: 323-330.
- ISO. Elements of building construction-Part 1: General requirements, en: *Fire-resistance tests*, Genova, International Organization for Standardization, 1999, vol. ISO 834-1:1999, p. 25.
- ISTRUCTE. *Guide to the advanced fire safety engineering of structures*, Londres, UK, The Institution of Structural Engineers, 2007. ISBN 978-0-901297-46-4.
- Kirby B.R. *The behaviour of a multi-storey steel framed building subjected to fire attack*, UK, 1998.
- Lamont S., lane B., Flint G., Usmani A. Behavior of structures in fire and real design-A case study. *Journal of Fire Protection Engineering*, volumen 16 (número 1), 2006. 5-35.
- Li M., Wu Z., Kao H., Qian C. Evaluation of the fire-exposed temperature of concrete. *Magazine of Concrete Research [Type of Work]*, volumen 62, 2010: 617-624. Disponible en: <http://www.icevirtuallibrary.com/content/article/10.1680/macr.9.00094>. ISSN 1751-763X.
- Lin Y.S. Estimations of the probability of fire occurrences in buildings. *Fire Safety Journal*, volumen 40 (número 8), noviembre 2005: 728-735.
- Matesová D., Bonen D., Shah S. Factors affecting the resistance of cementitious materials at high temperatures and medium[0] heating rates. *Materials and Structures*, volumen 39 (número 4), mayo 2006: 455-469.
- N.G. y L.R. Performance of masonry walls exposed to fire, en: Urbana Champaign, USA, Universidad de Illinois, 1990, pp. 901-914.
- Nadjai A., O'gara M., Ali F., Jurgen R. Compartment masonry walls in fire situations. *Fire Technology*, volumen 42 (número 3), julio 2016: 211-231.
- Nadjai A., O'gara M., Ali F.A., Laverty D. A numerical model for the behaviour of masonry under elevated temperatures. *Fire and Materials*, volumen 27 (número 4), 2003a: 163-182.
- Nadjai A., O'gara M., Ali F. Finite element modelling of compartment masonry walls in fire. *Computers & Structures*, volumen 81 (números 18-19), agosto 2003b: 1923-1930.
- Nguyen T.D. y Meftah F. Behavior of clay hollow-brick masonry walls during fire. Part 1: Experimental analysis. *Fire Safety Journal*, volumen 52 (número 0), agosto 2012: 55-64.
- Nguyen T.D., Meftah F., Chammas R., Mebarki A. The behaviour of masonry walls subjected to fire: Modelling and parametrical studies in the case of hollow burnt-clay bricks. *Fire Safety Journal*, volumen 44 (número 4), mayo 2009: 629-641.
- Nguyen T.D., Meftah F., Mebarki A., Dupont O. The spalling of masonry walls in fire situation: Experimental analysis and numerical modelling, en: *International Masonry Conference*. Dresden, International masonry Society, 2010.
- ONNCCE. Resistencia al fuego de elementos y componentes espeficaciones y métodos de ensayo, en: *Industria de la construcción-Edificaciones*. México, Diario Oficial de la Federación, 2009, vol. NMX-C-307/1-ONNCCE-2009.
- Porcari G.L.F., Zalok E., Mekky W. Fire induced progressive collapse of steel building structures: A review of the mechanisms. *Engineering Structures*, volumen 82 (número 0), enero 2015: 261-267.
- Purkiss J.A. *Fire safety engineering: design of structures*, Oxford, Gran Bretaña, Butterworth-Heinemann/Elsevier, 2007, 389 p. ISBN 978-0-7506-6443-1.
- Quintiere J.G., DI-Marzo M., Becker R. A suggested cause of the fire-induced collapse of the World Trade Towers. *Fire Safety Journal*, volumen 37 (número 7), octubre 2002: 707-716.
- Russo S. y Sciarretta F. Experimental and theoretical investigation on masonry after high temperature exposure. *Experimental Mechanics*, volumen 52 (número 4), abril 2012: 341-359.
- Russo S. y Sciarretta F. Masonry exposed to high temperatures: Mechanical behaviour and properties-An overview. *Fire Safety Journal*, volumen 55 (número 0), 2013: 69-86.
- Ruvalcaba F. *Mechanical properties and structural behaviour of masonry at elevated temperatures* (Phd thesis), The University of Manchester, Reino Unido, 2011.
- Ruvalcaba F., Bailey G.C., Bell A.J. Compressive strength of concrete block masonry at elevated tempertures, en: International Masonry Conference Dresden, International Masonry Society, 2010.
- Watts J. JR. Editorial, Engineering Paradigms for Fire Safety. *Fire Technology*, volumen 35 (número 2), mayo 1999.
- Zhang J., Lu S., Li Q., Yuen R.K.K., et al. Smoke filling in closed compartments with elevated fire sources. *Fire Safety Journal*, volumen 54 (número 0), 2012: 14-23.

Citación sugerida:

Citación estilo Chicago

Ruvalcaba-Ayala, Fabián René, Mario Covarrubias-Navarro. La Ingeniería Estructural de Fuego un enfoque nacional y ejemplo de aplicación. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XVIII, 03 (2017): 253-264.

Citación estilo ISO 690

Ruvalcaba-Ayala F.R., Covarrubias-Navarro M. La Ingeniería Estructural de Fuego un enfoque nacional y ejemplo de aplicación. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, volumen XVIII (número 3), julio-septiembre 2017: 253-264.

SEMLANZAS DE LOS AUTORES

Fabián René Ruvalcaba-Ayala. Egresado del Instituto Tecnológico de Tepic (1995). Obtuvo el grado de maestro en ciencias con especialidad en estructuras en la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura SEPI-ESIA, Unidad Adolfo López Mateos del Instituto Politécnico Nacional (2005). Obtuvo el grado de doctor en ingeniería por The University of Manchester, Reino Unido (2011). Sus líneas de investigación incluyen el comportamiento de estructuras a altas temperaturas, modelado basado en la técnica del elemento finito, así como en el estudio de estructuras de mampostería.

Mario Covarrubias-Navarro. Es egresado de la Universidad Autónoma de Baja California con licenciatura en ingeniería civil (2010). Obtuvo el grado de maestro en ciencias por el Tecnológico de Monterrey (2013), es candidato al grado de doctorado en la Universidad Autónoma de Nuevo León, su área de especialidad es la ingeniería estructural, con un enfoque en el comportamiento de la mampostería a altas temperaturas.