

## 1. INTRODUCCIÓN

El estudio del comportamiento de las estructuras de fábrica sometidas a altas temperaturas requiere del conocimiento de la variación de las propiedades térmicas y mecánicas de los materiales que las conforman con la temperatura. La influencia de la temperatura con el calor específico o la conductividad térmica es decisiva a la hora de determinar los perfiles de temperatura en una estructura de fábrica.

Las estructuras de fábrica están formadas principalmente por partes sólidas y huecas. En las partes sólidas la transmisión de calor se realiza por conducción, mientras que en sus cavidades la transmisión de calor se hace por radiación y por convección. Ese proceso de transmisión de calor a través de un material, que lleva consigo la variación de las propiedades térmicas en función de la temperatura, está directamente relacionado con la capacidad portante del elemento de fábrica tanto cuando está sometido a carga de servicio como cuando el elemento llega a fracturarse (por estar sometido a carga de rotura). En ambos casos, siempre en presencia de altas temperaturas, el comportamiento mecánico de un elemento es el reflejo de la relación entre su respuesta o deformación ante una fuerza o carga aplicada.

Las altas temperaturas afectan de manera decisiva a las estructuras de fábrica cerámica, si bien los elementos cerámicos sufren un proceso de cocción a elevadas temperaturas durante su fabricación, y por tanto, no se ven afectados de forma directa, el mortero que las acompaña sufre retracciones en los primeros escalones térmicos, que afectarán a la globalidad del elemento haciendo variar la dilatación térmica  $\alpha(T)$  del mismo.

El módulo de elasticidad o Módulo de Young (E) mide la rigidez del material y es una constante independiente del esfuerzo siempre que no exceda de un valor máximo denominado *límite elástico*. Sin embargo, en tanto en cuanto la rigidez de un material varía drásticamente con la temperatura, es de esperar que el módulo de Young refleje esta variación  $E(T)$ , aspecto que ha sido analizado en profundidad.

Cuando una estructura de fábrica se ve afectada por las altas temperaturas durante un incendio, su capacidad resistente disminuye, mientras que la

acción térmica y la acción mecánica son concomitantes. De la misma manera, cuando la acción térmica ha concluido y el incendio ha sido extinguido, la pérdida de resistencia de la fábrica difiere de la que pudiera darse mientras el elemento está sometido a altas temperaturas.

Aunque la normativa nacional e internacional que se refiere al cálculo de la resistencia de las estructuras de fábrica en situación de incendio es reducida, los métodos de cálculo existentes adolecen de la falta de conocimiento, tanto de propiedades térmicas de los materiales que conforman la fábrica cerámica que varían en función de la temperatura como de la relación entre la temperatura ambiente y las temperaturas alcanzadas en el elemento durante un incendio.

Los modelos para la evaluación de las estructuras de fábrica sometidas a la acción de fuego existentes son escasos, principalmente por lo complejo de suponer el comportamiento de estructuras heterogéneas de las que generalmente se desconocen una gran cantidad de parámetros tales como: la variación de las propiedades térmicas y mecánicas de la pieza y el mortero en función de la temperatura, el comportamiento de la capacidad resistente de elementos de fábrica en función de la temperatura, etc. El modelo que se propone en esta publicación considera algunos de estos factores con objeto de caracterizar, a través de resultados experimentales, la respuesta de una estructura de fábrica afectada por las altas temperaturas.

La investigación desarrollada en el presente trabajo introduce aspectos no determinados anteriormente que se deben tener en cuenta en el comportamiento resistente de las estructuras de fábrica sometidas a la acción del fuego, actualmente de gran importancia tanto por el creciente auge de la rehabilitación y mantenimiento o recuperación de estructuras existentes como por la necesidad de realizar inspecciones de edificios, su evaluación y mantenimiento.

Aunque anteriormente en diversos documentos se ha relatado el estado del conocimiento relativo al tema en algunos aspectos como la variación de las propiedades térmicas de los elementos que con-

forman la fábrica en función de la temperatura, los mecanismos en los que se basa el fenómeno de la transferencia de calor particularizados a las estructuras de fábrica (Maciá, M. E. y Camacho, J., 2015) o los estudios experimentales de la variación de la dilatación térmica o el módulo de elasticidad de esas estructuras sometidas a altas temperaturas (Maciá, M. E. y Rolando, A. 2013), en este trabajo se presentan los siguientes aspectos fundamentales que pueden dar lugar a la compresión completa de la cuestión:

- Las principales técnicas de diagnóstico que pueden servir para valorar los efectos de la acción térmica en estos elementos.
- Los métodos de evaluación de la resistencia a compresión de las estructuras de fábrica.
- Los ensayos aceptados por la normativa existente.
- Las reglamentaciones a nivel nacional e internacional que obligan al cumplimiento del requisito básico de seguridad en caso de incendio.
- Una propuesta de modelo aproximado para el cálculo de la resistencia a compresión de elementos de fábrica sometidos a altas temperaturas habilitando el método simplificado de cálculo establecido en la UNE-EN 1996-1-2:2011.

Parece necesario arrojar luz sobre esta temática tan amplia como interesante facilitando a su vez diversas líneas de investigación que pueden ayudar a otros autores o investigadores.

Los temas tratados tienen una relevancia científica importante dentro del campo de las estructuras de fábrica sometidas a la acción del fuego, como lo demuestra la escasez de documentos relativos al objeto de estudio del trabajo, así como la pequeña participación española en el subcomité SC6 del Eurocódigo 1996-1-2 del Comité de Eurocódigos Estructurales AEN / CTN 140 perteneciente al Ministerio de Fomento.

Los objetivos principales del presente trabajo se pueden concretar en los siguientes puntos:

1. Proporcionar documentalmente un exhaustivo estudio sobre el estado del conocimiento de los planteamientos relacionados con el comportamiento estructural de los elementos de fábrica y las altas temperaturas.

Con este objetivo se pretende suministrar toda la información de la que se dispone acerca de las téc-

nicas de diagnóstico empleadas para valorar las pérdidas de resistencia de la fábrica sometida a la acción del fuego y sus posibles reparaciones, los métodos de evaluación de la resistencia a compresión de una estructura de fábrica a través de modelos numéricos, los resultados experimentales existentes acerca de esta temática y los métodos de cálculo y tablas de datos sancionados por los códigos y normativas.

La información que se posee acerca del comportamiento de las fábricas de ladrillo frente al fuego es mucho menor que la que se tiene sobre el comportamiento de otros materiales estructurales como el hormigón, el acero o la madera, lo cual tampoco es de extrañar si tenemos en cuenta que en el proceso de fabricación de algunos ladrillos se manejan temperaturas bastante elevadas. Toda fábrica de ladrillo se dilata y se contrae por variaciones de temperatura, afectando tanto a fábricas modernas como antiguas, con la diferencia que las fábricas antiguas «ceden» al ser el mortero menos rígido.

Los datos publicados relativos al diagnóstico y reparación de estructuras dañadas por el fuego son bastante escasos. En este trabajo se señalan las principales técnicas de diagnóstico empleadas para analizar estructuras dañadas por la acción del fuego. También se describen cronológicamente los ensayos realizados a elementos de fábrica similares a los realizados en investigaciones previas de la autora. Además, existen modelos para caracterizar la resistencia a altas temperaturas de elementos de fábrica sometidos a compresión. Tanto los ensayos como los modelos que se pueden validar mediante los resultados experimentales servirán para poder desarrollar métodos de cálculo y tablas de especificaciones que podrán ayudar en la evolución de la normativa de seguridad en caso de incendio.

En este trabajo se presenta un repaso al estado del arte referente a las formas de cálculo existentes para evaluar el comportamiento de la fábrica. En una primera aproximación se citan las formas de modelización relativas al comportamiento de las estructuras de fábrica en condiciones de temperatura ambiente para posteriormente concretar las líneas actuales sobre cómo abordar el problema de las altas temperaturas sobre este tipo de elementos.

Respecto al estudio del comportamiento de las estructuras de fábrica bajo solicitaciones mecánicas, muchos son los autores que han desarrollado modelos relativos al comportamiento de las estructuras de fábrica en condiciones de temperatura ambiente.

Las estructuras de fábrica presentan direccionalidad en sus propiedades debido a que las juntas del mortero actúan como planos de debilidad en el

material. En general, la aproximación hacia una modelización numérica puede ser enfocada con micromodelos, los cuales discretizan de forma detallada y separada ladrillos y juntas. Estos micromodelos tienen su campo de aplicación en el estudio de comportamiento local de detalles estructurales de muros de fábrica, así como el estudio del comportamiento real de la interfase. Este tipo de discontinuidades generalmente son determinantes en el comportamiento global de las estructuras de muros de fábrica. Por otra parte, existe la posibilidad de hacer un tratamiento como macromodelo donde se tratan las estructuras de fábrica como materiales compuestos.

Los macromodelos son aplicables cuando la estructura está compuesta por muros sólidos con dimensiones lo suficientemente grandes que hacen que las tensiones a través y a lo largo de los elementos sean esencialmente uniformes. Evidentemente, la macromodelización es mucho más práctica debido al reducido tiempo y memoria requerida computacionalmente hablando, así como mayor facilidad de generación de malla. Este tipo de modelización tiene mayor valor cuando el compromiso entre precisión y eficiencia es necesario. Dependiendo del nivel de detalle deseado es posible utilizar diferentes formas de modelización.

Con el fin de dar cumplimiento a las exigencias de resistencia al fuego de las estructuras de fábrica, es necesario conocer que, además de las tablas de especificaciones de carácter totalmente prescriptivo, existen métodos de cálculo habilitados para garantizar el cumplimiento prestacional de la exigencia.

En el caso de los métodos de cálculo generales, la resistencia al fuego de muros de fábrica se puede comprobar mediante cálculo teniendo en cuenta el modo de rotura correspondiente a la exposición a fuego, las propiedades del material dependientes de la temperatura, la esbeltez y los efectos de las dilataciones y deformaciones térmicas.

Los métodos simplificados de cálculo pretenden determinar la capacidad portante última de una sección recta de un elemento de fábrica (se desprecian las acciones indirectas debidas al fuego tales como dilataciones, deformaciones, etc.), teniendo en cuenta las distribuciones de temperatura preestablecidas y, considerando variaciones en las propiedades de los materiales por efecto de la temperatura. Son modelos simplificados y sencillos.

En la literatura se establecen dos tipos de métodos de cálculo simplificado:

a) El más sencillo de ellos es el *método del espesor equivalente*.

b) El segundo método es el *método de cálculo simplificado por excelencia* (UNE-EN 1996-1-2:2011).

Para poder utilizar esta formulación es necesario determinar  $c$  (es un factor de reducción de la capacidad de carga debido a las excentricidades y se calcula en el centro del muro).

En este trabajo también se aporta información relativa a los códigos y normativas de ámbito nacional e internacional de aplicación a este tipo de estructuras sometidas a la acción del fuego.

Se realiza un repaso de las Normas Básicas de la Edificación y el Código técnico de la Edificación como principales reglamentaciones españolas y se aportan los datos necesarios para la comprensión del tema a partir de la normativa internacional: *The Building Regulations. England y Wales*, 2020. Fire Safety (BR), *The Building Code of Australia*, 2019. Fire Resistance of Building Elements (BCA), *The International Conference of Building Officials*, 2018 (ICBO), *The International Building Code*, 2018 (IBC), *Technical Notes on Brick Construction* (BIA) y la Norma UNE-EN 1996-1-2:2011.

2. Ajustar una fórmula de evaluación de la resistencia a compresión de elementos de fábrica sometidas a altas temperaturas.

Con relación al modelo de evaluación la resistencia a compresión de una estructura de fábrica sometida a altas temperaturas, en la actualidad los métodos de cálculo existentes no consideran la variación de las características de los materiales que conforman la fábrica en función de la temperatura.

Se trata de habilitar el método de cálculo simplificado establecido por la UNE-EN 1996-1-2:2011 a través de la obtención de un coeficiente de minoración que relaciona la resistencia a compresión de una estructura de fábrica a temperatura ambiente con la resistencia a compresión del mismo elemento a altas temperaturas.

A partir de los ensayos realizados en otras investigaciones de la autora, ha sido posible obtener datos experimentales que permiten el empleo del método simplificado en estructuras de fábrica cerámica a través de una fórmula de fácil uso. Se ha tratado de establecer una expresión matemática mediante ajuste experimental para el cálculo de los elementos de fábrica sometidos a altas temperaturas a partir de la formulación existente para el cálculo de la resistencia característica a compresión fijada en diversas formulaciones desde principios del siglo xx hasta nuestros días.

Por lo tanto, la expresión propuesta en este trabajo resulta novedosa en cuanto que incluye la influencia del deterioro del mortero con respecto a la temperatura, aspecto imprescindible para abordar con éxito la evaluación de una estructura de fábrica dañada por el fuego.

**3.** Aportar criterios globales y consideraciones para el análisis del comportamiento de las estructuras de fábrica sometidas a altas temperaturas.

A lo largo del desarrollo de este trabajo se han obtenido conclusiones que pueden considerarse de

utilidad dentro del área del comportamiento resistente de las estructuras de fábrica y, concretamente, dentro del ámbito de evaluación de aquellas estructuras de fábrica que hayan sido sometidas a altas temperaturas, afectando, por tanto, al deterioro de los principales materiales que garantizan el comportamiento portante de estas estructuras.

Se aportan consideraciones relativas al estado del conocimiento y la modelización, así como líneas de investigación abiertas para futuros investigadores que quieran desarrollar su labor investigadora en este campo.