Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Necesidades de mejoras en la seguridad contra incendios urbanos en México

Mexico's need for urban fire safety improvements

Velasco, L.[a]*, Guerrero, H.[a], Hospitaler, A.[b]

[a] Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, 04510, México.
[b] ICITECH, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, Valencia, 46022, España.
*lvelascoe@iingen.unam.mx; hguerrerob@iingen.unam.mx; ahospitaler@cst.upv.es

Innovación tecnológica: Mejoramiento de la protección contra incendios urbanos por medio del establecimiento de una normativa mexicana en la materia.

Área de aplicación industrial: Se señala la necesidad de desarrollar pruebas, procesos constructivos y sistemas de protección contra incendios urbanos en México.

Recibido: 19 julio 2023
Aceptado: 01 febrero 2024

Abstract

Fire engineering is a multidisciplinary field that requires structural engineering to ensure structural stability so that the evacuation of occupants and the performance of rescue and intervention teams are safe and to prevent the spread, inside and outside, of the fire, including to other buildings. Unfortunately, both the technical branches and the existing regulations in Mexico are lagging behind in terms of fire protection. Because of this, not only private structures, such as skyscrapers or historical buildings, could have safety deficiencies, but also regular buildings could be highly vulnerable against this type of event. In order to draw attention to this problem, this paper presents the regulatory, state-of-the-art and practical deficiencies that need to be addressed to achieve greater urban safety in Mexico. In addition, the most relevant features of structural fire engineering are mentioned, such as the study of the behavior of materials and elements at high temperatures, the effects of fire on the properties of steel and concrete, and performance-based design.

Keywords: Fire engineering; fire prevention and safety; fire resistance; reaction to fire.

Resumen

La ingeniería de fuego es un campo multidisciplinario que requiere de la ingeniería estructural para asegurar la estabilidad estructural de modo que la evacuación de los ocupantes y la actuación de los equipos de rescate e intervención sean seguros y se evite la propagación, interior y exterior, del incendio, incluyendo a otras edificaciones. Desafortunadamente, tanto las ramas técnicas como las normativas existentes en México presentan un notable rezago en materia de protección contra incendios. Debido a esto, no solo estructuras particulares, como los rascacielos o edificios históricos, podrían tener deficiencias de seguridad, sino también las edificaciones ordinarias podrían resultar altamente vulnerables contra este tipo de eventos. Buscando atraer la atención hacia este problema, el presente documento expone las deficiencias normativas, del estado del arte y de la práctica que deben ser solventadas para alcanzar una mayor seguridad contra incendios urbanos en México. Aspectos como las diferencias entre requerimientos de seguridad frente a fuego en México y en países desarrollados son abordadas. Adicionalmente se mencionan las características más relevantes de la ingeniería estructural de fuego como el estudio del comportamiento de materiales y elementos a altas temperaturas, las afectaciones que produce el fuego en las propiedades del acero y el concreto, y el diseño basado en desempeño.

Palabras clave: Ingeniería de fuego; prevención y seguridad contra incendios; reacción al fuego; resistencia al fuego.

1. Introducción

Los incendios urbanos son desastres que presentan la capacidad para dañar a la sociedad y generar secuelas físicas y psicológicas en las personas que los sufren. Por estas posibles afectaciones, muchos países alrededor del mundo han establecido reglamentos y normativas enfocados a garantizar un nivel de impacto mínimo en la seguridad contra eventuales incendios en sus edificaciones. Tales lineamientos abarcan aspectos muy diversos como el establecimiento de medidas de prevención (p. ej. planes de mantenimiento y de autoprotección, vías de evacuación, entre otros), de los estándares en elementos de seguridad (p. ej. número y características de señalizaciones, extintores, aspersores, etc.), y/o tiempos mínimos de resistencia al fuego requeridos para las estructuras y reacción al fuego de los materiales de construcción. Desafortunadamente, la laxitud de los lineamientos contra incendios urbanos en México provoca que su peligrosidad sea alarmantemente alta. A manera de ejemplo, recientemente han ocurrido en México incendios en hospitales[1], naves industriales[2], hoteles[3], edificios habitacionales[4], mercados[5], en instalaciones del metro de la Ciudad de México[6] y edificios de oficinas[7].

Es posible que la falta de interés por incrementar la seguridad contra incendios urbanos en el país tenga su origen en experiencias previas con otros tipos de catástrofes. Dada su ubicación geográfica e historial de desastres naturales, gran parte de la población mexicana es más consiente de los riesgos asociados a los sismos que a los incendios. Esto se ve reflejado en diversos aspectos de la sociedad tales como los recursos invertidos en monitorizar la actividad sísmica, los esfuerzos para difundir la cultura de prevención frente a temblores o la existencia de reglamentos de construcción especializados en el tema. Este sesgo cognitivo ha provocado que las prácticas de

prevención y seguridad contra incendios empleadas en México presentan un retraso considerable en comparación con las usadas en otros países. Esta menor percepción del riesgo que existe en nuestro país provoca no solo un incremento de la peligrosidad de los incendios urbanos sino también que se lleve un seguimiento inadecuado de esta clase de eventos. Esto último queda plasmado en el hecho de que el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) no realiza un registro estadístico de los daños y fatalidades asociadas a incendios urbanos[8], situación que parece repetirse en muchos países[9]. A modo de referencia de los daños ocasionados por incendios, se citan cifras brindadas por la Asociación Mexicana de Rociadores Automáticos Contra Incendios (AMRACI) y el Consejo Nacional de Protección Contra Incendios (CONAPCI), quienes mencionan que en México los incendios urbanos provocaron una pérdida económica estimada de 38 mil mdp entre 2015 a 2020; además de entre 600 y 700 víctimas mortales de manera anual para el mismo periodo de tiempo[10]. En comparación, en el año 2017 ocurrieron entre 321 a 369 defunciones en México asociadas a sismos[11,12].

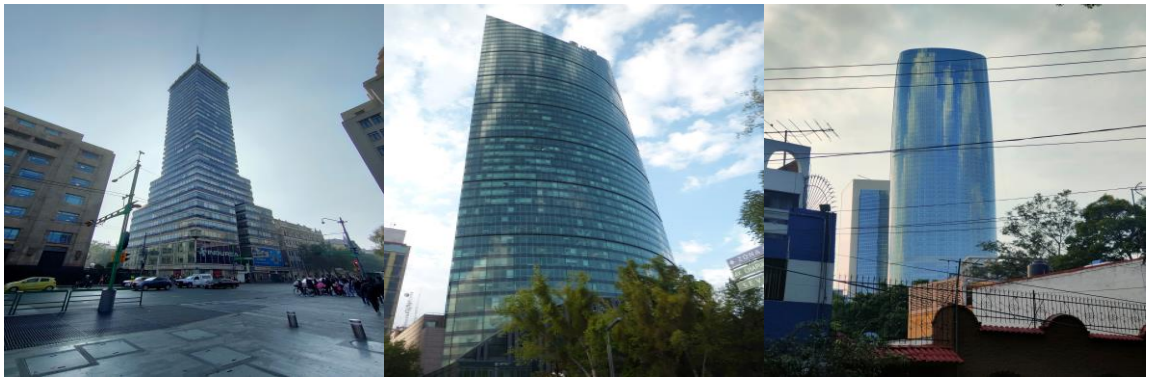
Evidentemente, para cada tipo de edificación existen diferentes riesgos asociados a un incendio que además se ven afectados por otros factores como el uso, las dimensiones, el número de plantas, la ocupación máxima, el tipo de ocupantes o la accesibilidad de los equipos de bomberos. Esta diversidad de edificaciones susceptibles revela que la protección contra incendios en edificios es una ciencia multidisciplinaria que abarca desde el establecimiento de marcos reglamentarios hasta la implementación holística de las medidas de protección en la concepción, diseño, construcción y rehabilitación de edificaciones[13]. Es en estos últimos aspectos donde los ingenieros estructurales juegan un rol esencial en la seguridad contra incendios por medio del estudio del comportamiento de las estructuras en situación accidental de incendio con la finalidad de garantizar su resistencia[14] durante el tiempo necesario para que puedan cumplirse las demás exigencias básicas de seguridad (propagación interior, exterior, evacuación e intervención). Un tipo de edificación especialmente susceptible a los incendios son los edificios industriales. En estas instalaciones se pueden llegar a almacenar grandes cantidades de materiales inflamables que pueden iniciar su combustión debido a eventos como cortos circuitos o fugas de gas[15]. Estas características provocan que en algunos países las edificaciones industriales sean aquellas con mayor riesgo de sufrir un incendio entre el resto del mobiliario urbano[16]. Dada su vulnerabilidad y los elevados daños sociales que pueden provocar los incendios en esta clase de edificaciones, en otros países existen normativas específicas que regulan su seguridad contra incendios.

Otro tipo de estructuras de particular interés en la ingeniería de fuego son los rascacielos. Tal como señalan Cowlard et al. [17], en el diseño de edificios altos se debe buscar una compatibilidad entre el tiempo que una estructura y/o elementos pueden resistir las acciones del fuego y el tiempo requerido para su evacuación e intervención, además evitar el colapso progresivo que pudiera afectar a edificaciones aledañas de su entorno próximo. Esto debido a las grandes alturas y al número reducido de rutas de evacuación disponibles. Sin lugar a dudas, uno de los eventos más impactantes en el que se observaron los efectos dañinos del fuego en la estabilidad de una estructura fue el colapso del *World Trade Center* el 11 de septiembre de 2001. Esto tanto para la sociedad en general como para los ingenieros y arquitectos[18]. A pesar de las condiciones tan particulares que dieron origen al incendio (como lo es un ataque terrorista), no cabe duda de que los incendios en edificios altos

son eventos probables. Otros casos donde han ocurrido incendios en rascacielos son el incendio de la Torre Parque Central en Venezuela en 2004, el cual inició en el piso 39 y se extendió a los niveles superiores debido a un fallo de sectorización que propició la propagación interior del incendio[19]. Otro caso fue el incendio de la Torre de Windsor en España en 2005, el cual tuvo una duración de 18 horas y causó daño estructural en los niveles superiores del edificio[20]. Un ejemplo más reciente es el incendio en una de las torres del complejo de edificios conocido como 8 Boulevard Walk en los Emiratos Árabes Unidos, en 2022, el cual fue atribuido al material empleado en la fachada del rascacielos[21].

De manera adicional a los rascacielos, los edificios históricos son edificaciones que presentan características muy particulares en materia de protección contra incendios. Dada su antigüedad, esta clase de edificios presenta configuraciones y materiales que los clasifican como inseguros ante los requisitos de los códigos vigentes. Por tal motivo, estas edificaciones requieren intervenciones especializadas[22]. Sin embargo, al ser patrimonios históricos, las modificaciones posibles están limitadas no solo por aspectos arquitectónicos, ornamentales y/o técnicas de construcción sino también por los objetos invaluables de gran valor patrimonial que almacenan, como libros, pinturas, murales, interiores históricos, etcétera[23]. Existen diferentes casos documentados de edificios históricos dañados a causa del fuego. Uno muy llamativo fue el incendio del Castillo de Windsor (Reino Unido, 1992) ocurrido durante trabajos de renovación. La causa del incendio más probable fue un foco mal ubicado que prendió fuego a una de las cortinas. Los daños ocasionados por este incendio fueron reducidos, aunque se perdió parte del mobiliario histórico. Otros ejemplos que alcanzaron gran visibilidad en el ámbito internacional fueron los incendios del Museo Nacional de Brasil, en 2018, y el de la Catedral de Notre Dame en Francia, en 2019. El primero de estos ocasionó que 20 millones de objetos históricos fueran destruidos[24], mientras que el segundo consumió dos tercios del techo del recinto religioso[25]. Tal como señalan García et al. [13], los códigos actuales normalmente no brindan guías para la rehabilitación de edificios históricos, por lo que en estos casos se debe de buscar un balance adecuado entre el nivel de seguridad y la preservación del valor histórico del edificio.

Además de las estructuras convencionales, México cuenta con un parque importante de edificios altos (ver figura 1) y estructuras de carácter histórico (ver figura 2). En lo que respecta a los rascacielos, éstos usualmente se diseñan con reglamentos de protección contra incendios de otros países, sin estar demostrado que dichos estándares son apropiados para las condiciones locales. Por otra parte, el país cuenta con un gran número de edificios históricos, los cuales además almacenan objetos de relevancia cultural y de identidad nacional. No hace falta señalar que, en el desafortunado caso de un incendio, existe la posibilidad que una parte importante de la historia del país se vea dañada o pérdida si estos recintos no cuentan con lineamientos de seguridad apropiados. Estos puntos llevan a reflexionar sobre la necesidad de contar con una normativa local en materia de incendios urbanos que tome en cuenta nuestras capacidades técnicas y que impulse el desarrollo de estrategias de protección apegadas a nuestras prácticas constructivas y necesidades de nuestro parque inmobiliario.



a) b) c)

Figura 1. Edificios altos en México: a) Torre Latinoamericana; b) Torre Mayor; c) Torre Mitikah.



a) b) c)

Figura 2. Edificios de valor histórico en México: a) Museo Nacional de Antropología; b) Catedral Metropolitana; c) Templo de San Servacio.

Con el objetivo de señalar las deficiencias en seguridad contra incendios que se tienen en el país, este artículo realiza una comparativa entre las normativas locales e internacionales en la materia. Adicionalmente, se brinda una revisión de los conceptos básicos de la ingeniería de fuego con el objetivo de señalar la importancia de este campo en la ingeniería estructural. Con esto se busca visibilizar entre arquitectos e ingenieros la relevancia de adecuar, diseñar y construir estructuras resistentes al fuego, el cual es el principal objetivo de este artículo. La estructura del documento es la siguiente: en la sección 2 se comentan las recomendaciones disponibles en las normas mexicanas, estadounidenses y europeas, actualmente existentes en materia de seguridad contra incendios. Esto con la finalidad de identificar oportunidades de mejora en la normativa mexicana. En la sección 3 se mencionan los principios básicos de la protección contra incendios. Posteriormente, en la sección 4 se describe las características y limitaciones de las pruebas de fuego utilizadas para evaluar el comportamiento de materiales y elementos frente. En las secciones 5 y 6 se comentan los efectos que tiene el fuego en las propiedades del acero y el concreto, respectivamente. En la sección 7 se brinda una introducción al diseño contra fuego basado en desempeño y, finalmente, en la sección 8 se ofrecen las conclusiones del artículo.

2. Normas y estándares sobre protección contra fuego

En esta sección se ofrece una descripción breve de las normas mexicanas e internacionales en materia de protección

contra incendios en edificación urbana. Esto con la finalidad de sopesar los requisitos de protección civil existentes en México y los aspectos a desarrollar para mejorar la seguridad contra incendios en nuestro país.

2.1 Estándares estadounidenses de protección contra fuego

En Estados Unidos de Norteamérica existen diferentes códigos de construcción que establecen lineamientos sobre los sistemas de protección contra incendios y los tiempos mínimos de resistencia requeridos por los materiales constructivos y elementos estructurales. Para alcanzar estos requerimientos es necesario utilizar los métodos establecidos en algunas guías y estándares. Para ello, la *National Fire Protection Association* (NFPA), que es una asociación sin fines de lucro, ha desarrollado más de 300 códigos y estándares que abarcan diferentes temas asociados con la protección contra incendios. Su objetivo final es evitar las muertes, heridos y pérdidas económicas asociadas a incendios[26]. Algunos de sus más relevantes son el NFPA-13[27] que establece requerimientos para la instalación de sistemas de aspersores, el NFPA-92[28] que trata sobre estándares en sistemas de control de humos, el NFPA-101[29] que aborda las medidas que minimizan el riesgo de vida de las personas en incendios y el NFPA-204[30] que aplica al diseño de sistemas de ventilación de calor y humos. De manera adicional, la NFPA también ha publicado estándares asociados a la protección contra incendios de obras de infraestructura, como el NFPA-130[31] que trata sobre la protección de sistemas ferroviarios o el NFPA-520[32] que aplica a obras subterráneas.

En lo que respecta a la resistencia de elementos estructurales ante fuego, los métodos de cálculo varían en función del material que compone a la estructura, como: acero, concreto, mampostería o madera. Por ejemplo, el ACI-206[33] establece procedimientos para el diseño y cálculo de elementos y estructuras de concreto y mampostería ante fuego. En lo que respecta a estructuras de acero, la *Steel Design Guide 19*[34] elaborada por el *American Institute of Steel Construction* establece métodos de protección y cálculo de resistencia de elementos bajo situaciones de incendio.

Debido a la necesidad de realizar ensayos comparables de comportamiento frente a fuego de elementos estructurales, la *American Society for Testing and Materials* (ASTM), en su estándar E-119[35], establece algunas recomendaciones para realizarlos. Uno de los aspectos más importantes de este documento es la curva tiempo-temperatura estándar, la cual establece la variación de temperatura a lo que estarán sometidos los especímenes durante los ensayos y que también se utiliza como modelo de incendio prescriptivo para el diseño de estructuras en situación de incendio.

2.2 Normas europeas de protección contra fuego

La normativa de la Unión Europea en materia de protección contra incendios brinda lineamientos comunes de carácter voluntario. Esto es, los estados miembros conservan la facultad de establecer sus propias medidas de protección que consideren pertinentes. Entre estas normativas se puede mencionar el Eurocódigo 1[36], que considera a la acción del fuego como una acción accidental extraordinaria, o los Eurocódigos 2 a 5, que describen los métodos de cálculo y diseño frente a fuego de estructuras de concreto[37], acero[38], compuestas[39] y madera[40], respectivamente. Adicionalmente, la Unión Europea también establece lineamientos sobre las características, frente a fuego (y otras), que deben mostrar los productos de construcción comercializados en el mercado

común europeo. Esto a través del reglamento europeo 305[41].

En el caso particular de España, el Código Técnico de la Edificación establece “el marco normativo por el que se regulan las exigencias básicas de calidad que deben cumplir los edificios, incluidas sus instalaciones, para satisfacer los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad” [42]. Las exigencias básicas en caso de incendio incluyen limitantes relacionadas a: 1) propagación interior, 2) propagación exterior, 3) evacuación, 4) instalaciones de protección contra incendios, 5) intervención de bomberos y 6) resistencia estructural al incendio. Para estructuras industriales, el Reglamento de Seguridad contra Incendios en los Establecimientos Industriales[43] establece las metodologías para cumplir con las exigencias básicas del Código Técnico de la Edificación en el ámbito de los establecimientos industriales y logísticos. Por su parte, el Documento Básico - Seguridad en caso de Incendio[44] hace lo propio para estructuras de edificación no industriales. Adicionalmente, la normativa española cuenta con lineamientos sobre sistemas de protección contra incendios, según se especifica en el Reglamento de Instalaciones de Protección Contra Incendios[45], y sobre la clasificación y uso de productos de construcción en función de su reacción y resistencia frente a fuego[46]. Un aspecto importante a remarcar de esta última es que refleja la asimilación de una norma europea creada para permitir la comercialización de productos de construcción en el mercado común europeo que además obliga a ensayos a fuego periódicos de los materiales y/o elementos constructivos.

2.3 Normas mexicanas de protección contra fuego

Podría decirse que la normativa mexicana con relación a la protección contra incendios urbanos es escasa y limitada. Este tema tan importante está regido por los reglamentos locales de protección civil y la norma NOM-002-STPS[47]. A manera de ejemplo, las Normas Técnicas Complementarias (NTC) del Reglamento de Construcción de la Ciudad de México (RCCM, 2020) presentan algunos requerimientos en materia de protección contra incendios. A pesar de este intento por abordar el tema, las NTC presentan una filosofía de protección contra incendios poco clara. Mientras que para las estructuras de concreto (NTC-concreto, 2020), sin importar sus dimensiones o riesgo, se exige una resistencia al fuego mínima de 4 horas, para las estructuras de acero (NTC-acero, 2020) y madera (NTC-madera, 2017) solo se menciona que se debe buscar su protección contra fuego. En lo que respecta a la NOM-002-STP, esta rige en todo el territorio nacional y considera únicamente la protección contra incendios en los centros de trabajo. Como medidas de protección, esta norma establece programas de mantenimiento y distancias máximas en extintores, programas de capacitación, realización de simulacros, revisión de instalaciones eléctricas, señalizaciones, ubicaciones de detectores de humo, características de brigadas contra incendios, entre otras. Un aspecto importante de esta norma es que no establece ningún lineamiento sobre la reacción al fuego de los materiales ni de los tiempos de resistencia ante fuego requeridos para las estructuras, que es un aspecto considerado como de gran importancia en otras normativas.

De manera adicional, existen las normas NMX-S-066-SCFI-2015[48] y la NMX-C-307-1-ONNCCE[49]. La primera tiene como objetivo el establecer las especificaciones mínimas de sistemas fijos de protección contra incendios. Varios puntos interesantes deben ser señalados de esta norma. El primero es que es de carácter voluntario, esto es, los propietarios de las edificaciones no están

obligados a implementar sistemas de protección contra incendios que podrían salvar vidas durante un incidente. El segundo es que realiza una clasificación en función de las mercancías almacenadas, con lo que la norma está pensada específicamente para incendios en edificaciones de tipo industrial. Es importante mencionar que la NMX-S-066-SCFI-2015 se apoya fuertemente en las recomendaciones hechas por la NFPA-13[27] de Estados Unidos de Norteamérica. En lo que respecta a la norma NMX-C-307-1-ONNCCE, esta establece lineamientos aplicables a los ensayos de elementos constructivos frente a fuego, de tal manera que sería la equivalente nacional al estándar ASTM E-119[35] estadounidense.

3. Reseña breve sobre la protección contra incendios en edificios

Para dar cumplimiento a las normativas y estándares en materia de protección contra incendios es necesario contar con técnicos cualificados en el tema, además de realizar un constante trabajo de investigación, desarrollo y ensayo de materiales y productos. En la actualidad, existe un consenso entre la comunidad académica sobre la necesidad de considerar los efectos del fuego como una carga adicional a las acciones sísmicas y de viento en estructuras[50], como una acción accidental extraordinaria. Sin embargo, y a pesar de haber nacido hace más de 100 años, la ingeniería de fuego es un campo poco conocido en México entre académicos y profesionistas. Una reseña histórica muy interesante de esta disciplina se puede encontrar en Law y Bisby[51]; gran parte de los datos mencionados a continuación provienen de dicho documento. El estudio sistemático de los efectos del fuego en estructuras comenzó con las investigaciones realizadas por el *British Fire Prevention Committee* (BFPC), que se fundó en 1898 después del incendio en un almacén en Cripplegate, Reino Unido. Posteriormente, en 1903 la BFPC organizó el primer congreso internacional sobre prevención de incendios: el *International Fire Prevention Congress*. Este congreso fue de gran relevancia debido a que en él se establecieron una serie de conceptos y enfoques que persisten aún al día de hoy en el área de ingeniería de fuego. Por ejemplo, de las interacciones realizadas en el congreso se decidió desaconsejar el uso del término “a prueba de fuego” (*fireproof*) y reemplazarlo por el de “resistente al fuego” (*fire resistant*). Adicionalmente, se elaboró una primera clasificación de las edificaciones en función de sus capacidades para resistir al fuego, misma que era medida utilizando como referencia el tiempo de resistencia a exposición al fuego (30, 60, 90 minutos). Otro gran avance en la materia, producto del congreso, fue una propuesta de estandarización de las pruebas para verificar la resistencia a fuego de materiales y elementos. Para esto se estableció una variación estándar de temperatura en función del tiempo, misma que es utilizada prácticamente sin cambios desde 1917 en varios países. Desafortunadamente, estos primeros intentos por parte de la comunidad científica para crear un marco normativo en materia de seguridad contra incendios en Reino Unido no generaron interés en los entes encargados de elaborar leyes en ese país. Tal como ocurrió en España durante la segunda mitad del siglo XX[52], tuvieron que pasar muchos años en Reino Unido hasta la introducción de su primera ley en materia de protección contra incendios urbanos.

En la época cuando se realizó el *International Fire Prevention Congress*, el cuerpo de técnicos abordaba temáticas completamente desconocidas para su tiempo, motivo por el cual algunos de sus planteamientos iniciales en materia de protección contra incendio fueron modificados con el paso de los años. Tal como en el pasado, el principal objetivo hoy en día de la seguridad contra incendios es el proteger la vida de las personas y evitar los

daños en la propiedad. Para alcanzar dicho objetivo, la filosofía de seguridad contra incendios se apoya en tres controles enfocados a diferentes etapas de un siniestro[53]. El primer control es la prevención contra incendios. La mayoría de los incendios urbanos son causados por fallas en sistemas eléctricos y de calefacción, por lo que revisarlos y realizar operaciones de mantenimiento de manera rutinaria incrementa la prevención contra incendios. El siguiente punto se relaciona con las medidas de protección que buscan limitar el crecimiento de un incendio en caso de que este ocurra. Ejemplos de medidas encaminadas a retardar y/o combatir un incendio son el utilizar materiales de construcción poco inflamables, el proveer sistemas de detección y extinción de incendios o el facilitar las operaciones de los equipos de emergencia. Por último, en caso de que el incendio logre crecer, se busca su confinamiento con el objetivo de permitir el tiempo suficiente tanto para la evacuación de los ocupantes y como para el accionar de los equipos de rescate. Para alcanzar este fin es necesario garantizar la resistencia y estabilidad estructural en caso de incendio, además de utilizar barreras capaces de retrasar o evitar la propagación del fuego en la estructura.

El nivel de protección contra incendios que requiere un edificio se establece con base en el uso y tipo de ocupantes, el área y altura del edificio, la accesibilidad de los bomberos, las distancias a otros edificios, los materiales de construcción, entre otros[34]. A manera de ejemplo, en la Figura 3 se muestran los tiempos de resistencia al fuego requeridos por la legislación inglesa desde 1952 hasta la actualidad para edificios de uso residencial y de oficinas. Es importante señalar que la imagen fue elaborada a partir de los datos recolectados por Law y Bisby[51], considerándose una altura de entrepiso igual a 3.66 m (12 ft). Como se puede observar, en 1952 no era necesario considerar sistemas de protección contra incendios para edificios residenciales con alturas menores a 7.32 m o edificios de oficinas con alturas menores a 15.2 m. Asimismo, a medida que se incrementaban las alturas de los edificios, los tiempos de resistencia requeridos también aumentaban. Esto se debe que a mayores dimensiones del edificio, mayor será su probabilidad de sufrir un incendio durante su vida útil[34]. Adicionalmente, los tiempos requeridos de resistencia al fuego varían levemente entre uso residencial y de oficinas. Para 1952 los tiempos requeridos para ambos tipos de uso eran de 0 hasta 30 minutos de resistencia al fuego. En 1965 esto cambió y se requirió que los edificios tuvieran resistencias entre 30 y 90 minutos. En la actualidad, los edificios residenciales y de oficinas en el Reino Unido que tengan alturas mayores a 30 metros deben alcanzar un tiempo de resistencia contra fuego de 120 minutos o más.

Para alcanzar los niveles de resistencia al fuego requeridos es necesario utilizar de manera conjunta sistemas de protección activa y/o pasiva. Los sistemas de protección activa están enfocados a la detección, extinción y control de la potencia del incendio, tales como: detectores de humo, aspersores, extintores, bocas de incendio equipadas, hidrantes y columnas secas. Por su parte, los sistemas de protección pasiva buscan garantizar la contención del incendio y la estabilidad estructural durante la exposición al fuego[54].

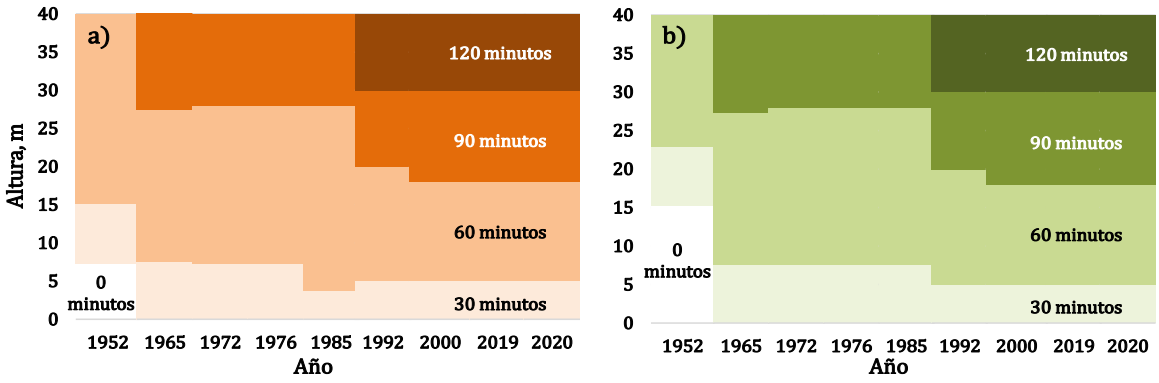


Figura 3. Evolución de los tiempos de resistencia requeridos por la legislación inglesa para a) edificios residenciales y b) de oficinas. Basada en la figura mostrada en Law y Bisby[51].

En lo referente a la protección pasiva, la contención del incendio se consigue utilizando materiales resistentes al fuego y particiones que restrinjan la propagación del fuego entre los compartimentos del edificio[34], mientras que la estabilidad estructural contra fuego se puede brindar de diferentes maneras. Para estructuras de concreto es posible variar el recubrimiento de las secciones[33] o utilizar diferentes tipos de revestimientos[55]. Para estructuras de acero es posible utilizar incrementos de sección o proteger mediante placas o morteros de fibras minerales, placas de yeso, materiales intumescentes, entre otras alternativas, como se puede ver esquemáticamente en la Figura 4[34]. Para tener un referente sobre la reacción y resistencia de los materiales frente a altas temperaturas, es necesario realizar ensayos de comportamiento al fuego. Este tema es abordado en la siguiente sección del documento.

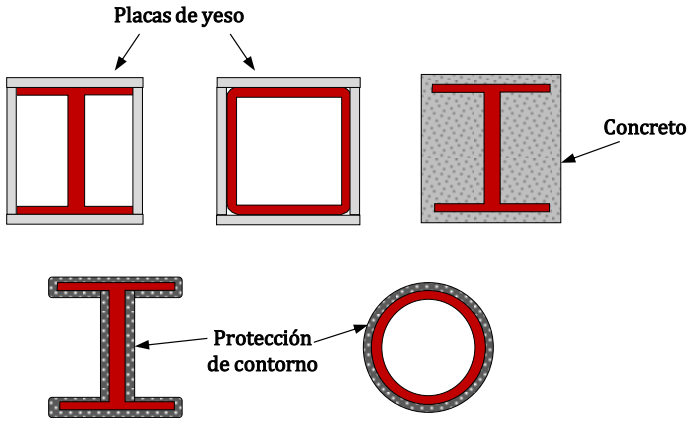


Figura 4. Esquemas de sistemas protección de columnas de acero contra fuego.

4. Ensayos de comportamiento al fuego

Las pruebas de laboratorio son esenciales para la ingeniería de fuego debido a que éstas permiten la certificación de productos que se usan en la construcción y posibilitan a los fabricantes la verificación del comportamiento de sus soluciones en situación de incendio, lo cual es vital en el desarrollo de productos[56]. En los laboratorios de fuego se realizan dos tipos de prueba: de reacción y de resistencia. En las pruebas de reacción a fuego se estudia la propagación de las llamas y los productos generados durante la combustión (p. ej. gases tóxicos). Por su parte, las pruebas de

resistencia se subdividen en dos partes: la determinación de las propiedades mecánicas de materiales a altas temperaturas y el estudio del comportamiento de elementos estructurales en situación de incendio. Para el estudio de las propiedades mecánicas es posible utilizar dos tipos de estudios, los cuales se denominan como "*steady*" y "*transient*". En el *steady* las probetas se calientan para después proceder al ensayo, manteniendo la temperatura constante. En el *transient* la temperatura es variable, esto es, la probeta se somete a una solicitación mecánica determinada para luego ser calentada hasta su falla.

Para comparar el desempeño de elementos y materiales resistentes al fuego se requiere utilizar una prueba de fuego estandarizada. El estándar ASTM E-119 es uno de los documento que establece, en Estados Unidos de Norteamérica, las recomendaciones para realizar pruebas de fuego para determinar las propiedades termo-mecánicas de materiales a altas temperaturas y de los elementos estructurales para una variedad de situaciones y condiciones de exposición[35]. Esta norma también da especificaciones de evaluación para muros, particiones, vigas, columnas, sistemas de protección pasiva y sistemas de piso y techo, estableciendo umbrales de desempeño de éstos según el tiempo de exposición a fuego, hasta la aparición del primer punto crítico en su comportamiento. Es importante señalar que los ensayos de resistencia al fuego no permiten conocer el comportamiento de un elemento o material bajo todas las condiciones asociadas a incendios reales, esto debido a las limitantes y consideraciones que se toman en su realización[34]. Una de estas limitantes se asocia a la curva tiempo-temperatura empleada que no necesariamente corresponde con la de un incendio real.

Durante los ensayos de comportamiento frente al fuego se debe utilizar una variación de la temperatura en función del tiempo estandarizada, esto con la finalidad de obtener resultados comparables. Una de las curvas tiempo – temperatura más utilizada es la que se conoce como la curva de fuego estándar, siendo ésta especificada en el Apéndice 1 de ASTM E-119. Un aspecto fundamental de la variación de temperatura señalada en la ASTM E-119 es que ésta es aplicable a materiales constructivos empleados en edificaciones; sin embargo, existen otras curvas que representan condiciones diferentes a las señaladas. Un claro ejemplo es la curva tiempo – temperatura empleada para estudiar los incendios originados por hidrocarburos, los cuales son más intensos ya que alcanzan temperaturas de 1,000 °C en menos de 15 minutos [57]. Debido a que este artículo solo aborda los conceptos básicos de incendios urbanos, una descripción más amplia de otras curvas tiempo – temperatura es omitida.

La curva de fuego estándar se muestra en la Figura 5 en conjunto con variaciones de temperatura asociadas a fuegos reales localizados y totalmente desarrollados. Nótese en la parte inferior que existe una fase incipiente, una fase de calentamiento y una fase de enfriamiento. Como se puede observar, la curva de fuego estándar presenta un incremento rápido de la temperatura (*flashover*) seguido de un crecimiento más lento y continuo. A pesar de que esta curva es utilizada para la realización de ensayos de comportamiento ante fuego, existen investigaciones que señalan que el comportamiento de fuegos reales puede mostrar otro tipo de características[58]. Se ha observado que, en fuegos reales, el incremento de temperatura no es tan rápido como considera la curva de fuego estándar. En su lugar, existe un periodo de incremento lento de temperatura de difícil caracterización denominado como fase incipiente. Por su parte, la fase de calentamiento ocurre cuando existe combustible suficiente y hay

disponibilidad de oxígeno. En esta fase, el material inflamable se prende de manera simultánea por efecto del calentamiento de los materiales por radiación. Esto se conoce como *flashover* y provoca un incremento rápido de la temperatura, alcanzando inclusive magnitudes mayores a las establecidas por la curva estándar[34]. Cuando no ocurre el *flashover* se produce un fuego localizado que genera temperaturas más moderadas. Posteriormente, durante la fase de enfriamiento, las temperaturas comienzan a disminuir una vez que todo el material incendiable ha sido consumido o el fuego ha sido controlado por los sistemas de protección activa. De la Figura 5, se puede decir que la curva de fuego estándar representa de manera aproximada el comportamiento de un fuego totalmente desarrollado durante la fase de calentamiento, aunque no así en las fases incipiente y de enfriamiento.

Otras limitantes de los ensayos de comportamiento ante fuego son el ambiente en el que se realiza el ensayo. Por seguridad de los técnicos, las pruebas de fuego deben realizarse en cámaras con presiones negativas, mientras que la presión es positiva en fuegos reales[59]. Por otra parte, las dimensiones de los elementos ensayados están limitadas por las dimensiones del marco de prueba o por el tamaño de los hornos.

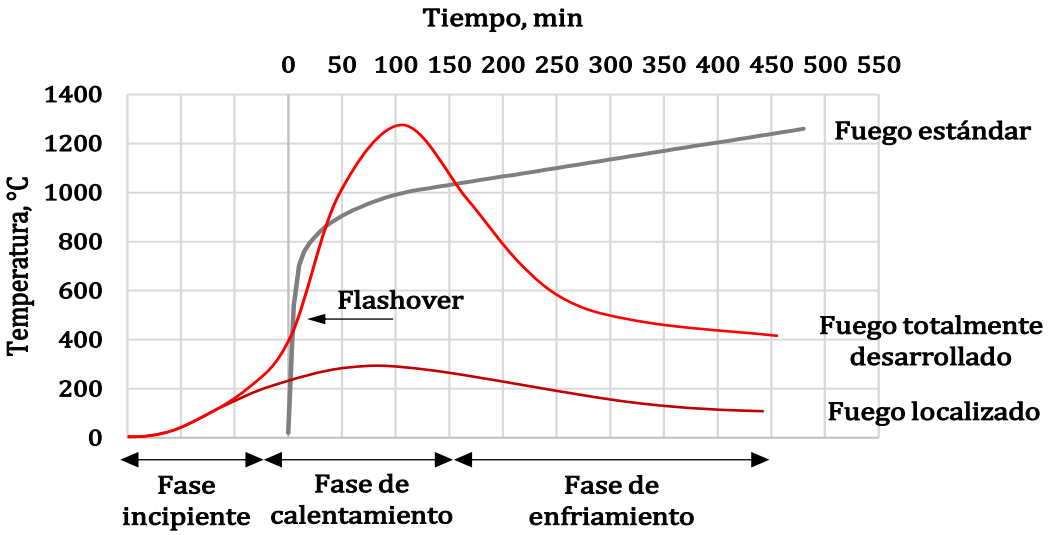


Figura 5. Comparación entre la curva de fuego estándar y fuegos reales.

5. Efectos del fuego en estructuras de acero

Las propiedades térmicas, mecánicas y de deformación del acero estructural se ven afectadas al ser sometidas a temperaturas altas. Las propiedades térmicas, como la conductividad térmica y el calor especifico, están afectadas por la variación de temperatura[53]. El valor de la conductividad térmica en la mayoría de los aceros disminuye con el incremento de la temperatura. A 20 °C la conductividad térmica del acero es de aproximadamente 50 W/m°C, entre 20 °C y 900 °C disminuye de manera lineal para mantenerse en un valor constante de aproximadamente 28 W/m°C después de los 900 °C. En lo que respecta al calor especifico, esta propiedad se mantiene prácticamente constante para todos los intervalos de temperatura, aunque presenta un pico angosto a los 760 °C (como se ve en la Figura 6). Debido a que este cambio ocurre en intervalo

de temperatura corto, se suele considerar que su valor se mantiene constante en 600 J/kg K para todas las temperaturas[53]. Por su parte, el incremento de temperatura provoca deformaciones en el material debido al efecto de la expansión térmica.

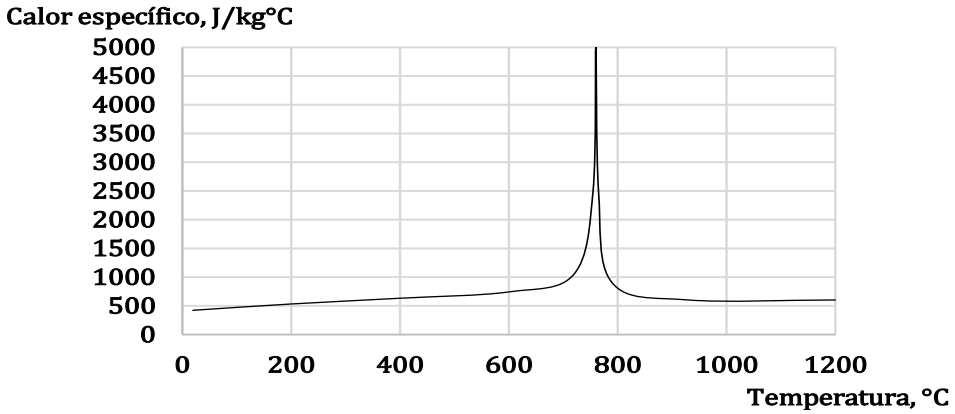


Figura 6. Calor específico del acero en función de la temperatura (adaptada de EN-1993-1-2[38]).

Por otro lado, a altas temperaturas, el acero pierde gran parte de su resistencia, y el valor de su módulo de elasticidad disminuye, lo que afecta negativamente la estabilidad de estas estructuras. Los estudios realizados sobre los efectos de temperaturas altas en el acero han revelado que la degradación de sus propiedades mecánicas se ve afectada por la calidad del acero[60,61]. En la Figura 7 se presentan las curvas esfuerzo-deformación obtenidas en pruebas de tracción a aceros convencionales para un intervalo de temperaturas entre 20 y 800 °C. Como se puede observar, el esfuerzo de fluencia del material es muy similar para temperaturas entre 20 y 300 °C. Sin embargo, su valor comienza a disminuir considerablemente para temperaturas mayores a 400 °C. Para un valor de 800 °C, el material pierde prácticamente toda su resistencia.

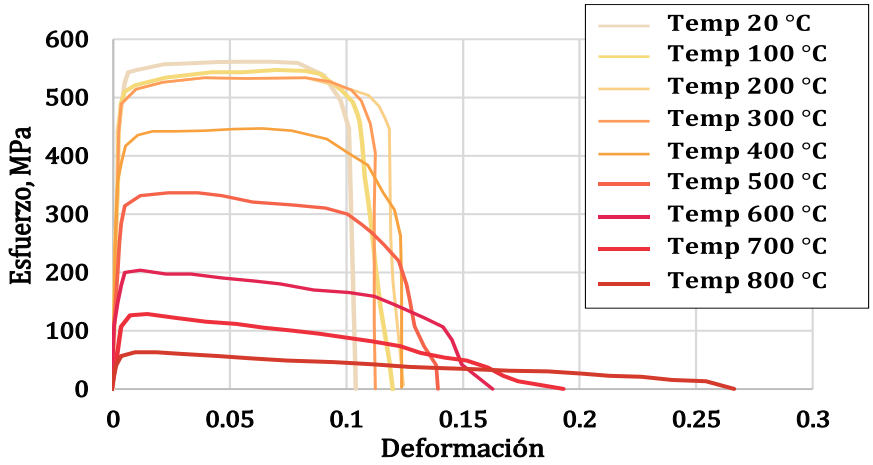


Figura 7. Variación de la curva esfuerzo-deformación del acero en función de la temperatura, adaptada de Kumar et al. [62].

A manera de referencia, las variaciones del módulo de elasticidad y resistencia a la fluencia del acero, en función de la temperatura, se muestran en la Figura 8. Es importante indicar que las curvas fueron elaboras considerando el modelo presentado

por Poh[63] en su apéndice 1. Se aclara que estos valores pueden cambiar de manera considerable entre diferentes tipos de acero [64]. De la figura, se puede decir que, al igual que ocurre con la resistencia, el módulo de elasticidad del acero presenta ligeros cambios entre los 20 y 200 °C, y sufre una rápida pérdida de rigidez para temperaturas mayores. Para una temperatura de 800 °C, el material únicamente conserva un 20% de su módulo de elasticidad original. Por esta clase de afectaciones en su resistencia y módulo de elasticidad, se considera esencial el utilizar sistemas de protección en estructuras de acero para así evitar su colapso en condiciones de elevadas temperaturas[62].

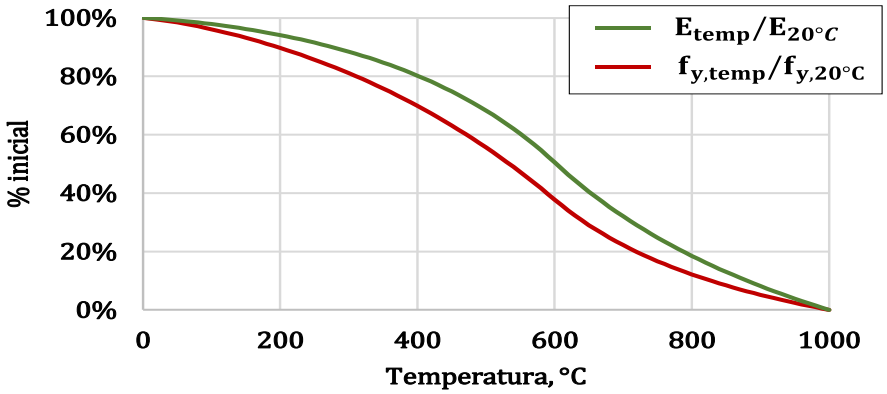


Figura 8. Variación de la resistencia y módulo de elasticidad del acero en función de la temperatura según el modelo presentado por Poh[63].

6. Efectos del fuego en estructuras de concreto

El concreto es una mezcla de agregados, agua, cemento, aditivos y adiciones, que es muy estable químicamente; además de presentar conductividad térmica baja, calor específico alto y degradación baja de su resistencia con la temperatura[65]. Sin embargo, presenta "*spalling*" o desconchado explosivo a temperaturas elevadas. Por sus características, el concreto no solo presenta una vulnerabilidad menor que la del acero, sino que también se considera como uno de los materiales de construcción con mejor comportamiento frente a los efectos de los incendios[66]. Sin embargo, esto no significa que sus propiedades no se vean afectadas por la acción de la temperatura.

Sobre sus propiedades térmicas, se puede decir que la conductividad térmica del concreto de resistencia normal a 20 °C es de 1.4 a 3.6 W/m°C[67], disminuyendo ligeramente su valor con el aumento de la temperatura[53]. En lo que respecta al calor específico, la variación de esta propiedad es altamente dependiente del contenido de humedad, el tipo de agregado y la densidad del concreto[68–70].

Por otra parte, tanto el módulo de elasticidad como la resistencia del concreto disminuyen con la temperatura. A manera de ejemplo, en la Figura 9 se muestra curvas esfuerzo-deformación de concretos convencionales y de alta resistencia para temperaturas entre 23 y 800 °C. Como se puede observar, la resistencia a compresión de los concretos comienza a disminuir de manera notoria de los 300 a los 400 °C. Otro efecto a destacar es que la ductilidad de los concretos se ve incrementada a medida que aumenta la temperatura, siendo los concretos de resistencia normal aquellos que presentan un comportamiento notablemente más dúctil para valores de temperatura menores a 800 °C. Adicionalmente se menciona que el pico

de la curva esfuerzo-deformación tiende a desplazarse hacia la derecha con el incremento de la temperatura, lo cual indica que la rigidez del material se ve disminuida.

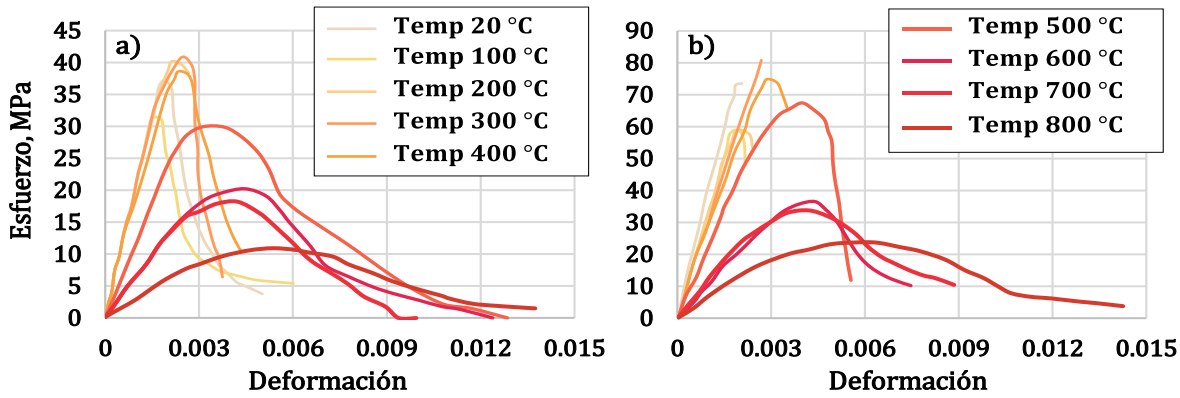


Figura 9. Variación de la curva esfuerzo-deformación en función de la temperatura para a) concreto de resistencia normal; b) concreto de alta resistencia. Adaptada de Kodur[65].

Es importante señalar que la pérdida de resistencia a compresión del concreto por acción del fuego es un tema que aún requiere de una investigación más profunda, esto queda demostrado en la gran dispersión de los valores reportados de resistencia residual para diferentes temperaturas. Para brindar un ejemplo de esto, en la Figura 10 se muestra los valores de resistencia a compresión residual, normalizados con respecto a la resistencia del concreto a 20 °C, reportados por 46 estudios y que fueron recopilados por Ma et al. [71]. La gráfica muestra que entre los 20 y los 300 °C el valor de la resistencia a compresión se mantiene aproximadamente constante, existiendo estudios que señalan tanto un incremento como un decremento de la resistencia a medida que aumenta la temperatura. Para temperaturas mayores a 300 y menores a 800 °C, la resistencia del concreto disminuye considerablemente hasta alcanzar un valor de resistencia residual prácticamente nulo a temperaturas mayores a 800 °C.

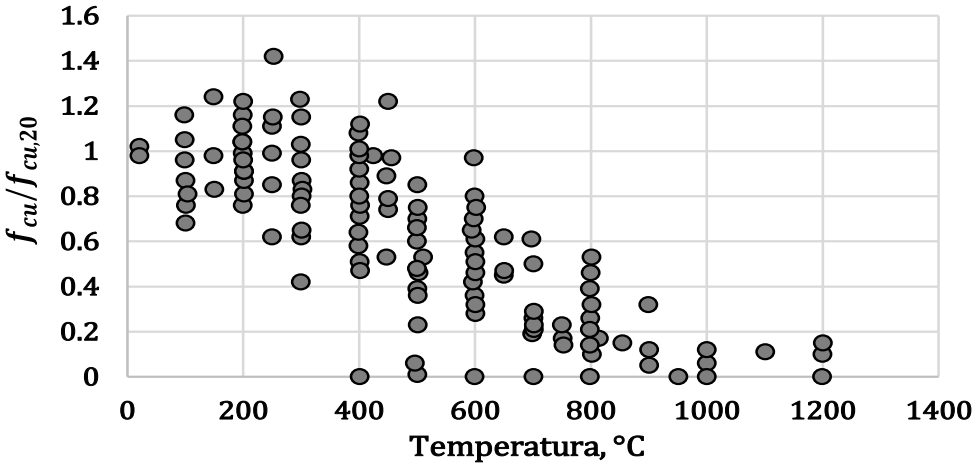


Figura 10. Esfuerzo máximo a compresión del concreto en función de la temperatura, adaptada de Ma et al. [71].

7. Diseño basado en desempeño

De manera similar a la filosofía de diseño sísmico basado en desempeño, en la ingeniería de fuego también hay estrategias enfocadas a evaluar el desempeño de las estructuras en caso de incendio, con fines de diseño. Este enfoque ingenieril, denominado llanamente como diseño basado en desempeño, se diferencia de las estrategias de diseño tradiciones, con soluciones prescriptivas, por el uso de enfoques de diseño basados en el manejo de riesgos[72]. De acuerdo con Hurley y Rosenbaum[73], este cambio de perspectiva presenta tanto ventajas como desventajas en la ingeniería de fuego. Entre sus ventajas se puede mencionar que permite crear diseños que respondan a las características únicas de cada edificio, además de promover una mejor comprensión del desempeño de edificaciones en caso de incendio. Sobre sus desventajas se menciona que su implementación requiere una mayor experiencia en el campo, un tiempo de análisis más largo o que puede generar diseños altamente sensibles a cambios de uso o modificaciones en la estructura. A pesar de estas desventajas, diferentes países como Australia, Nueva Zelanda, Suecia, Estados Unidos de Norteamérica o la zona euro han adoptado enfoques basados en desempeño en materia de seguridad contra incendios[50,74].

Para el diseño basado en desempeño, Hurley y Rosenbaum[73] propusieron un enfoque en el que se estudian diferentes aspectos, como: la dinámica del fuego, el comportamiento humano, los sistemas de protección y la resistencia estructural en caso de incendio. Existen tres elementos fundamentales en esta propuesta: los objetivos de desempeño, los escenarios de incendio donde éstos se evalúan y los métodos empleados para determinar si los objetivos de desempeño se cumplen para los escenarios considerados. Existe otro enfoque en el diseño basado en desempeño que trata exclusivamente el diseño prestacional de estructuras en situación de incendio. En este último se utilizan modelos de incendio natural basados en fuegos de diseño[75] para la definición de los escenarios de incendio, además de análisis termales y estructurales. En la Figura 11 se presenta un esquema de los procedimientos de diseño considerados en el Eurocódigo 3 para el diseño basado en desempeño de estructuras, siendo posible analizar elementos aislados, secciones de estructuras o la estructura completa. Evidentemente, los métodos simplificados de cálculo solo son aplicables para elementos aislados y en casos muy particulares. Para el resto de las situaciones es necesario emplear métodos de cálculo avanzados.

Para dar correcto seguimiento a estos elementos, los ingenieros deben conocer aspectos relacionados con la ciencia del fuego como química, termodinámica, mecánica de fluidos, transmisión de calor, el comportamiento de materiales y sistemas estructurales a altas temperaturas, además de métodos de cálculo y el uso de herramientas computacionales avanzadas[74]. Para calcular la respuesta de estructuras bajo la acción del fuego de manera aproximada es posible utilizar métodos de cálculo simplificados disponibles en la literatura[76,77]. Por otra parte, algunos ejemplos de programas desarrollados para analizar el desempeño de estructuras bajo condiciones de fuego son SAFIR[78], *Vulcan*[79], Opensees for Fire[80] y *Fire Dynamic Simulator*[81].

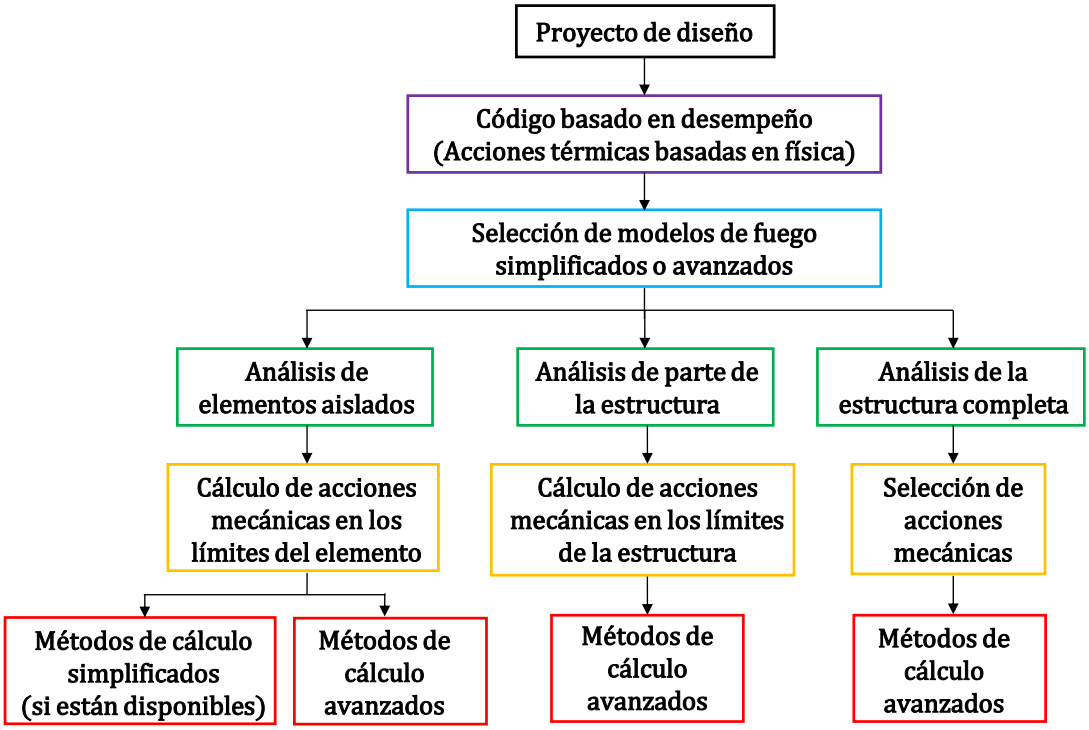


Figura 11. Esquema de procedimientos de diseño, adaptada de EN-1993-1-2[38].

Dado el reciente desarrollo de este tema, en la actualidad el diseño basado en desempeño aún presenta diversos retos por resolver, siendo algunos de estos los enlistados a continuación[82]:

- Aplicar guías generales para proyectos específicos.
- Definir, usar y cuantificar los criterios de desempeño.
- Seleccionar los escenarios de diseño por fuego.
- Comparar los niveles de seguridad entre las soluciones basadas en desempeño y aquellas obtenidas por métodos prescriptivos.
- Determinar los factores que mayor relevancia tienen en la evaluación de los diseños.
- Lidiar con las diferencias entre sistemas idealizados de protección contra incendios y aquellos que están instalados y en funcionamiento en proyectos reales.
- Estimar consecuencias de los escenarios de diseño.
- Adaptar valores disponibles en la literatura para su uso en modelos (propiedades de los materiales, distribución de ocupantes, etc.).

8. Conclusiones

A pesar de que la seguridad contra incendios urbanos en edificaciones es un campo de gran relevancia para la protección civil, en México este es un tema que no ha sido atendido apropiadamente por parte de los organismos reguladores y otras instituciones. Esta situación tiene grandes repercusiones en la sociedad mexicana como pérdidas económicas cuantiosas y un número alto de víctimas mortales asociadas a incendios cada año. En el mapa mental mostrado en la Figura 12 se presentan cuatro ejes que se consideran fundamentales para incrementar la seguridad contra los incendios urbanos en el país, los cuales son: desarrollo de normativas, certificación de productos frente a situaciones de incendio, docencia e investigación en la materia y el desarrollo y aplicación de

sistemas de protección. Cabe señalar que los cuatro puntos se apoyan en ensayos experimentales, con lo cual, es de gran importancia invertir en el establecimiento de laboratorios con las características y equipamientos adecuados para el desarrollo de investigación en este campo.

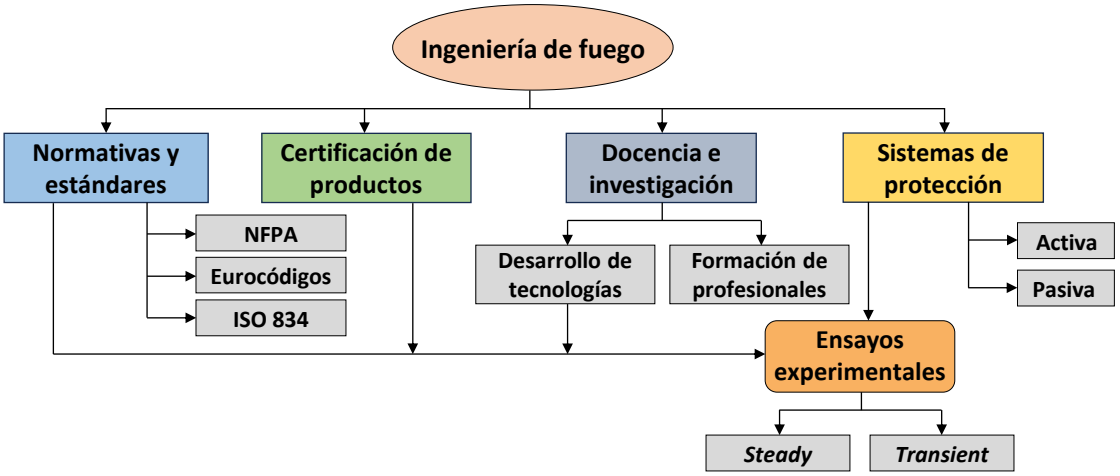


Figura 12. Mapa mental de la ingeniería de fuego.

Al revisar la normativa y reglamentación en materia de seguridad contra incendios existente en otros países, y al compararla con la mexicana, se puede apreciar que México presenta un rezago notable. En países desarrollados se han creado requerimientos de seguridad contra incendios en función del tipo de edificación, además de que se han establecido evaluaciones y certificaciones periódicas del comportamiento de materiales y elementos constructivos en situación de incendio. Por su parte, en México únicamente se han elaborado tres normas inconexas y de aplicabilidad limitada. El alcance reducido de las normas mexicanas sobre seguridad contra incendios deja en el abandono las estrategias de seguridad necesarias para garantizar la estabilidad estructural y la no propagación del fuego durante incendios desarrollados, sin mencionar los requerimientos particulares de seguridad asociados a edificaciones no ordinarias.

Adicionalmente, la protección adecuada contra incendios en edificaciones requiere de conocimientos avanzados en ingeniería de fuego, aplicándose esto tanto para estructuras convencionales como singulares. Para estructuras convencionales, es necesario conocer el comportamiento de los materiales constructivos empleados frente a situaciones de incendio, lo cual es un área de investigación en constante expansión. Tal como se mostró en la Figura 10, materiales como el concreto pueden presentar una afectación altamente variable frente a las altas temperaturas. Esta variabilidad se puede deber a factores como las características regionales de los materiales empleados en la elaboración del concreto. Por motivos como el anterior, resulta imperativo contar con estudios locales que brinden una mayor certeza sobre el comportamiento de los concretos empleados a nivel nacional frente a situaciones de incendio. Para el caso particular de edificios altos, incluso la normativa sobre protección contra incendios existente en países desarrollados ha mostrado serias deficiencias de seguridad[83–85]. Algo similar se puede mencionar sobre la protección en edificios históricos[13]. Esto implica que la, ya de por sí, rezagada normativa mexicana deja en un estado de alta

vulnerabilidad al inventario de edificios altos e históricos existentes en el país.

Para revertir la situación de rezago en materia de ingeniería de fuego en el país en primera instancia es necesario reconocer que dicho rezago existe y que éste tiene repercusiones negativas para la sociedad. Una vez identificada esta problemática, es necesario definir rutas de acción conjunta entre universidades, centros de investigación, organismos reguladores y grupos empresariales para subsanar las deficiencias existentes. La participación y compromiso de los grupos antes mencionados resulta de gran importancia. Los primeros para impartir enseñanza rigurosa sobre los procesos e interacciones complejas que ocurren durante un incendio e investigar estrategias de protección contra fuego en edificaciones. Por su parte, los organismos reguladores deben buscar establecer normativas más estrictas en materia de seguridad contra incendios y, finalmente, la iniciativa privada para reconocer este problema de seguridad y para invertir en el desarrollo e investigación de tecnologías que permitan su mitigación y resolución.

Por último, se señala que, tal como han ejemplificado los casos de Reino Unido[51] y de España[52], el establecer normativas y estándares de protección contra incendios es un proyecto cuesta arriba que requiere de años, sino décadas, de dedicación. Sin embargo, estos esfuerzos al final se ven recompensados tanto con un mayor nivel de seguridad para la vida de los habitantes como en el incremento de la capacidad tecnológica y de innovación en ingeniería de fuego del país.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto de Ingeniería de la UNAM por proveer las facilidades que posibilitaron la realización de este trabajo.

Referencias

[1] El Financiero. El Financiero.(2022). Incendio en clínica del ISSSTE en Campeche: evacuan y trasladan a pacientes. Available at: https://www.elfinanciero.com.mx/estados/2022/09/26/incendio-en-clinica-del-issste-en-campeche-evacuan-y-trasladan-a-pacientes/. [accessed December 8, 2022].

[2] Quadratin México. Quadratin México.(2022). Incendio, en nave industrial de cerca de 7 mil m^2. Available at: https://mexico.quadratin.com.mx/incendio-en-nave-industrial-de-cerca-de-7-mil-m^2/. [accessed December 8, 2022].

[3] Grupo Milenio. Grupo Milenio.(2022). Los daños que sufrió Holbox tras los incendios que consumieron hoteles. Available at: https://www.milenio.com/estados/danos-sufrio-holbox-incendios-consumieron-hoteles. [accessed December 8, 2022].

[4] Infobae. Infobae.(2022). Se quemaron dos departamentos en incendio de Condominio Insurgentes; no hay registro de heridos. Available at: https://www.infobae.com/america/mexico/2022/09/27/reportaron-incendio-en-condominio-insurgentes-hasta-el-momento-no-hay-heridos/. [accessed December 8, 2022].

[5] El País México. El País México.(2021). El incendio del mercado de Sonora: “Solo veíamos cortinas de humo, se hacía imposible respirar.” Available at: https://elpais.com/mexico/2021-11-04/un-incendio-en-el-mercado-de-sonora-hace-saltar-las-alarmas-en-ciudad-de-mexico.html. [accessed December 8, 2022].

[6] Capital 21. Capital 21.(2021). Así ocurrió el incendio en el "cerebro" (PCC 1) del Metro CDMX. Available at: https://www.capital21.cdmx.gob.mx/noticias/?p=7583. [accessed December 8, 2022].

[7] El Financiero. El Financiero.(2019). Se incendia edificio de Conagua en Insurgentes Sur; no hay lesionados. Available at: https://www.elfinanciero.com.mx/nacional/se-incendia-edificio-de-conagua-en-insurgentes-sur-no-hay-lesionados/. [accessed December 8, 2022].

[8] Instituto de Información Estadística y Geográfica. Instituto de Información Estadística y Geográfica.(2020). Encuesta Nacional de Vivienda. Available at: https://www.inegi.org.mx/rnm/index.php/catalog/695/study-description. [accessed December 27, 2023].

[9] Spinardi, G., Bisby, L., Torero, J. (2017). A Review of Sociological Issues in Fire Safety Regulation, Fire Technol., 53(3), pp. 1011–37, Doi: 10.1007/s10694-016-0615-1.

[10] Villanueva, R. (2022). Pérdidas millonarias por incendios urbanos en México, Real Estate Mark. Lifestyle.

[11] INEGI. (2018). Estadística de defunciones registradas 2017, Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

[12] Swiss Re Institute. Swiss Re Institute.(2022). Sigma Explorer - catastrophe and insurance market data. Available at: https://www.sigma-explorer.com/. [accessed December 20, 2022].

[13] García, E., Paya, I., Hospitaler, A. (2022). Fire in heritage and historic buildings, a major challenge for the 21st century, Dev. Built Environ., 13, Doi: 10.1016/j.dibe.2022.100102.

[14] Ruvalcaba, F.R., Covarrubias, M. (2017). La Ingeniería Estructural de Fuego un enfoque nacional y ejemplo de aplicación, Ing. Investig. y Tecnol., 18(3), pp. 253–64, Doi: 10.22201/fi.25940732e.2017.18n3.023.

[15] Benseghir, H., Ibrahim, A. Bin., Nurul Islam Siddique, M., Nomani Kabir, M., Alginahi, Y.M. (2020). Modelling emergency evacuation from an industrial building under spreading fire using a social force model with fire dynamics, Mater. Today Proc., 41, pp. 38–42, Doi: 10.1016/j.matpr.2020.10.999.

[16] Athapaththu, A., Gayani, N., Dissanayake, D. (2013).Effective fire safety planning for industrial buildings: a literature review. The Second World Construction Symposium 2013: Socio-Economic Sustainability in Construction, Colombo, Sri Lanka.

[17] Cowlard, A., Bittern, A., Abecassis-Empis, C., Torero, J. (2013). Fire safety design for tall buildings, Procedia Eng., 62, pp. 169–81, Doi: 10.1016/j.proeng.2013.08.053.

[18] Kotsovinos, P., Usmani, A. (2013). The World Trade Center 9/11 Disaster and Progressive Collapse of Tall Buildings, Fire Technol., 49(3), pp. 741–65, Doi: 10.1007/s10694-012-0283-8.

[19] Infobae. Infobae.(2004). Un incendio destruyó un edificio de 56 pisos en Venezuela. Available at: https://www.infobae.com/2004/10/17/1463099-un-incendio-destruyo-un-edificio-56-pisos-venezuela/. [accessed December 8, 2022].

[20] Fletcher, I. (2009).Tall concrete buildings subject to vertically moving fires: A case study approach. University of Edinburgh, 2009.

[21] RT. RT.(2022). Se produce un incendio en un rascacielos en Dubái, cerca del edificio más alto del mundo. Available at:

https://actualidad.rt.com/actualidad/447265-incendio-rascacielos-edificio-alto-dubai. [accessed December 8, 2022].

[22] Garcia, E., Paya-Zaforteza, I., Hospitaler, A. (2021). Analysis of the fire resistance of timber jack arch flooring systems used in historical buildings, Eng. Struct., 243(June), pp. 112679, Doi: 10.1016/j.engstruct.2021.112679.

[23] Torero, J.L. (2019). Fire Safety of Historical Buildings: Principles and Methodological Approach, Int. J. Archit. Herit., 13(7), pp. 926–40, Doi: 10.1080/15583058.2019.1612484.

[24] BBC News. BBC News.(2018). Brazil's national museum hit by huge fire. Available at: https://www.bbc.com/news/world-latin-america-45392668. [accessed December 8, 2022].

[25] The New York Times. The New York Times.(2019). La Catedral de Notre Dame en París se incendia. Available at: https://www.nytimes.com/es/2019/04/15/espanol/notre-dame-incendio.html. [accessed December 8, 2022].

[26] NFPA. NFPA.(2022). List of NFPA Codes and Standards. Available at: https://www.nfpa.org/Codes-and-Standards/All-Codes-and-Standards/List-of-Codes-and-Standards. [accessed December 9, 2022].

[27] NFPA. (2019). NFPA-13. Standard for the installation of sprinkler systems, National Fire Protection Association.

[28] NFPA. (2012). NFPA-92. Standard for smoke control systems, National Fire Protection Association.

[29] NFPA. (2021). NFPA 101. Life safety code, National Fire protection Association.

[30] NFPA. (2007). NFPA-204. Standard for smoke and heat venting, National Fire Protection Association.

[31] NFPA. (2007). NFPA 130. Fixed guideway transit and passenger rail systems, National Fire Protection Association.

[32] NFPA. (2021). NFPA 520. Standard on subterranean spaces, National Fire Protection Association.

[33] ACI. (2015). ACI 216. Code requirements for determining fire resistance of concrete and masonry construction assemblies, American Concrete Institute.

[34] AISC. (2003). Steel design guide 19. Fire resistance of structural steel framing, American Institute of Steel Construction.

[35] ASTM. (2022). ASTM E119. Standard test methods for fire tests of building construction and materials, American Society for Testing and Materials.

[36] EN-1991-1-2. (2002). Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire.

[37] EN-1992-1-2. (2004). Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design.

[38] EN-1993-1-2. (2005). Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design.

[39] EN-1994-1-1. (2005). Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures, .

[40] EN-1995-1-1. (2004). Eurocode 5: Design of timber structures.

[41] Parlamento Europeo. (2011). Reglamento UE 305/2011. Condiciones armonizadas para la comercialización de productos de construcción, vol. L88, Diario Oficial de la Unión Europea.

[42] CTE. (2022). Código Técnico de la Edificación, Ministerio de transportes, movilidad y agenda urbana.

[43] RSCIEI. (2004). Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales, Ministerior de Industria, turismo y comercio.

[44] DB-SI. (2019). Documento Básico - Seguridad en caso de incendio, vol. 2013, Ministerio de fomento.

[45] RIPCI. (2017). Reglamento de instalaciones de protección contra incendios, Ministerio de Industria y Energia.

[46] BOE-A-2013-12323. (2013). Clasificación de los productos de construcción y de los elementos constructivos en función de sus propiedades de reacción y de resistencia frente al fuego, .

[47] STPS. (2010). NOM-005-STPS-2010, condiciones de seguridad, prevención y protección contra incendios en los centros de trabajo.

[48] SCFI. (2015). NMX-S-066-SCFI-2015, seguridad, equipo de protección contra incendio, sistemas fijos, sistemas de rociadores automáticos, diseño e instalación.

[49] ONNCCE. (2017). NMX-C-307-1-ONNCCE. Resistencia al fuego de elementos y componentes especificaciones y métodos de ensayo, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.

[50] Kodur, V.K.R., Garlock, M., Iwankiw, N. (2012). Structures in Fire: State-of-the-Art, Research and Training Needs, Fire Technol., 48(4), pp. 825–39, Doi: 10.1007/s10694-011-0247-4.

[51] Law, A., Bisby, L. (2020). The rise and rise of fire resistance, Fire Saf. J., 116, pp. 103188, Doi: 10.1016/j.firesaf.2020.103188.

[52] Fernández, R. (2009). Desarrollo de las normas contra incendios en españa, Cercha, , pp. 56–62.

[53] ASCE. (1992). Structural Fire Protection, American Society of Civil Engineers.

[54] Kodur, V., Kumar, P., Rafi, M.M. (2020). Fire hazard in buildings: review, assessment and strategies for improving fire safety, PSU Res. Rev., 4(1), pp. 1–23, Doi: 10.1108/PRR-12-2018-0033.

[55] Sadkovyi, V., Andronov, V., Semkiv, O., Kovalov, A., Rybka, E., Otrosh, Y., Udianskyi, M., Koloskov, V., Danilin, A., Kovalov, P. (2021). Fire Resistance of Reinforced Concrete and Steel Structures.

[56] Wegrzynski, W., Sulik, P. (2016). The philosophy of fire safety engineering in the shaping of civil engineering development, Bull. Polish Acad. Sci. Tech. Sci., 64(4), pp. 719–30, Doi: 10.1515/bpasts-2016-0081.

[57] Scullion, T., Ali, F., Nadjai, A. (2011). Experimental study on performance of elliptical section steel columns, under hydrocarbon fire, J. Constr. Steel Res., 67(6), pp. 986–91, Doi: 10.1016/j.jcsr.2011.01.010.

[58] Cajot, L., Pierre, M., Schleich, J. (2002). Competitive steel buildings through natural fire safety concepts: final report, European Commission, Directorate-General for Research and Innovation. Publications Office.

[59] NFPA. (2006). NFPA-251. Standard methods of tests of fire resistance of building construction and materials, National Fire Protection Association.

[60] Azhari, F., Heidarpour, A., Zhao, X.L., Hutchinson, C.R. (2015). Mechanical properties of ultra-high strength (Grade 1200) steel tubes under cooling phase of a fire: An experimental investigation, Constr. Build.

Mater., 93, pp. 841–50, Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.082.

[61] Heidarpour, A., Tofts, N.S., Korayem, A.H., Zhao, X.L., Hutchinson, C.R. (2014). Mechanical properties of very high strength steel at elevated temperatures, Fire Saf. J., 64, pp. 27–35, Doi: 10.1016/j.firesaf.2014.01.006.

[62] Kumar, W., Sharma, U.K., Shome, M. (2021). Mechanical properties of conventional structural steel and fire-resistant steel at elevated temperatures, J. Constr. Steel Res., 181, pp. 106615, Doi: 10.1016/j.jcsr.2021.106615.

[63] Poh, K. (2001). Stress-Strain-Temperature relationship for structural steel, J. Mater. Civ. Eng., 13(5), pp. 371–9.

[64] Kodur, V., Harmathy, T. (2008).Properties of building materials. SFPE handbook of fire protection engineering, 4th Ed., P.J. DiNenno, ed., National Fire Protection Association, Quincy, Mass.

[65] Kodur, V. (2014). Properties of concrete at elevated temperatures, ISRN Civ. Eng., 2014, Doi: 10.1155/2014/468510.

[66] Kodur, V., Raut, N. (2010). Performance of concrete structures under fire hazard: emerging trends, Indian Concr. J., 84(2), pp. 23–31.

[67] Bazant, P., Kaplan, M. (1996). Concrete at high temperatures: material properties and mathematical models, Longman Group Limited, Essex, UK.

[68] Phan, L. (1996). Fire Performance of High-Strength Concrete: A Report of the State-of-the-Art, US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology, Office of Applied Economics, Building and Fire Research Laboratory.

[69] Harmathy, T., Allen, L. (1973). Thermal properties of selected masonry unit concretes, NRC Publ. Rec., , pp. 1–15, Doi: 10.4224/40001663.

[70] Kodur, V.K.R., Sultan, M. (1998). Thermal properties of high strength concrete at elevated temperatures, ACI Spec. Publ., 179, pp. 467–80, Doi: 10.14359/6056.

[71] Ma, Q., Guo, R., Zhao, Z., Lin, Z., He, K. (2015). Mechanical properties of concrete at high temperature-A review, Constr. Build. Mater., 93, pp. 371–83, Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.131.

[72] Gehandler, J. (2017). The theoretical framework of fire safety design: Reflections and alternatives, Fire Saf. J., 91(April), pp. 973–81, Doi: 10.1016/j.firesaf.2017.03.034.

[73] Hurley, M.J., Rosenbaum, E.R. (2015). Performance-based fire safety design, Taylor & Francis Group.

[74] Johann, M.A., Albano, L.D., Fitzgerald, R.W., Meacham, B.J. (2006). Performance-Based Structural Fire Safety, J. Perform. Constr. Facil., 20(1), pp. 45–53, Doi: 10.1061/(asce)0887-3828(2006)20:1(45).

[75] ISO. (2021). ISO 16733-2. Fire safety engineering - Selection of design fire scenarios and design fires, Technical specification.

[76] Espinos, A., Romero, M.L., Hospitaler, A. (2012). Simple calculation model for evaluating the fire resistance of unreinforced concrete filled tubular columns, Eng. Struct., 42, pp. 231–44, Doi: 10.1016/j.engstruct.2012.04.022.

[77] Quiel, S.E., Moreyra Garlock, M.E., Paya-Zaforteza, I. (2011). Closed-Form Procedure for Predicting the Capacity and Demand of Steel Beam-Columns under Fire, J. Struct. Eng., 137(9), pp. 967–76, Doi: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0000443.

[78] Franssen, J.M. (2005). SAFIR: A thermal/structural program for modeling structures under fire, Eng. J., 42(3), pp. 143–50.

[79] Vulcan Solutions. Vulcan Solutions.(2010). Vulcan. Available at: http://vulcan-solutions.com/www/. [accessed December 27, 2022].

[80] Jiang, J., Jiang, L., Kotsovinos, P., Zhang, J., Usmani, A., McKenna, F., Li, G.-Q. (2013). OpenSees Software Architecture for the Analysis of Structures in Fire, J. Comput. Civ. Eng., 29(1), Doi: 10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000305.

[81] McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., McDermott, R., Vanella, M. (2016). Sixth Edition Fire Dynamics Simulator User ’s Guide (FDS), vol. Sixth Edit, NIST Special Publication 1019.

[82] Alvarez, A., Meacham, B.J., Dembsey, N.A., Thomas, J.R. (2013). Twenty years of performance-based fire protection design: Challenges faced and a look ahead, J. Fire Prot. Eng., 23(4), pp. 249–76, Doi: 10.1177/1042391513484911.

[83] Meacham, B., Park, H., Engelhardt, M., Kirk, A., Kodur, V., van Straalen, I., Maljaars, J. (2010).Fire and Collapse, Faculty of Architecture Building, Delft University of Technology: Data Collection adn Preliminary Analysis. 8th Int Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods.

[84] Madrzykowski, D., Walton, W.D. (2003). Cook County Administration building fire, 69 west Washington, Chicago, Illinois, october 17, 2003: heat release rate experiments and FDS simulations, NIST Special Publication SP-1021.

[85] NIST. (2005). Final report on the collaps of the World Trade Centrer towers, NIST Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster.