

Conceptos básicos y principales metodologías del diseño estructural para condiciones de incendio según normas internacionales, aplicadas al Reglamento Colombiano de Construcciones Sismorresistentes (NSR-10)

State of the Art in Colombia of the Structural Design for Fire Conditions Under the Colombian regulations for Earthquake Resistant Constructions (NSR10).
Background and Precedents

FABIÁN TORRES ZAFRA¹ - NANCY TORRES CASTELLANOS²

1. Ingeniero civil de la Universidad Católica de Colombia y especialista en Estructuras de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

2. Magíster en Estructuras y doctora en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales. Profesora asociada de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

fabian.torres@conestac.com - nancy.torres@escuelaing.edu.co

Recibido: 20/02/2018 Aceptado: 27/03/2018

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

Entre los principales cambios que trajo la aplicación del reglamento NSR-10, se encuentra el incremento en la seguridad estructural que se les debe proporcionar a las edificaciones, la cual debería preverse desde el mismo inicio de los diseños tanto arquitectónicos como estructurales, para luego aplicarla en la construcción de éstas. Los cambios más notables que trajo la aplicación del reglamento NSR-10 se plasmaron en los títulos F (estructuras metálicas) y J (requisitos de protección contra incendios en edificaciones), en lo referente al diseño estructural para condiciones de fuego, tema integrado en especial para estructuras de acero (dada su vulnerabilidad ante esta acción). En la práctica del diseño estructural en Colombia, este diseño es novedoso, pues su finalidad radica básicamente en que la estructura no puede ser causante de pérdidas de vidas humanas al colapsar ante la acción del fuego.

En el presente artículo se pretende compilar los principales conceptos y premisas del diseño estructural para condiciones de incendio en Colombia (plasmados en la NSR-10), con base en las normas internacionales, y definiendo las metodologías de análisis del diseño estructural más usadas actualmente.

Palabras claves: seguridad estructural, requisitos de protección contra incendios, acción del fuego.

Abstract

In view of the great importance that the construction of civil works has taken for the Colombian economy, becoming as one of its main engines of development and then of the great events and tragedies by earthquake disasters at the global level, Colombian regulations governing the structural design were modified and updated from the Colombian Standards of Design and Construction of Earthquake Resistance - NSR98 (in force since the year of 1998 until 2010), to Colombian regulations of Earthquake Resistant Constructions NSR-10, effective since July 2010. This update and change of norms, applied as a law of the Republic, has brought important content and practical changes in the design and construction of civil works in the national territory, especially in buildings.

Among the main changes brought about by the implementation of the new regulation (NSR10) was the increase in the structural safety that should provide the buildings and which should be planned from the very beginning of both architectural and structural designs to be then applied in the construction of the same. The most notable changes brought by the implementation of the new regulation NSR10, were reflected in the titles F (metal structures) and J (fire protection requirements in buildings), in relation to the structural design for fire conditions, issue addressed especially for steel structures (given their vulnerability to this action). In the practice of structural design in Colombia, this design is novel, because its purpose basically lies on the fact that structures cannot cause human lives to be lost by collapsing as a result of fires.

Keywords: structural safety, fire protection requirements, action of fire.

GENERALIDADES DEL DISEÑO ESTRUCTURAL PARA CONDICIONES DE FUEGO

En la actualidad, para cualquier tipo de construcción en Colombia, cuyo uso principal esté basado en la concentración o reunión de personas a las que hay que preservarles la vida como fin primordial de la estructura (sea ésta un edificio de vivienda, de comercio o de uso recreativo), se deben cumplir las condiciones de seguridad estructural, incluida la resistencia a elevadas temperaturas producidas por el fuego en caso de incendio. Para satisfacer este objetivo se han de cumplir los valores de resistencia estructural ante las altas temperaturas (presentadas en caso de un incendio), e indicados en el Reglamento de Construcciones Sismorresistentes NSR-10.

El diseñador deberá brindar soluciones generadas por cálculos analíticos o criterios prescriptivos, partiendo de la base de contar con los conocimientos básicos sobre el comportamiento de la estructura ante el aumento de la temperatura al producirse un incendio, el cual afectará a la edificación tanto en los materiales que la componen como en la respuesta estructural ante la presencia de estos deltas máximos de temperatura.

CONCEPTOS BÁSICOS

La necesidad de protección de la vida y los bienes frente a los riesgos derivados del fuego hace que los ingenieros con conocimientos en protección contra el fuego tengan cada vez más demanda en diversos sectores, en especial en la construcción tanto de edificios como de obras de infraestructuras; sin embargo, a escala internacional el campo de acción se extiende también al transporte de pasajeros y de mercancías, la industria, el almacenamiento, la selección, ensayo y homologación de materiales y productos, la evaluación de la seguridad, de riesgos o daños, de sistemas de protección contra incendios tanto pasivos como activos, así como la elaboración de planes de evacuación, autoprotección y emergencia.

El ingeniero proyectista en Colombia es responsable de analizar, diseñar y poner en práctica la seguridad (basado en la estabilidad estructural) en un edificio, una industria o cualquier lugar donde haya riesgo para la vida humana en caso de un incendio. La seguridad en caso de incendios requiere conocer los sistemas que van apareciendo en el mercado (cada vez más avanzados tecnológicamente), así como toda la normativa aplicable en cada situación.

Entre los conceptos básicos del análisis estructural para condiciones de fuego plasmados en las normas internacionales y recopilados en la legislación colombiana, se destacan los siguientes:

- **Dinámica de incendios.** Es el estudio de los factores que influyen en el desarrollo y comportamiento de un incendio.
- **Protección contra incendios.** Conjunto de medidas que se disponen en las edificaciones para protegerlas contra la acción del fuego y con las que, generalmente, se trata de conseguir tres fines: salvar vidas humanas (premisa en la NSR10), minimizar las pérdidas económicas producidas por el fuego y conseguir que las actividades de la edificación puedan reanudarse en el plazo más corto posible.

MEDIDAS DE PROTECCIÓN

La protección de las estructuras ante la acción de altas temperaturas generadas por fuego se puede definir en dos tipos:

- **Tipo 1: Protección activa.** Es todo tipo de protección contra el fuego que consista en la instalación de mecanismos automáticos de detección y extinción de fuego, tales como detectores de humo con alarmas sonoras, sistemas de extinción con productos químicos, rociadores automáticos de agua o espuma, entre otros. De igual forma, las protecciones activas fundamentalmente se manifiestan en las instalaciones para extinción de incendios. Se dividen en varios tipos, básicamente detección, alerta y señalización, extinción o presurización de escaleras (ref. 2).
- **Tipo 2: Protección pasiva.** Es todo aquel conjunto de materiales o sistemas constructivos que al ser diseñados evitan la aparición de un incendio y su propagación, protegen a los elementos constitutivos de las edificaciones ante la acción del fuego y favorecen la extinción de este (ref. 2).

La protección pasiva también incluye todas las medidas que afectan al diseño o la construcción estructural de una edificación, en primer lugar, facilitando la evacuación de los usuarios presentes en caso de incendio mediante vías de suficiente amplitud, cuya estabilidad

estructural se encuentre garantizada, y en segundo término, retardando y confinando la acción del fuego para que no se extienda muy deprisa o se detenga antes de invadir otras zonas.

METODOLOGÍAS DE DISEÑO

Las metodologías de diseño estructural para condiciones de altas temperaturas originadas por el fuego (en caso de incendio) son conceptualmente similares al diseño estructural para condiciones de temperatura ambiente, aunque pueden presentar (según el tipo de metodología que se va a usar) un grado de mayor dificultad debido a diversos factores adicionales que hay que considerar, entre ellos las fuerzas internas inducidas por dilatación térmica, y la reducción de capacidad estructural debido a las temperaturas elevadas y las grandes deflexiones (ref. 3).

Diseño prescriptivo

La premisa de diseño se basa en definir un nivel aceptable de protección contra un fuego de diseño, cuantificado en términos de riesgos. Es un método de diseño básico que se fundamenta en la demostración de los criterios básicos generales de la normativa plasmada en el título J de las NSR-10 (ref. 4).

Diseño por prestaciones o desempeño

Un diseño estructural completo para condiciones de incendio, basado en prestaciones o desempeño, es un término que se refiere a una respuesta estructural óptima, dada por un elemento o conjunto de elementos de una edificación ante la acción de cargas o esfuerzos actuantes en ella (ref. 4).

Para el diseño basado en prestaciones o desempeño se necesita un nivel superior de habilidad en ingeniería por parte del equipo de diseño, comparado con el diseño prescriptivo tradicional. Se requiere un esfuerzo de ingeniería superior, que si bien puede afectar el costo del diseño, se acaba traduciendo en importantes ahorros al conseguir los niveles de seguridad solicitados, con base en las soluciones más económicas.

CONOCIMIENTOS BÁSICOS PARA EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL EN CONDICIONES DE FUEGO

Desde el punto de vista normativo, la mayoría de los casos de análisis estructural suelen estar contemplados en los códigos internacionales, sean americanos o europeos (base de las NSR-10); por ello, para realizar tales estudios se deben seguir las directrices y metodologías indicadas en éstos, por lo que debe entenderse como un análisis dentro del marco normativo y cuyas principales bases conceptuales están definidas por los siguientes parámetros.

Severidad del incendio y resistencia al fuego

La mayoría de las edificaciones están conformadas por elementos constructivos, tales como muros de cerramientos, muros interiores y cubiertas, que son soportados por elementos o sistemas estructurales, ya sean aportados o por muros de carga. Para evitar el colapso de la edificación, los elementos estructurales deben tener una capacidad portante suficiente durante todo el desarrollo del incendio. En otras palabras, el fallo estructural ocurrirá si la carga aplicada excede la capacidad portante del conjunto en algún momento durante el incendio (ref. 3).

En estructuras sencillas, el colapso de un elemento conduce al colapso de toda la estructura. En estructuras más complejas es posible que éstas sobrevivan a un incendio, aun cuando uno o varios elementos hayan perdido su capacidad portante. Esto es algo que a temperatura ambiente no ocurre y se debe a las fuerzas interiores que aparecen como consecuencia de las interacciones de unos elementos con otros, inducidas por la dilatación térmica.

La directriz en el diseño de estructuras en situación de incendio consiste en verificar que la resistencia de la estructura (o parte de ella) sea superior a la severidad del incendio a la que dicha estructura está expuesta. Esta verificación requiere que se cumpla la siguiente ecuación de diseño:

$$\text{Resistencia al fuego} \geq \text{severidad del incendio}$$

La resistencia al fuego de la estructura es una medida de su capacidad para resistir el colapso, mientras que la severidad del incendio es una medida de su potencial destructivo que podría llegar a producir el colapso de la estructura.

El factor tiempo

El tiempo transcurrido hasta la falla o colapso de uno o varios elementos estructurales de una edificación representan el grado de resistencia al fuego de dichos elementos (*fire resistant rating*). Los grados de resistencia al fuego de los materiales constitutivos de los elementos estructurales están basados en ensayos a escala real, para los cuales se utiliza una exposición a un fuego de tipo estándar.

La duración de un incendio es lo que normalmente se especifica en las normativas de resistencia estructural para condiciones de fuego (títulos F y J de las NSR-10), como una medida del grado de severidad del incendio en cuestión. Cuando es dado por normas, está referido a un incendio tipo estándar o parametrizado (curva ISO834, en el caso colombiano).

Resistencia estructural ante el fuego

La resistencia al fuego (o grado de resistencia al fuego) normalmente se cuantifica como el tiempo en el que un elemento cumple un criterio definido durante la exposición a un ensayo estándar de resistencia al fuego (nominal). La resistencia al fuego de un elemento estructural también se puede cuantificar según la temperatura crítica o la capacidad portante máxima que puede llegar a soportar dicho elemento durante un incendio.

El grado de resistencia al fuego de un elemento (*rating*) es la resistencia al fuego asignada a ese elemento estructural, para comparar con la severidad del incendio especificada en las normas o códigos de diseño y comprobar su adecuación. El grado depende de muchos factores, siendo los principales la severidad del incendio, el material constitutivo, sus propiedades geométricas, los grados de libertad y las cargas aplicadas durante el incendio (ref. 3).

Ensayos de resistencia al fuego

Los ensayos de resistencia al fuego de los elementos estructurales no pretenden simular incendios reales. El propósito es proporcionar un método común que permita comparar la capacidad portante entre diferentes tipos de estructuras.

Los ensayos a escala real (que también pueden ser a pequeña escala) se llevan a cabo para elementos o par-

tes de una estructura (subestructura) representativa de las edificaciones, con el objeto de determinar su grado de resistencia al fuego, de tal modo que al instalar una estructura similar en un edificio real se les pueda asignar el mismo grado de resistencia al fuego.

Esto supone una simplificación muy importante y se aleja mucho de la realidad, ya que existen muchas diferencias entre el escenario de incendio del ensayo y el escenario de un incendio real. Normalmente, hay diferencias de tamaño entre las estructuras que hay que comparar, cargas aplicadas, condiciones de contorno (grados de libertad) y tipos de fuego al que están expuestas.

En este tipo de ensayos se presenta un problema con respecto a las cargas aplicadas, debido a que todo elemento al que se le exige cumplir con un criterio de estabilidad frente al fuego se debe ensayar con la acción de la carga aplicada. Los elementos ensayados sin carga conducen a resultados no seguros, ya que no permiten valorar el efecto de las deformaciones por la acción del incendio. De hecho, el nivel de carga sobre un elemento estructural durante un incendio real puede tener un efecto clave en su rendimiento o capacidad portante (ref. 3).

Criterio de colapso

Para alcanzar las condiciones de estabilidad, un elemento estructural debe mantener su capacidad portante por la acción de las cargas aplicadas durante el tiempo del ensayo o del incendio, sin producirse el colapso.

El estándar para muchos ensayos es tener una limitación de la deformación o una limitación en la velocidad a la que se produce la deformación, de tal forma que se detenga el ensayo antes de que se produzca el colapso de la estructura y pueda dañar el horno de pruebas. Un criterio de fallo común es limitar la deformación a 1/20 de la luz/envergadura o también limitar la velocidad de deformación a 1/30 de la luz/envergadura.

Por lo que se ha descrito, en los procedimientos de cálculo estructural en situación de incendio establecidos especialmente en el Eurocódigo y, por lo tanto, en las NSR10, se contemplan diversas opciones de análisis, que permiten utilizar modelos de cálculo estructural de tipo simplificado o modelos de cálculo de tipo avanzado, a partir de acciones térmicas generadas por fuegos nominales o por acciones térmicas calculadas a

partir de los parámetros físicos y químicos generados por fuegos reales.

COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES ESTRUCTURALES A TEMPERATURAS ELEVADAS EN SITUACIÓN DE INCENDIO

Para una correcta aplicación de los criterios del diseño estructural para condiciones de fuego, es indispensable conocer el comportamiento de los materiales utilizados en la construcción ante la incidencia de las altas temperaturas sobre ellos, sean éstos de piedra, madera, acero, concreto o cerámicos, entre otros.

Cuando los materiales se encuentran en su estado puro, es decir, no disponen de ningún tipo de protección o revestimiento, sufren de un modo más incisivo la acción del fuego; por ejemplo, el acero es, por lo general un elemento que, sometido a las temperaturas de un incendio, constituye por sí mismo un riesgo considerable; el calor se expande rápidamente en él, y cuando el material sustenta cargas, presenta con facilidad colapsos en su estructura.

Con el incremento de temperaturas también se desarrollan otros comportamientos adversos, como la expansión excesiva y la plastodeformación progresiva acelerada. Sin embargo, los parámetros de diseño importantes a temperaturas normales son equivalentes a los parámetros que deben tomarse en cuenta para elevadas temperaturas. A continuación se presentarán las afectaciones más importantes a que pueden verse sometidos los elementos estructurales, dependiendo del material.

El acero estructural

Este material estructural se implementó desde el siglo XIX, especialmente en la construcción de puentes, edificios, y hoy en día debido a su gran versatilidad en todo tipo de construcciones y edificaciones. El acero es un buen conductor del calor, una de las formas clásicas de la transmisión del calor (conducción), debido a que el hierro (elemento mayoritario en la composición del acero), como metal que es, posee electrones libres, lo que puede propagar el calor fácilmente a través de elementos contruidos con este material (vigas, columnas o paneles), originando nuevos focos térmicos que expanden el área de calor a una nueva combustión (ref. 1).

El acero estructural pierde dos tercios de su resistencia inicial, en proporción al aumento y dirección de la carga a la cual se somete, comenzando por pandear y ceder, con el consiguiente arrastre del resto de los elementos portantes de la construcción. Cuando una viga de acero cede, y ésta forma parte de un armazón estructural, se producirá simplemente un desplome local; dentro de la importancia de oponerse o resistir al incendio en conjunto, se comprende la necesidad de dotar a estos elementos estructurales de una protección acorde con su naturaleza o condiciones.

Concreto reforzado

Por su parte, el concreto reforzado, implementado desde finales del siglo XIX, es uno de los desarrollos más importantes del hombre. El concreto con respecto al fuego tiene por lo general una buena resistencia, la cual se define por el periodo de tiempo en que mantiene su comportamiento ante las temperaturas que se observan en el espectro de un incendio. En relación con la tracción y la flexión, las resistencias del concreto ante el fuego son las más afectadas. En cambio, esta acción es mucho menor en la resistencia a la compresión, estableciendo en términos generales una reducción en la resistencia a compresión de un 80 % a unos 800 °C. Ante un incendio, incluso aquellos materiales considerados tradicionalmente como incombustibles (concreto) no son lo bastante seguros contra el fuego. Si se considera que en un incendio se alcanzan fácilmente 600 °C a los 10 minutos de su inicio, y los 1200 °C a los 20 minutos, se comprende que incluso el concreto no es absolutamente seguro. A los 1000 °C la grava se disgrega y el cemento se deshidrata. Si se mantiene una temperatura de entre 1000 y 1200 °C durante un tiempo aproximado de tres horas, los efectos del fuego sobre el concreto serán, con toda seguridad, nefastos. Los elementos de concreto se disgregan a una velocidad de unos 4 cm por hora y las armaduras a estas temperaturas, dejan de cumplir su función.

El concreto ante la presencia de altas temperaturas, aunque lentamente, puede desintegrarse hasta su total destrucción, incluyendo la corrosión de su armadura (ref. 5).

La madera

Este material, por su fácil adquisición, se ha utilizado mucho a lo largo de la historia de la humanidad, con finalidades ya sean estructurales o arquitectónicas. Ante un incendio, la madera, como elemento estructural, posee la peculiaridad de absorber gases y vapores sin experimentar daños aparentes, si bien transcurrido un tiempo la madera puede desprender progresivamente los ácidos absorbidos, clorhídrico y cianhídrico, entre otros.

La madera, al estar construida básicamente por celulosa, constituye un elemento muy combustible y en ciertas condiciones, al carbonizarse, puede proporcionar integridad razonable en un incendio. Las dimensiones físicas y el contenido de humedad son factores elementales para reconocer la influencia en la resistencia al fuego (ref. 6).

Materiales de bajo poder comburente

Hay muchos más materiales usados en la construcción de edificaciones diferentes del acero, concreto y madera, que representan un volumen alto o una buena superficie. Las particiones no portantes de carga, acabados, materiales de aislamiento y servicios son parte importante para considerar en el análisis de edificios para el caso de incendio, donde hay materiales que pueden ser térmicamente inertes, o incombustibles, tales como el vidrio, el yeso, el concreto liviano, el asbesto y la mampostería (ref. 6).

Vidrio

Se utiliza elementalmente como cristal de puertas y ventanas, como aislamiento en la fibra de vidrio y como refuerzo para productos de construcción. Como protector ante altas temperaturas, la fibra de vidrio es un aislante excelente de calor dado que no se quema rápidamente ni es un buen transmisor de éste; sin embargo, aunque se encuentra cubierto con un aglomerante resinoso, combustible y con la capacidad de propagación de llamas, es un proceso de propagación lento y por lo tanto se le considera como material protector y retardante en caso de un incendio (ref. 6).

Yeso

Los productos que contienen este elemento son muy buenos materiales para la protección contra incendios (el mortero y los paneles de yeso, por ejemplo). Químicamente, el yeso tiene una proporción alta de agua mezclada, por lo que se requiere una elevada energía para evaporar el agua. Por lo anterior, se considera uno de los materiales retardantes de bajo costo de gran efectividad.

Concreto liviano

Este material, elaborado con agregados incombustibles, resiste altas temperaturas sin degradarse. Los concretos livianos más comunes son la vermiculita y la perlita (ref. 6).

Asbesto

Corresponde a una fibra mineral que era protagonista de la mayor parte de las construcciones. Antes se empleaba como aglutinante y formaba un muy buen agente ignífugo pero actualmente, por motivos de salubridad, está prohibido su uso.

Mampostería

Los productos que la componen, como el ladrillo, la baldosa y el concreto, muestran un buen comportamiento frente a un incendio. Los bloques huecos tienen una facilidad de rotura cuando son sometidos a altas temperaturas, manteniendo sin embargo su integridad. En cambio, el ladrillo tolete o refractario puede soportar altas temperaturas y no sufrir daños graves.

SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA EL FUEGO DE ESTRUCTURAS DE ACERO

Diferentes sistemas de protección contra el fuego comúnmente utilizados en estructuras de acero son barreras antitérmicas de tipo pasivo, ya sean aplicadas por aspersión o instaladas sobre los elementos que hay que proteger (ref. 7).

Sistemas de aplicación por aspersión de materiales resistentes al fuego

Estos sistemas, llamados SFRM (*Sprayed Fire Resistive Materials*, por su sigla en inglés), se pueden clasificar en dos grupos básicos: a base de fibra o cementantes (ref. 8). A pesar de lo que sugieren estas categorías, un cemento Pórtland a base de yeso o cemento proporciona cohesión a ambos tipos de SFRM. Entre los principales sistemas de protección por aspersión se encuentran los siguientes:

SFRM fibrosa

Este sistema con fibras, creado por la fusión de roca o escoria de hierro y los materiales en hilado de la lana, produce una masa filamentosa ligera con propiedades incombustibles. La aplicación de materiales fibrosos SFRM consta de una mezcla de agentes adhesivos y fibras en seco, con agua en la boquilla de la manguera, que luego se rocía echando el material mezclado para cubrir el elemento que se va a proteger. La ASTM-C1014 normaliza este tipo de protección.

SFRM cementantes

Por lo general, contienen minerales de yeso que brindan protección contra incendios para elementos estructurales a través de la liberación de yeso, combinando químicamente el agua en forma de vapor. También se proporciona una protección adicional mediante la inclusión de vermiculita o perlita como agregados, que se expanden y aíslan térmicamente en condiciones de calentamiento extremo. Los SFRM cementantes se preparan mezclándolos en una tolva y se aplican bajo presión en una boquilla de pulverización.

Cartones minerales

Es un conjunto compuesto por placas mediante el hilado de fibras minerales y lanas comprimidas con roca volcánica y resinas. Estas placas forman barreras resistentes al fuego, constituyendo un sello hermético alrededor de los elementos estructurales. Los tableros de fibra mineral tienen la ventaja de que pueden ponerse en condiciones climáticas exteriores y no se ven afectados significativamente por las condiciones de la superficie del acero que están protegiendo. Esto per-

mite que el cartón pueda colocarse en lugares donde es difícil el acceso, o para reequipar las condiciones de protección contra el fuego de un elemento estructural. La ASTM-C612 especifica los requerimientos, los límites de temperatura, densidad y condiciones térmicas relevantes, dadas las características físicas de los tipos de placas estándar.

Recubrimientos intumescentes

Son películas químicas finas que incluyen una mezcla de aglutinantes, resinas, cerámica refractaria y rellenos. Estas películas se expanden a elevadas temperaturas y forman una duradera y adherente capa de espuma celular resistente al fuego. La capa de espuma actúa como un disipador de calor apreciable durante la intumescencia, y luego, como un aislante razonable, le proporciona a la película calidades estéticas deseadas, a la vez que brinda protección contra la humedad, la abrasión y los productos químicos. Los revestimientos se ponen de manera similar a la pintura, y pueden aplicarse con rodillos, pinceles o equipo de pulverización. Algunas aplicaciones requieren el uso de una malla de refuerzo de fibra de vidrio entre capas de recubrimientos intumescentes. El espesor del revestimiento puede ser variable y tener clasificaciones de resistencia al fuego de hasta tres horas.

Sistemas tipo barrera de materiales resistentes al fuego

En la guía de diseño de este tipo de protección, publicada por el Instituto Americano de la Construcción en Acero (AISC, por su sigla en inglés) (ref. 1), se sugiere que se desprece el aporte de la resistencia de estos sistemas a la estabilidad estructural del edificio, siempre y cuando ésta no aumente más de un 15 % al colocar el mecanismo protector; sin embargo, su peso siempre debe cuantificarse al estimar las cargas de servicio permanentes de la estructura. Al considerar la capacidad estructural conjunta del elemento metálico y su mecanismo de protección contra el fuego en el diseño estructural, se debe asegurar la efectividad de la unión entre ambos. Entre los principales sistemas de protección tipo barrera se encuentran:

Protección sólida

Se rodea el elemento estructural con concreto corriente o de baja densidad, presumiendo que el concreto no cumple función estructural, sino que sólo aporta resistencia al fuego al ser aplicado como aislante del acero ante la acción de éste. El espesor del recubrimiento de concreto dependerá de la resistencia al fuego requerida para el elemento estructural. El concreto es moldeado mediante el encofrado (AISC, 2003) (figuras 1 y 2). Esta solución también es posible de aplicar dejando los elementos de acero parcialmente expuestos (por ejemplo, aplicando concreto sólo en el interior de las alas), lo que reduce el uso de encofrado.

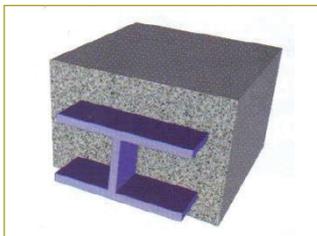


Figura 1. Elemento recubierto con protección sólida.

Fuente: AISC, 2003.



Figura 2. Elemento recubierto parcialmente con protección sólida.

Fuente: AISC, 2003.

Recubrimientos con mampostería

Esta solución, aplicada frecuentemente en las construcciones de fines del siglo XIX en Chicago, se utiliza a menudo en protección de columnas. Consiste en cubrir el elemento estructural con una pared de bloques de mampostería (figura 3). Dentro de la mampostería de protección se han generado nuevas alternativas, como bloques de concreto celular, bloques de concreto corriente, paneles premoldeados de concreto y bloques con fibra de vidrio.

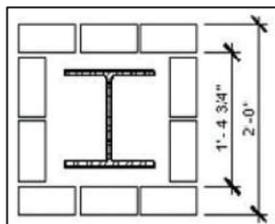


Figura 3. Protección con mampostería.

Fuente: AISC, 2003.

Recubrimiento con láminas

El recubrimiento con paneles en forma de cajón en torno a los elementos de acero es una solución aplicada cada vez con mayor frecuencia (figura 4). Normalmente, se utilizan planchas de yeso-cemento normal o con agregados que mejoran su resistencia al fuego (muchas veces denominadas planchas RF), o variantes de éstas, como los paneles con adición de fibrosilicatos. El recubrimiento puede ser parcial o en todo el contorno. La combinación de sulfato de calcio con el agua en estas placas retrasa el paso del fuego a través de ellas (AISC, 2003). El dimensionamiento del recubrimiento dependerá de las características del panel que se va a utilizar y de la resistencia al fuego requerida para el elemento estructural.

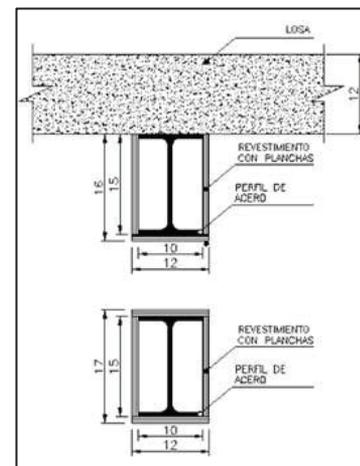


Figura 4. Protección con paneles.

Fuente: AISC, 2003; www.Construmatica.com.

Morteros

Existen diversas soluciones de aplicación de morteros, ya sea tradicionales o con aditivos (como perlita o vermiculita), que se aplican siguiendo el contorno de

los perfiles que hay que proteger y que mejoran sensiblemente su resistencia al fuego.

Debido al riesgo para la salud, en muchos países ya está prohibido el uso del asbesto, que se aplicó ampliamente a mediados del siglo pasado, pero que terminó remplazado por el mortero. En el caso de aplicaciones tradicionales, se deben considerar mallas o elementos de anclaje mecánico que mejoren la adherencia entre el mortero y el acero. También se aplica en forma de *spray* o mortero proyectado. El espesor del recubrimiento dependerá de las características del mortero que se va a utilizar y de la resistencia al fuego requerida para el elemento estructural. Como generalmente es lanzado, su acabado es rugoso (figura 5).



Figura 5. Protección contra fuego con mortero.

Fuente: AISC, 2003; www. Construmatica.com.

Mantas protectoras

Existen mantas de fibra cerámica y de lana de roca (lana mineral) que se pueden aplicar como recubrimiento semejante al tipo cajón o de contorno de perfiles. En aplicaciones de contorno se fijan mecánicamente al elemento de acero mediante tacos soldados y arandelas, a una distancia no superior a 300 mm en todos los sentidos. Aplicaciones tipo cajón son más económicas, pero no deben usarse en perfiles de almas superiores a 150 mm sin el empleo de una malla auxiliar de fijación que evite las deformaciones y apertura de los encuentros o empalmes.

Pinturas o masillas intumescentes

Son pinturas inertes a bajas temperaturas pero que reaccionan a temperaturas superiores a los 200 °C,

generando una película protectora en forma de esponja que aumenta hasta 50 veces su espesor inicial y otorga una importante aislación térmica que mejora la resistencia al fuego del elemento protegido (ref. 8). En algunos países la aplicación de las pinturas intumescentes está limitada a un cierto rango de resistencia al fuego exigible y a una masividad mínima del elemento que hay que proteger (figura 6).



Figura 6. Aplicación sobre una estructura de la pintura intumescente.

Fuente: Scherwin-Williams, "Pinturas intumescentes", 2012.

Relleno de miembros huecos

Con frecuencia se puede aprovechar el espacio interior de los perfiles tubulares para rellenarlos con elementos que actúen como masa térmica, absorbiendo parte de la energía del calor proveniente del incendio. Hay experiencias con concretos, concreto celular e incluso agua (en este último caso, asociado a sistemas de circulación y enfriamiento del agua) (figura 7).

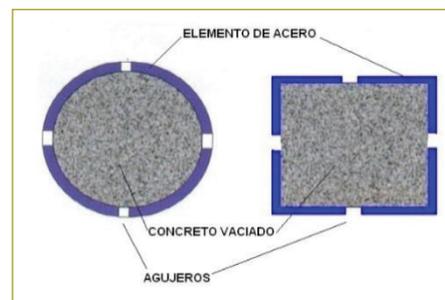


Figura 7. Protección contra incendio con relleno de concreto.

Fuente: AISC, 2003.

Sistemas estructurales para resistencia al fuego

En general, los riesgos de incendio provienen del interior de las edificaciones, por lo que se deben cuidar especialmente las estructuras que están confinadas al

espacio interior. Una solución interesante es llevar la estructura soportante (o parte de ella) al exterior del edificio, limitando o reduciendo los requerimientos de protección pasiva. Unida a esta estrategia se puede agregar el concepto de pantallas.

Pantallas. Las pantallas interiores o perimetrales de un edificio, así como los cielos falsos, ofrecen la oportunidad de aportar protección frente al fuego en la medida en que puedan asegurar la integridad, el aislamiento y la estabilidad del conjunto. Se usan, generalmente, en edificios de baja altitud y con estructura expuesta (figura 8).



Figura 8. Protección con pantallas.

Fuente: <http://www.arquitecturaenacero.org>, 2011.

PROTECCIÓN ESTRUCTURAL CONTRA EL FUEGO EN COLOMBIA

La NSR-10, en el título J (ref. 9), señala los requisitos de protección contra el fuego en edificaciones; sin embargo, en el título F, referente a estructuras metálicas, impone premisas básicas pero obligatorias del diseño de la protección contra el fuego en estructuras metálicas. Los requisitos dados en las NSR-10 para la protección contra el fuego se basan en reducir en la medida de lo posible el riesgo de incendios en edificaciones, evitar la propagación del fuego tanto dentro de las edificaciones como en las estructuras aledañas, facilitar las tareas tanto de evacuación de los ocupantes de las edificaciones en caso de incendio como el proceso de extinción del fuego y, finalmente, minimizar el riesgo de colapso de la estructura durante las labores de evacuación y extinción.

La terminología dada por la ingeniería de fuego generó nuevas expresiones y conceptos, a los cuales el cuerpo de ingenieros y constructores colombianos no estaban acostumbrados, por lo cual se presentaron confusiones, dado que la tecnología de punta del diseño de la resistencia estructural para condiciones de fuego es aún muy incipiente en el país.

En cuanto a los principales requisitos para el análisis de la resistencia contra incendios en las edificaciones según las NSR-10, el diseñador estructural debe clasificar la edificación conforme a diferentes conceptos, tales como grupos de ocupación (tabla 1) y tipo de función que ha de cumplir la edificación.

Tabla 1
Grupos y subgrupos de ocupación

Grupos y subgrupos de ocupación	Clasificación
A	ALMACENAMIENTO
A-1	Riesgo moderado
A-2	Riesgo bajo
C	COMERCIAL
C-1	Servicios
C-2	Bienes
E	ESPECIALES
F	FABRIL E INDUSTRIAL
F-1	Riesgo moderado
F-2	Riesgo bajo
I	INSTITUCIONAL
I-1	Reclusión
I-2	Salud o incapacidad
I-3	Educación
I-4	Seguridad pública
I-5	Servicio público
Grupos y subgrupos de ocupación	Clasificación
L	LUGARES DE REUNIÓN
L-1	Deportivos
L-2	Culturales y teatros
L-3	Sociales y recreativos
L-4	Religiosos
L-5	De transporte
M	MIXTO Y OTROS
P	ALTA PELIGROSIDAD
R	RESIDENCIAL
R-1	Unifamiliar y bifamiliar
R-2	Multifamiliar
R-3	Hoteles
T	TEMPORAL

Fuente: NSR-10, título J.1.1.2.

La normativa colombiana NSR-10, en su título J, se acoge a los modelos prescriptivos y prestacionales, e implementa requisitos generales tales como las configuraciones arquitectónica, estructural, eléctrica

e hidráulica necesarias para determinar la protección adecuada contra incendios en edificaciones, así como las especificaciones mínimas que deben cumplir los materiales utilizados con el propósito de dar protección contra la propagación del fuego en el interior de la edificación y a las estructuras aledañas (tabla 2).

Tabla 2

Clasificación de los materiales según sus características de propagación de llama

Clase	Materiales
1 Índice de propagación de la llama 0 a 25	<ul style="list-style-type: none"> • Pañetes de cemento. • Cartón de fibrocemento. • Fibroasfalto. • Placas planas de fibrocemento. • Placas planas de fibrosilicato. • Ladrillo. • Baldosas de cerámica. • Lana de vidrio sin aglutinantes ni aditivos. • Vidrio. • Algunos azulejos antiacústicos.
2 Índice de propagación de la llama 26 a 75	<ul style="list-style-type: none"> • Hoja de aluminio sobre respaldo apropiado. • Cartón de fibra o yeso con revestimiento de papel. • Madera tratada mediante impregnación. • Algunos pañetes antisonoros. • Algunos azulejos antiacústicos.
3 Índice de propagación de la llama 76 a 225	<ul style="list-style-type: none"> • Madera de espesor nominal de 2,5 cm o más. • Planchas de fibra con revestimiento a prueba de fuego. • Azulejo antiacústicos, combustible, con revestimiento a prueba de fuego. • Cartón endurecido. • Algunos plásticos.
4 Índice de propagación de la llama Más de 225	<ul style="list-style-type: none"> • Papel asfáltico. • Tela. • Viruta. • Superficies cubiertas con aceite o parafina. • Papel. • Plásticos, sin grado que permita asignarlos a otras clases. • Algodón.

Fuente: NSR-10, título J.2.5.2.

Como en otras normativas, la NSR-10 prescribe en sus literales del título J (ref. 9) las características de propagación de llama o fuego de los materiales que se han de utilizar en los acabados interiores; en especial, hace énfasis en no emplear materiales que al ser expuestos al fuego produzcan, por descomposición o combustión, sustancias tóxicas en concentraciones superiores a las

provenientes del papel o de la madera, en las mismas condiciones.

El concepto de resistencia requerida al fuego define las edificaciones en función de los grupos de ocupación divididos en tres categorías, según el riesgo de pérdida de vidas humanas o amenaza de combustión (tabla 3).

Tabla 3

Clasificación requerida del índice de propagación de llama para acabados interiores, de acuerdo con el grupo de ocupación de cada edificación

Grupo de ocupación Medios de salida Normales Corredores	Ubicación del acabado interior				
	Espacios con áreas < 170 m ²	Corredores	Espacios con áreas > 170 m ²	Espacios con áreas > 170 m ²	
ALMACENAMIENTO	(A-1)	1	1	2	3
	(A-2)	1	1	2	3
COMERCIAL	(C-1)	1	1	3	3
	(C-2)	1	1	2	3
ESPECIAL	(E)	1	1	2	2
FABRIL E INDUSTRIAL	(F-1)	1	2	2	2
	(F-2)	1	2	2	3
INSTITUCIONAL	(I-1)	1	1	2	2
	(I-2)	1	1	2	2
	(I-3)	1	1	2	3
	(I-4)	1	2	2	3
	(I-5)	1	2	3	3
LUGARES DE REUNIÓN	(L)	1	1	2	2
MIXTO Y OTROS	(M)	1	1	2	3
ALTA PELIGROSIDAD	(P)	1	1	2	2
RESIDENCIAL	(R-1)	2	2	4	4
	(R-2)	1	1	2	2
	(R-3)	1	1	2	2
TEMPORAL	(T)	1	2	3	3

Fuente: NSR-10, título J.2.5.

De igual manera cada tipo de edificación debe clasificarse en una de las categorías de riesgo (según su grupo de uso) (tabla 4), en función del área construida (tabla 5) o en función del potencial combustible estimado (tabla 6).

La resistencia al fuego especificada por los códigos modelo e implementados en la NSR-10 depende de la carga de fuego y de la altura y finalidad de la construcción. Las reglamentaciones se basan en dos conceptos, en los cuales debe ser posible evacuar a todos los ocu-

pantes de la edificación o que el incendio se extinga autónomamente sin causar ninguna catástrofe, aun si los bomberos no son capaces de hacerlo.

Tabla 4

Clasificación según categoría de riesgo de pérdida de vidas humanas o riesgo de combustión

Categoría	Grupo de edificaciones
I	Edificaciones con mayor riesgo de pérdida de vidas humanas o con alta amenaza de combustión
II	Edificaciones de riesgo intermedio
III	Edificaciones con baja capacidad de combustión

Fuente: NSR-10, título J.3.3.1.

Tabla 5

Clasificación de resistencia contra el fuego de una edificación, según su uso, área construida y número de pisos

Grupos y subgrupos de ocupación	Área total construida, AT m ²	Número de pisos						
		1	2	3	4	5	6	≥ 7
(C-1)	AT > 1500	III	III	II	II	II	I	I
	AT < 1500	III	III	III	II	II	II	I
(C-2)	AT > 500	II	I	I	I	I	I	I
	AT < 500			II	I	I	I	I
(E)	Sin límite	III	III	III	II	II	II	I
(I-2), (I-4)	AT > 1000	III	II	II	I	I	I	I
	500 < AT < 1000	III	III	II	II	I	I	I
	AT < 500	III	III	III	II	II	II	I
(I-3)	AT > 1000	II	II	I	I	I	I	I
	AT < 1000		III	II	II	I	I	I
(L-1), (L-2), (L-3), (L-4)	AT > 1000	II	I	I	I	I	I	I
(L-5), (I-1), (I-5)	500 < AT < 1000	II	II	I	I	I	I	I
	AT < 500	III	III	II	II	I	I	I
(R-1), (R-2)	Unidades > 140 m ²				II	I	I	I
	Unidades ≤ 140 m ²				III	II	II	I
(R-3)	AT > 5000	III	II	I	I	I	I	I
	AT < 5000	III	II	II	II	I	I	I

Fuente: NSR-10, título J.3.3.2.

En cuanto a las excepciones de las estructuras que no requieren cuantificación de la resistencia al fuego dadas en el literal J.3.3.3, se definen para edificaciones aisladas

de un solo piso en general y limitadas a dos (excepto cuando almacenan materiales altamente inflamables), según su uso, área o ventilación, siempre y cuando se cumpla la finalidad de preservar la vida humana, logrando que los ocupantes pueden salir del edificio fácil y rápidamente. De acuerdo con las NSR-10, las edificaciones de dos o tres pisos requieren una resistencia al fuego baja si son residenciales, pero si la edificación corresponde a un hospital o a un hotel, la resistencia al fuego debe considerarse como criterio de diseño.

Tabla 6

Clasificación de resistencia contra el fuego de una edificación, según su uso, densidad de carga de combustible y número de pisos

Grupos de ocupación de las edificaciones	Potencial combustible Cc (MJ/m ²)	Requieren protección				
		Número de pisos				
		1	2	3	4	≥ 5
(A-1), (A-2)	CC > 8000	II	II	I	I	I
	4000 < CC < 8000	III	II	II	I	I
	CC < 4000	III	III	III	II	I
(F-1), (F-2)	CC > 8000	I	I	I	I	I
	4000 < CC < 8000	II	II	I	I	I
	2000 < CC < 4000	III	II	II	I	I
(P)	CC > 8000	III	III	II	II	I
	4000 < CC < 8000	II	I	I	I	I
	CC < 4000	III	II	II	I	I

Fuente: NSR-10, título J.3.3.2.

CONCLUSIONES

La implementación de la NSR-10 en Colombia trajo complicaciones para la realización de proyectos en acero con respecto a la evaluación del diseño para condiciones de incendio, dado que para estos análisis se debe tener un conocimiento del comportamiento estructural de las edificaciones ante la acción del fuego, al igual que un conocimiento de los procedimientos matemáticos y físicos, base de este tipo de diseño.

Debido a que el ingeniero estructural formado en Colombia no posee los conocimientos requeridos para este tipo de diseño (en ningún pénsum de las universidades colombianas se ha contemplado en estudios de pregrado o posgrado este campo del análisis estructural), al implementarse las normas plasmadas en el literal

F.2.18 de las NSR-10, se generó un gran vacío tanto académico como implementativo de esta ley.

En el diseño por fuego regido por la NSR-10 (en especial para las estructuras de acero), se implementaron en sus títulos F y J varios códigos simultáneamente, como las normas europeas (Eurocódigos) y las normas americanas (ASTM e ISO). Esto generó un problema de aplicación de códigos internacionales, dado que lo que se permite en los Eurocódigos no necesariamente se permite en los códigos americanos.

Debido al desconocimiento de las metodologías de diseño para condiciones de incendio, se está presentando a escala nacional una práctica deficiente del diseño estructural para edificaciones de acero, en la que se evita el diseño obligatorio requerido en el literal F.2.18 y se aplican literales del título J en diseños prescriptivos simplificados.

El diseño estructural para condiciones de fuego no debe ser un factor desfavorable para el uso de estructuras de acero, dado que un análisis bien hecho optimiza la estructura y no necesariamente implica un mayor peso y costo económico de la edificación.

RECOMENDACIONES

Al implementar códigos internacionales en la legislación estructural colombiana, se debería tener conciencia de que su aplicabilidad y su uso en la comunidad estructural nacional han de tener un tiempo de desarrollo para conocerlos y aplicarlos bien. Por lo tanto, se recomienda desarrollar programas institucionales en estudios de pregrado y posgrado, en los que se actualicen los conocimientos de análisis estructural vigentes en el ámbito internacional que han de aplicarse a escala nacional, facilitando la adquisición y actualización de conocimientos de este grupo de profesionales.

REFERENCIAS

- National Fire Protection Association (1995). *Preface - Handbook of Fire Protection Engineering*. Massachusetts.
- Aroztegi, J. (2001). *Construcción segura al fuego*. Madrid.
- Instituto Técnico de la Estructura en Acero (ITEA) (2006). *Construcción segura al fuego*. Madrid.
- Eurocódigo (2006) (EC2-2004, EC3-2005, EC4-2005, EC5-2004, EC6-2005, EC9-1998).
- Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto, A.C. (1999). *Estructuras de concreto resistentes al fuego*. México, D.F.
- National Fire Protection Association (1995). *General provisions. Handbook of Fire Protection Engineering*. Massachusetts.
- Sika (2009). *Manual técnico*. Sistemas de protección contra el fuego. Bogotá.
- Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente NSR-10. NSR-10. Títulos F y J, Bogotá, D.C.