

**PRÁCTICA EMPRESARIAL CON LA EMPRESA PERALTA INGENIERÍA S.A.S
EN EL DESARROLLO DE UN INSTRUCTIVO DE PROTECCIÓN PASIVA
CONTRA FUEGO DE ESTRUCTURAS DE ACERO.**

BRAYAN STID PINZÓN RONDÓN

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2018

**PRÁCTICA EMPRESARIAL CON LA EMPRESA PERALTA INGENIERÍA S.A.S
EN EL DESARROLLO DE UN INSTRUCTIVO DE PROTECCIÓN PASIVA
CONTRA FUEGO DE ESTRUCTURAS DE ACERO.**

BRAYAN STID PINZÓN RONDÓN

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Civil

Director

MIGUEL ANTONIO PERALTA HERNÁNDEZ

MSc. en ingeniería estructural.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2018

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, mi padre y toda mi familia por motivarme y colaborarme en cualquier circunstancia de mi vida, por sentir tanto orgullo de lo que soy y por brindarme todo su cariño.

A toda la familia de Peralta Ingeniería por permitirme ser parte su excelente grupo de trabajo, por brindarme su amistad y enseñarme siempre de buena manera.

Quiero agradecer también a todos mis profesores y compañeros de la universidad, ellos generaron un ambiente muy agradable que hicieron de mi carrera una etapa muy bonita de mi vida.

A Marilyn Erazo, por su cariño, su afecto, su colaboración y su compañía incondicional en buena parte de mi carrera universitaria.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, mi padre y toda mi familia por motivarme y colaborarme en cualquier circunstancia de mi vida, por sentir tanto orgullo de lo que soy y por brindarme todo su cariño.

A toda la familia de Peralta Ingeniería por permitirme ser parte su excelente grupo de trabajo, por brindarme su amistad y enseñarme siempre de buena manera.

Quiero agradecer también a todos mis profesores y compañeros de la universidad, ellos generaron un ambiente muy agradable que hicieron de mi carrera una etapa muy bonita de mi vida.

A Marilyn Erazo, por su cariño, su afecto, su colaboración y su compañía incondicional en buena parte de mi carrera universitaria.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	12
1. REQUISITOS DE RESISTENCIA AL FUEGO	14
2. MATERIALES DE PROTECCIÓN CONTRA FUEGO.....	17
2.1 YESO.....	17
2.2 PANELES DE LANA MINERAL	18
2.3 MAMPOSTERÍA	19
2.4 CONCRETO	19
2.5 MATERIALES RESISTENTES AL FUEGO APLICADOS POR PULVERIZACIÓN (SFRM)	20
2.6 RECUBRIMIENTOS INTUMESCENTES	20
3. PRUEBA ESTÁNDAR DE FUEGO	21
4. COMBINACIÓN DE CARGA Y RESISTENCIA REQUERIDA	22
5. PROPIEDADES DEL ACERO A TEMPERATURAS ELEVADAS	23
6. RESISTENCIA AL FUEGO DE ELEMENTOS DE ACERO CON PROTECCIÓN	24
6.1 PROTECCIÓN PARA COLUMNAS DE ACERO	25
6.1.1 Gabinetes en Placas de Lana Mineral	25
6.1.2 Envolturas con Pasta de Yeso	26
6.1.3 Gabinetes en Láminas de Yeso	27
6.1.4 Recubrimientos Intumescentes.....	28
6.1.5 Revestimientos de SFRM	29
6.1.6 Buitrones en Mampostería	30
6.1.7 Revestimientos de Concreto	31

6.2 PROTECCIÓN PARA SISTEMAS DE ENTREPISO Y CUBIERTAS EN
ACERO34
6.2.1 Protección con Cielorraso34
6.2.2 Protección Individual de Miembros35
7. CONCLUSIONES37
BIBLIOGRAFÍA40

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Curvas de incendio estándar ISO 834 y ASTM E119	21
Figura 2. Variables a considerar en ecuación 7.....	33

RESUMEN

Titulo. Práctica empresarial con la empresa Peralta Ingeniería S.A.S en el desarrollo de un instructivo de protección pasiva contra fuego de estructuras de acero.*

Autor: Brayan Stid Pinzón Rondón**

Palabras Clave: Resistencia al fuego del acero, protección pasiva, diseño contra fuego, materiales de protección al fuego, diseño prescriptivo.

En Colombia ha aumentado considerable de la construcción en acero, este material presenta la característica de incrementar rápidamente su temperatura mientras se encuentra expuesto al fuego, cuando el acero llega a alcanzar temperaturas muy elevadas su resistencia empieza a disminuir gradualmente. Por motivos de seguridad toda edificación debe cumplir con los requisitos de resistencia al fuego contemplados en el reglamento de construcción correspondiente.

Las principales características de una edificación que determinan los requisitos de resistencia al fuego son el área construida y el uso previsto para la estructura, cuando una estructura en acero requiere una alta resistencia al fuego en la mayoría de los casos es necesaria la protección. Existen varios métodos analíticos para determinar la cantidad de protección necesaria para que un elemento estructural tenga cierta resistencia ante el fuego, pero en muchos casos hay que recurrir al resultado de un ensayo de laboratorio para determinar la protección adecuada.

El presente documento muestra el trabajo realizado durante una práctica empresarial en la empresa Peralta Ingeniería S.A.S donde se ejecutó labores de apoyo en la consulta y recopilación de la información necesaria que permitiera llevar a cabo la creación de una guía práctica, para el diseño de protección pasiva contra fuego en estructuras de acero. Este trabajo es realizado con fines netamente académicos, por ende no debe ser usado para el diseño de algún proyecto en particular.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas Escuela de Ingeniería Civil Director Miguel Antonio Peralta Hernández MSc. en ingeniería estructural.

ABSTRACT

Title. Business practice with the company Peralta Ingeniería S.A.S in the development of an instruction manual for passive fire protection of steel structures *

Author: Brayan Stid Pinzón Rondón **

Key Words: Fire resistance of steel, passive protection, fire protection design, fire protection materials, prescriptive design.

In Colombia there has been a considerable increase in steel construction, this material has the characteristic of rapidly increasing its temperature while it is exposed to fire, when steel reaches very high temperatures its resistance begins to gradually decrease. For safety reasons, every building must satisfy with the fire resistance requirements contemplated in the corresponding construction regulations.

The main characteristics of a building that determine the requirements of fire resistance are the built area and the intended use for the structure, when a steel structure requires a high fire resistance in most cases protection is necessary. There are several analytical methods to determine the quantity of protection necessary for a structural element to have some fire resistance, but in many cases it is necessary to resort to the result of a laboratory test to determine the adequate protection.

This document shows the work done during a business practice in the company Peralta Ingeniería SAS where support work was carried out in the consultation and compilation of the necessary information that would allow carrying out the creation of a practical guide, for the design of passive protection against fire in steel structures. This work is done for purely academic purposes, therefore it should not be used for the design of any particular project.

* Degree work

** Faculty of Physical and Mechanical Engineering School of Civil Engineering Director Miguel Antonio Peralta Hernández MSc. en ingeniería estructural.

INTRODUCCIÓN

Cada vez es más común encontrar en Colombia edificaciones con estructuras en acero, este material presenta un excelente comportamiento mecánico por tener alta resistencia y ductilidad, esta gran ventaja se ve claramente representada con obras de mayor libertad de diseño arquitectónico.

Desafortunadamente los materiales de construcción normalmente utilizados se comienzan a deteriorar cuando están expuestos a altas temperaturas durante periodos considerables de tiempo. El grado en que pueda deteriorarse una estructura en caso de un incendio depende de varios aspectos en los cuales se puede resaltar la severidad y duración del incendio, la presencia de dispositivos de detección y extinción del fuego, existencia de muros cortafuego, existencia de protección pasiva y el material que presente la estructura. Sin importar de qué material sea construya una estructura, toda edificación debe cumplir con requisitos de seguridad contra incendios presentes en el reglamento de construcción.

El acero a diferencia del concreto presenta una alta conductividad térmica lo que genera en caso de un incendio un rápido incremento en la temperatura de la estructura y por consiguiente una reducción significativa en la resistencia del material. Por lo tanto, es muy común que en una edificación con estructura de acero que exija una alta resistencia al fuego sea necesaria la protección de los miembros estructurales.

Básicamente existen dos métodos para brindarle protección a una estructura para un posible caso de incendio, por ejemplo, cuando se instalan dispositivos como aspersores y detectores de humo se clasifica como un sistema de protección activo. El otro enfoque de protección consiste en retardar la tasa de aumento de

temperatura en la estructura al interponer un material resistente al fuego entre la estructura y el fuego, este efecto le aporta más tiempo de resistencia al edificio para labores de evacuación y rescate o probablemente para que se agote el combustible presente, este último se clasifica como un sistema de protección pasivo.

Algunos usos de edificación tienen sin duda un mayor riesgo de presentar un incendio que otros, por ejemplo, una bodega de pinturas o esmaltes y un edificio de apartamentos. Por otra parte, un edificio con mayor área construida que otro con la misma ocupación tiene mayor probabilidad de presentar un incendio. Por lo tanto, no todas las edificaciones deben tener la misma resistencia al fuego, se requiere un periodo mayor de resistencia al fuego para aquellos edificios que presenten mayor riesgo de incendio.

Básicamente la finalidad de un diseño contra fuego es minimizar el riesgo de colapso de una edificación mientras se proporciona el tiempo necesario para evacuación, rescate y extinción del fuego. Sin embargo, a pesar de ser un tema bastante importante, la resistencia y protección ante el fuego de estructuras de acero ha sido un tema poco documentado en Colombia y es evidentemente más indispensable con el aumento de la construcción en acero.

1. REQUISITOS DE RESISTENCIA AL FUEGO

Debido a que no todas las edificaciones presentan el mismo riesgo de incendio o pérdida de vidas humanas se debe determinar la resistencia requerida contra el fuego según el reglamento de construcción correspondiente para cada proyecto en particular. En Colombia el Título J del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10¹ presenta los requisitos de protección contra incendios en edificaciones.

El capítulo J.3 del NSR-10 para efectos de seguridad contra incendios clasifica las edificaciones en tres categorías de riesgo, la clasificación en una categoría de riesgo según este capítulo depende básicamente de cuatro aspectos propios de cada proyecto los cuales corresponden a: grupo de ocupación de la edificación, área total construida, número de pisos y potencial combustible en algunos casos. Aún no es tenido en cuenta el uso o no de rociadores automáticos en la clasificación de riesgo de una edificación por parte de este reglamento.

Luego de que el caso de estudio sea clasificado en una de las tres categorías de riesgo se puede determinar la resistencia al fuego requerida para los elementos que van a hacer parte de la construcción. La tabla 1 y 2 muestra la resistencia al fuego normalizado en horas requerida por el reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10. También se debe aclarar que este capítulo del reglamento se contempla ciertas condiciones para edificaciones que no se les requiere que sus elementos cumplan con alguna resistencia al fuego específica.

¹ ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA, AIS, Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10, Bogotá D.C., 2010

Cuando por medio de análisis se determine que un elemento no cumple con la resistencia requerida debe ser protegido o redimensionado para que alcance los requisitos establecidos. Cuando se desee proteger un elemento contra el fuego se debe suministrar una protección que tenga como mínimo la resistencia al fuego requerida para el miembro protegido o en su defecto que el ensamblaje elemento-protección este calificado con esa resistencia al fuego.

Tabla 1. Resistencia requerida al fuego, en horas, para todos los usos excepto R-1 y R-2

Elementos de la construcción	Categoría de riesgo		
	I	II	III
Muros Cortafuego.	3	2	1
Muros de cerramiento de escaleras, ascensores, buitrones, ductos para basuras y corredores de evacuación protegidos.	2	2	1
Muros divisorios entre unidades.	1	1	1
Muros interiores no portantes.	1/2	1/4	-
Elementos estructurales de los materiales cubiertos por los Títulos C a G del NSR-10.	2	1	1
Cubiertas.	1	1	1/2
Escaleras interiores no encerradas por muros.	2	1	1

Fuente: adaptado de ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA, AIS, Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10, Bogotá D.C., 2010

Tabla 2. Resistencia requerida al fuego, en horas, para los usos R-1 y R-2

Elementos de la construcción	Categoría de riesgo		
	I	II	III
Muros Cortafuego.	1	1	1
Muros de cerramiento de escaleras, ascensores, buitrones, ductos para basuras y corredores de evacuación protegidos.	1	1	1
Muros divisorios entre unidades.	1	1	1
Muros interiores no portantes.	1/2	1/4	-

Elementos de la construcción	Categoría de riesgo		
	I	II	III
Elementos estructurales de los materiales cubiertos por los Títulos C a G del NSR-10.	1	1	1
Cubiertas.	1	1	1/2
Escaleras interiores no encerradas por muros.	1	1	1

Fuente: adaptado de ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA, AIS, Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10, Bogotá D.C., 2010

2. MATERIALES DE PROTECCIÓN CONTRA FUEGO

Muchas veces se puede demostrar que la el diseño de la estructura puede soportar sin ningún inconveniente el tiempo requerido de resistencia al fuego requerida (RF), pero, en algunas ocasiones, cuando la exigencia de resistencia al fuego es alta los diseños de las estructuras comúnmente presentan inconvenientes para resistir la carga de fuego. Para hacer que los miembros de una estructura cumplan con la resistencia al fuego que se les requiere son protegidos mediante materiales cuyas propiedades térmicas evitan que la estructura pueda alcanzar altas temperaturas

2.1 YESO

El yeso es un material resistente al fuego que se usa ampliamente en toda la industria de la construcción. El mineral consiste en sulfato de calcio químicamente combinado con agua ($\text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$). El yeso se adquiere mediante la extracción de fuentes naturales de roca de yeso². Mientras los materiales a base de yeso se exponen al fuego sufren un proceso conocido como calcinación donde el agua es liberada en forma de vapor y mientras dure este proceso el yeso actúa como barrera térmica dejando pasar temperaturas no muy superiores del punto de ebullición del agua 100°C, luego los cristales secos de yeso actuarán como barrera física contra el fuego.

Comúnmente el yeso usado para protección contra fuego es encontrado de dos maneras, la primera es mediante placas rígidas prefabricadas y la segunda es en forma de pasta. Cuando para efectos de protección contra fuego se usa láminas de

² WALKER, Jerry A. "All Things Gypsum-The Moisture in Gypsum," Walls & Ceilings, 2002 <www.wconline.com>.

yeso, estas láminas deben ser catalogadas por el fabricante como láminas “Tipo X” ó “RF”, que son láminas con una fabricación especial para resistir la acción del fuego. Es importante contar con el certificado de calidad donde sea evidente la norma que satisface, por ejemplo, la norma ASTM C363 que designa los tableros de yeso como “Tipo X”.

La pasta a base de yeso consiste en yeso calcinado combinado con vermiculita liviana y agregados de perlita. La vermiculita y la perlita son materiales que experimentan grandes expansiones volumétricas en presencia de altas temperaturas generando. Este aislamiento, combinado con la habilidad natural del yeso para crear una barrera de vapor, hace que las pastas a base de yeso sean materiales de protección contra incendios muy eficientes [3]. Este tipo de mezcla siempre debe ser aplicado sobre una malla metálica que funciona como refuerzo de la pasta.

2.2 PANELES DE LANA MINERAL

Los tableros de lana mineral se crean hilando y comprimiendo roca volcánica, resinas, fibras minerales. Estas láminas forman barreras resistentes al fuego que pueden cortarse y colocarse para formar un sello hermético alrededor de los elementos estructurales. Una variedad de tamaños y acabados superficiales están disponibles por parte de los fabricantes. ASTM C612 especifica los límites máximos de temperatura de uso, la densidad y las características térmicas y físicas relevantes de los tipos de placa estándar³

³ INSTITUTO AMERICANO DE CONSTRUCCIÓN EN ACERO (AISC), “Fire Resistance of Structural Steel Framing”, Estados unidos de América, diciembre 2003

2.3 MAMPOSTERÍA

Crear una barrera en bloques de mampostería alrededor de una columna de acero es uno de los métodos que principalmente fueron utilizados para la protección de columnas ante incendios. Los bloques de mampostería pueden ser de concreto o arcilla, macizos, de perforación horizontal o vertical y su resistencia al fuego depende de su densidad, tipo de agregado, la conductividad térmica, el grosor, el mortero de pega, el acabado y el contenido de humedad de la mampostería. Los métodos de protección pueden ser referenciados con los manuales de los fabricantes o mediante ecuaciones registradas en códigos de construcción.

2.4 CONCRETO

El concreto con su baja conductividad térmica retarda considerablemente la transferencia de calor del medio al elemento protegido cuando se utiliza como recubrimiento. El concreto, también puede usarse como elemento de protección al llenar el interior de una sección tubular de acero, en este caso el concreto actúa como disipador de calor.

El tipo de agregado utilizado en el concreto puede afectar en gran medida sus propiedades de resistencia al fuego. La humedad libre y químicamente unida dentro del concreto (similar al yeso) produce un efecto de enfriamiento ya que las altas temperaturas inducen la emisión de vapor. El concreto bien hidratado típicamente contiene aproximadamente de 16 a 20 por ciento de agua, sin embargo, estudios han demostrado que el espesor es el factor que más contribuye a la resistencia al fuego⁴

⁴ SCHULTZ, Neil Fire and Flammability Handbook, Van Nostrand Reinhold Company, Inc., New York, NY. 1985

2.5 MATERIALES RESISTENTES AL FUEGO APLICADOS POR PULVERIZACIÓN (SFRM)

Estos materiales se pueden categorizar en dos grupos básicos, cementosos y fibrosos. Sin importar de cuál de estas categorías se trate se utiliza un cemento Portland o una base de yeso para dar cohesión a ambos tipos de SFRM.

Para la producción de SFRM de tipo fibroso se utilizan fibras de lana mineral con propiedades ligeras e incombustibles y es combinada con un aglutinante. La norma ASTM C1014 describe los requisitos para este tipo de SFRM. La mayoría de los SFRM cementosos contienen mineral de yeso que aporta protección al fuego y normalmente es combinado con agregados de vermiculita o agregados de perlita, dicha mezcla se dispone en una tolva y se aplica por pulverización, sin embargo, también puede ser aplicado con espátula.

2.6 RECUBRIMIENTOS INTUMESCENTES

Los recubrimientos intumescentes son capas delgadas aplicadas a la estructura que reaccionan en presencia de altas temperaturas. La palabra intumescencia significa hinchazón, su nombre se debe porque cuando el recubrimiento se somete al fuego se genera una espuma aislante y adherente con baja conductividad térmica que retarda en gran medida el flujo de calor al acero.

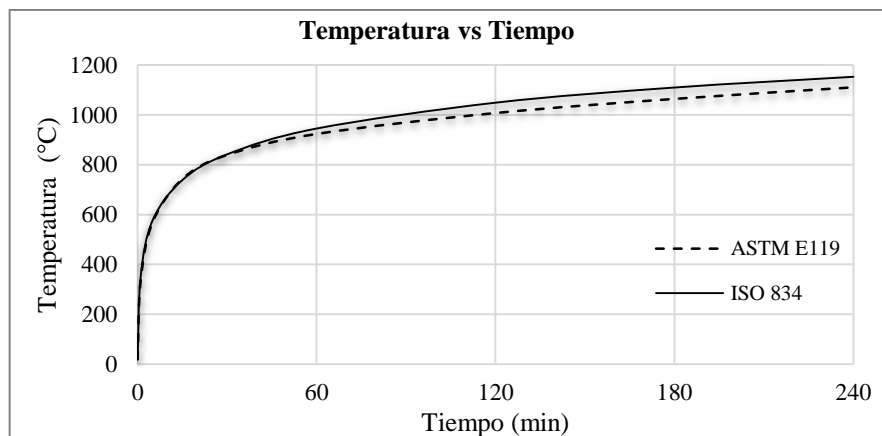
Los revestimientos se colocan de manera similar a la pintura y se pueden aplicar con rodillos, brochas o equipos de pulverización. Por el momento esta opción es la *única* que permite poder mostrar la belleza de la estructura de acero en edificaciones con altas exigencias de resistencia al fuego.

3. PRUEBA ESTÁNDAR DE FUEGO

Es muy necesaria la existencia de un método estandarizado que permita evaluar la resistencia al fuego de los elementos de construcción de forma cuantitativa. Este problema ha sido solucionado mediante una prueba de fuego con magnitudes y duraciones controladas lo que permita poder comparar resultados de diferentes investigaciones. La resistencia de los elementos alcanzada durante estas pruebas se denomina resistencia al fuego normalizado.

Actualmente las pruebas ASTM E119, ANSI/UL 263 e ISO 834 (en Colombia NTC 1480) son los procedimientos más conocidos para la determinación de la resistencia al fuego de los materiales y elementos de construcción, tales como: paredes y particiones, columnas, vigas, ensambles de techo y piso, entre otros. Estos procedimientos están basados en una curva temperatura vs tiempo previamente establecida, las curvas pruebas ISO 834 y ASTM E119 son bastante parecidas, en la figura 1 se muestran la variación de la temperatura en función del tiempo para estas dos pruebas.

Figura 1. Curvas de incendio estándar ISO 834 y ASTM E119



4. COMBINACIÓN DE CARGA Y RESISTENCIA REQUERIDA

El ASCE 7-10 “Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures” define a un incendio como un evento extraordinario poco probable, por lo tanto, lo más probable es que las cargas que presente un edificio en caso de un incendio sean diferentes a las cargas con las que normalmente se diseña un edificio. La resistencia requerida por una estructura y sus miembros, en una situación de incendio, debe ser determinada de la combinación de carga gravitacional presentada en la ecuación 1⁵

$$(1.2 \text{ ó } 0.9) \cdot D + T + 0.5 \cdot L + 0.2 \cdot S \quad (1)$$

Donde:

D= Carga muerta nominal.

L= Carga viva ocupacional nominal.

S= Carga de nieve nominal.

T= Fuerzas y deformaciones nominales debido al incendio de diseño.

Se debe aplicar una carga lateral ficticia, $N_i = 0.002Y_i$, donde N_i es la carga ficticia lateral aplicada en el nivel i del marco y Y_i es la carga vertical de la combinación de carga anteriormente mostrada actuando en el nivel i del marco, debe ser aplicada en combinación con las cargas estipuladas en la ecuación anterior. El factor de la carga muerta es 0.9 cuando el efecto de la carga muerta es estabilizar la estructura, de lo contrario será 1.2⁶

⁵ SEI/ASCE 7-10 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, American Society of Civil Engineers (ASCE), Reston, VA. 2010

⁶ AISC Specification for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 360-16, American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois. 2016

5. PROPIEDADES DEL ACERO A TEMPERATURAS ELEVADAS

Ya se ha mencionado que las propiedades mecánicas de los materiales se deterioran cuando la temperatura aumenta considerablemente. En el acero, sus principales características de resistencia, Módulo de Elasticidad (E), Esfuerzo de Fluencia (F_y) y Esfuerzo de Rotura (F_u), se reducen considerablemente en temperaturas superiores a los 500 °C. La Tabla 3 muestra los valores K_E , K_Y y K_U como la relación de la resistencia del acero a una temperatura específica y los valores de resistencia a temperatura ambiente (20 °C)⁷

⁷ EUROPEAN CONVENTION FOR CONSTRUCTIONAL STEELWORK (ECCS) – Technical Committee 3 Model Code on Fire Engineering, First Edition, Brussels, Belgium 2001

6. RESISTENCIA AL FUEGO DE ELEMENTOS DE ACERO CON PROTECCIÓN

Existen numerosas formas de brindarle protección contra fuego a una estructura de acero y todas se proporcionan con el objetivo de disminuir la tasa de aumento de la temperatura en los elementos estructurales con el fin de darle mayor tiempo de resistencia a la estructura, tiempo valioso para evacuación, rescate y extinción del fuego.

Es posible determinar mediante análisis la resistencia al fuego para diferentes configuraciones de protección con materiales específicos. Sin embargo, algunas formas de protección solo se pueden determinar estrictamente mediante resultados de pruebas de laboratorio y cumpliendo con las condiciones del montaje. Generalmente, en un edificio con estructura de acero se evalúa la resistencia al fuego de todo el sistema de entrepiso o cubierta y de forma independiente las columnas.

No todos los perfiles se calientan de la misma manera, la tasa de aumento de la temperatura en el elemento también depende en principalmente de la masividad del perfil. El término “W/D” es un indicativo de la masividad, la “W” es la masa de perfil por unidad de longitud y la “D” es el perímetro del perfil expuesto al fuego, esto indica que un mismo tipo de perfil puede tener varios valores de “W/D” dependiendo de qué parte del perfil esté expuesta al fuego.

Tabla 3. Variación de las Propiedades Mecánicas del Acero con la Temperatura

Temperatura del Acero (°C)	$K_E = E(T)/E$	$K_y = F_y(T)/F_y$	$K_U = F_u(T)/F_y$
20	1.00	1.00	1.00
93	1.00	1.00	1.00
204	0.90	1.00	1.00
316	0.78	1.00	1.00
399	0.70	1.00	1.00
427	0.67	0.94	0.94
538	0.49	0.66	0.66
649	0.22	0.35	0.35
760	0.11	0.16	0.16
871	0.07	0.07	0.07
982	0.05	0.04	0.04
1090	0.02	0.02	0.02
1200	0.00	0.00	0.00

Fuente: adaptado de EUROPEAN CONVENTION FOR CONSTRUCTIONAL STEELWORK (ECCS) – Technical Committee 3 Model Code on Fire Engineering, First Edition, Brussels, Belgium 2001

6.1 PROTECCIÓN PARA COLUMNAS DE ACERO

6.1.1 Gabinetes en Placas de Lana Mineral Este tipo de soluciones puede dar clasificaciones de resistencia al fuego de hasta 4 horas, consta de generar una caja protectora con placas de lana mineral o lana de roca la cual encierre a la columna en toda su longitud.

La determinación de la resistencia al fuego de este tipo de protección normalmente se basa en resultados de pruebas de laboratorio, aunque también, se puede hacer referencia a las especificaciones de los fabricantes. Algunos de los resultados de las pruebas de laboratorio incluyen una ecuación para determinar el espesor de protección requerido, sin embargo, en otros los espesores sólo encuentran de forma

explícita. Las ecuaciones de espesor se encuentran en función de la relación W/D del perfil y la resistencia requerida, el parámetro D en este caso se define como el perímetro interno de la protección.

Las especificaciones de instalación deben obedecer a la configuración probada. A modo de ejemplo se mencionará la ecuación proporcionada del diseño No. X307 de Underwriters Laboratories Inc. (UL)⁸ para el cálculo del espesor requerido de lana mineral.

$$h = \frac{1.08 R}{1.13 \left(\frac{W}{D}\right) + 0.47} \quad (2)$$

Donde:

h = Espesor de la Lámina (pulg).

R = Resistencia al Fuego (hr).

W = Peso del Perfil (lb/ft).

D = Perímetro interno de Placa (pulg).

6.1.2 Envolturas con Pasta de Yeso Este tipo yeso es normalmente una composición de arena, agua y cal que se endurece al secarse. Si la arena se reemplaza con minerales expandibles como la perlita o vermiculita, las propiedades aislantes se mejoran y el yeso ligero resultante se puede utilizar para proporcionar protección contra incendios para columnas de acero. La sección de la columna se debe envolver con una malla metálica para crear un soporte para el yeso.

Con este método se han confirmado clasificaciones de protección contra incendios de hasta 4 horas. El espesor de yeso requerido varía con la calificación y debe confirmarse al hacer referencia a un diseño de laboratorio. Para un perfil W10x49,

⁸ UNDERWRITERS LABORATORIES INC. (UL) Fire Tests of Building Construction and Materials, Standard No. UL X307, Northbrook, IL. 2003

los espesores representativos de los emplastes son de 1 in (25,4 mm) para 2 horas, 1 3/8 in (34,9 mm) para 3 horas y 1 3/4 in (44,5 mm) para 4 horas⁹

6.1.3 Gabinetes en Láminas de Yeso Mientras las láminas de yeso estén en el proceso de calcinación (liberación del agua contenida en forma de vapor) la cara no expuesta de la lámina se eleva a temperaturas ligeramente superiores a 100 °C. Underwriter Laboratories y la Asociación de yeso enuncian conjuntos de columna, patentados y genéricos, con paneles de yeso con resistencia al fuego de hasta de 4 horas. Por lo general, las clasificaciones de ensamblaje más altas se logran aplicando varias capas de placas.

En la mayoría de los casos, se especifica un tamaño de columna mínimo para una prueba en particular. Las columnas con mayores relaciones W/D pueden sustituirse por la sección de columna probada, siempre que se aplique la misma protección a la columna sustituta que se utiliza en la columna de prueba. La protección de columna utilizando los cerramientos de placas de yeso "Tipo X" está cubierta en la sección 721.5.1.2 del Código Internacional de Construcción (IBC)¹⁰, donde los requisitos de protección están dirigidos por la ecuación 3.

$$R = 130 \left[\frac{h \frac{W'}{D}}{2} \right]^{0.75} \quad (3)$$

Donde:

h = Espesor de la Lámina (pulg).

R = Resistencia al Fuego (min).

D = Perímetro interno de Placa (pulg).

W = Peso del Perfil (lb/ft).

⁹ INSTITUTO AMERICANO DE CONSTRUCCIÓN EN ACERO (AISC), Op. Cit.

¹⁰ INTERNATIONAL CODE COUNCIL, INC. (ICC) International Building Code, 2009, Falls Church, VA. 2009

W' = Peso del Perfil y Lámina (lb/ft).

$W' = W + 50 h D/144$ (lb/ft).

La integridad de los accesorios para láminas de yeso es un componente importante del sistema resistente al fuego y los detalles específicos del montaje deben incorporarse en la construcción.

6.1.4 Recubrimientos Intumescentes Los recubrimientos intumescentes se expanden cuando se calientan y crean una barrera de aislamiento que también refleja el calor. Estos recubrimientos delgados generalmente son suficientes para satisfacer la clasificación de resistencia al fuego requerida. La superficie del recubrimiento es duradera y, a menudo, adecuada para la aplicación de un acabado final. Se pueden obtener clasificaciones de resistencia al fuego de hasta 3½ horas.

En los resultados de las pruebas de laboratorio siempre se especifica un tamaño mínimo de columna para cada prueba. Sin embargo, varios diseños proporcionan ecuaciones para el ajuste del espesor de protección, dependiendo de la relación W/D y la resistencia al fuego requerida. A modo de ejemplo se mencionará el diseño de laboratorio con revestimiento intumescente, UL No X649, en el cual proporciona una tabla con espesores explícitos y también una ecuación para el cálculo del espesor.

$$T = \frac{k}{\left(\frac{W}{D}\right)} \quad (4)$$

Donde:

T = Espesor Recubrimiento (mm).

W = Masa por Unidad de Longitud (kg/m).

D = Perímetro Expuesto al Fuego (m).

K = Constante, ver Tabla 4.

Tabla 4. Parámetro k de la Ecuación 4.

RF (hr)	k	Rango W/D (kg/m ²)
1	71.6	19 - 67
1.5	141.3	19 - 96
2	222.7	26 - 96
3	461.0	34 - 96
4	1116.4	101 - 176

Fuente: adaptad de UNDERWRITERS LABORATORIES INC. (UL) Fire Tests of Building Construction and Materials, Standard No. UL X307, Northbrook, IL. 2003

6.1.5 Revestimientos de SFRM En Estados Unidos, es el método más utilizado para la protección de columnas de acero debido al gran volumen de información y los detalles apropiados para la construcción que hace para ellos formidable la tarea de identificar el grosor requerido. A pesar de que esta información no se encuentre de la misma manera en Colombia es posible adquirir productos de este tipo.

La resistencia al fuego está influenciada por las propiedades térmicas del material aislante, como el calor específico y la conductividad térmica. Por lo tanto, las pruebas de laboratorio normalmente son facilitadas por los fabricantes de materiales para dar garantía del funcionamiento de su producto particular. Por lo tanto, las pruebas son patentadas y pueden mencionarse como evidencia en los diseños cuando se utiliza el producto probado.

La ecuación 5, que se encuentra en la sección 721.5.1.3 del IBC, es válida para la determinación del espesor de SFRM requerido en función de la clasificación de resistencia al fuego R, la relación W/D de la columna y los coeficientes que reflejan las propiedades térmicas del material aislante.

$$R = \left[C_1 \left(\frac{W}{D} \right) + C_2 \right] h \quad (5)$$

Donde:

h = Grosor SFRM (pulg).

R = Clasificación de resistencia al fuego (pulg).

W = Peso de la columna (lb/ft).

D = Perímetro de la columna expuesto al fuego (pulg)

C₁ y C₂ = constantes dependientes del material.

La Tabla 5 es una tabulación de las constantes de la ecuación 5 válidos para algunos de los productos de SFRM más reconocidos. Los valores de C₁ y C₂ que sean utilizados en la ecuación IBC deberán ser confirmados por el proveedor del material.

Tabla 5. Constantes de SFRM Reconocidos

Material	Rango W/D (lb/ft-in)	C ₁	C ₂
Grace MK6	Todo W/D	1.05	0.61
Isolatek 800	Todo W/D	0.86	0.97
Isolatek 280	0.33 – 2.51	1.25	0.53
Isolatek 280	2.51 – 6.68	1.25	0.25
Isolatek D-C/F	0.55 – 7.00	1.01	0.66
Isolatek D-C/F	0.30 – 0.55	0.95	0.45

Fuente: adaptado de INTERNATIONAL CODE COUNCIL, INC. (ICC) International Building Code, 2009, Falls Church, VA. 2009

6.1.6 Buitrones en Mampostería Una de las principales soluciones de protección pasiva contra fuego es la de proporcionar un recinto aislante para la columna de acero utilizando unidades de mampostería en concreto o en arcilla. La resistencia al fuego proporcionada por la mampostería se basa en el flujo de calor a través del

material de mampostería. El flujo de calor puede predecirse en función de varios parámetros, donde se incluye el grosor equivalente de la mampostería (determinado mediante ensayo de laboratorio), la conductividad térmica de la mampostería, la densidad de la mampostería y el acero, el perímetro expuesto del acero y el perímetro interior de la mampostería. La resistencia al fuego de una columna de acero protegida con mampostería se puede determinar mediante la ecuación 6, extraída de la sección 721.5.1.4.5 del IBC.

$$R = 0.17 (W/D)^{0.7} + \left[0.285 (T_e^{1.6}/K^{0.2}) \right] \times \left[1 + 42.7 \left\{ (A_s/d_m T_e) \div (0.25 p + T_e) \right\}^{0.8} \right] \quad (6)$$

Donde:

R = Resistencia al fuego de la columna (hrs).

W = Peso promedio de la columna de acero (lb/ft).

D = Perímetro expuesto de la columna (pulg).

Te= Espesor equivalente de la mampostería (pulg).

K = Conductividad térmica protección (Btu/hr·Ft °F).

As= Área de la columna de acero (pulg²).

Dm = Densidad de la unidad de mampostería (pcf).

p = Perímetro interno de la mampostería (pulg).

6.1.7 Revestimientos de Concreto La protección de concreto se puede llevar a cabo instalando unidades prefabricadas o generando un recubrimiento colocado in situ. De cualquier forma, la capacidad del concreto para absorber calor está influenciada por el contenido de humedad del concreto. Por este motivo, en el ítem 721.5.1.4 del IBC se plantea calcular resistencia al fuego de este tipo de protección mediante ecuaciones en dos pasos. En primer lugar, se determina la resistencia al

fuego con contenido de humedad cero según la ecuación 7 y luego esa resistencia al fuego aumenta en función de la humedad real por medio de la ecuación 9.

$$R_o = \frac{10 (W/D)^{0.7} 17 \left(\frac{h^{1.6}}{k_c^{0.2}}\right)}{\left[1 + 26 \left(\frac{H}{\rho_c c_c h(L+h)}\right)^{0.8}\right]} \times (7)$$

Donde:

R_o = Resistencia al fuego con humedad cero (min).

W = Peso de la columna de acero (lbs/ft).

D = Perímetro interno de la protección (pulg).

h = Espesor de la cubierta de hormigón (pulg).

k_c = Conductividad térmica del hormigón a temperatura ambiente (Btu/hr ft °F).

H = Capacidad térmica de la columna a temperatura ambiente = $0.11W$ (Btu/ft °F).

ρ_c = Densidad del hormigón (pcf).

cc = Calor específico del hormigón a temperatura ambiente (Btu/lb °F).

L = Dimensión interior de un lado del cuadrado de protección de hormigón (pulg).

Para el uso de la ecuación 7 Se debe tener en cuenta la figura 2 y las siguientes recomendaciones:

1. Cuando el perímetro interior de la protección del concreto no es cuadrado, L se tomará como el promedio de L_1 y L_2 .

2. Cuando el espesor de la cubierta de hormigón no es uniforme, se tomará h como el promedio de h_1 y h_2 .

3. Cuando el espacio entre las puntas de la aleta y el alma se llena de hormigón (perfil embebido), la capacidad térmica de la columna de acero, H, puede aumentar según la ecuación 8.

$$H = 0.11 W + \left(\frac{\rho_c c_c}{144}\right) (b_f d - A_s) \quad (8)$$

Donde:

b_f = Ancho de la aleta de la columna de acero (pulg).

d = Altura de la columna de acero (pulg).

A_s = Área de columna de acero (pulg²).

La resistencia al fuego aumenta a medida que aumenta el contenido de humedad del hormigón. Por lo tanto, la resistencia al fuego a humedad cero aumenta de la siguiente manera:

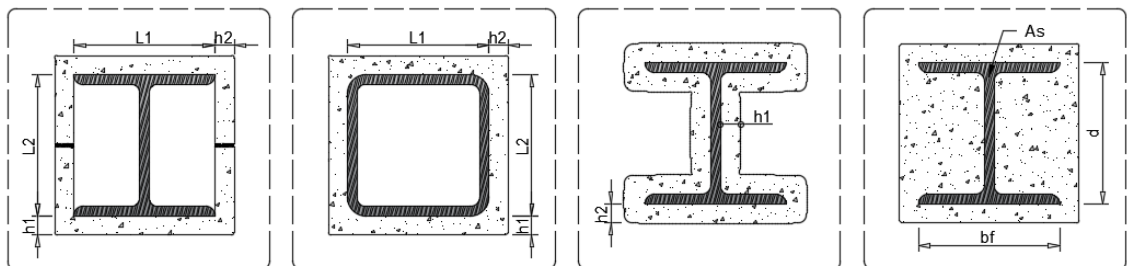
$$R = R_0(1 + 0.03m) \quad (9)$$

Donde:

R = Valor de resistencia al fuego en la condición de humedad real (min.)

m = Contenido de humedad real del concreto por volumen (porcentaje)

Figura 2. Variables a considerar en ecuación 7.



Fuente: adaptado de INTERNATIONAL CODE COUNCIL, INC. (ICC) International Building Code, 2009, Falls Church, VA. 2009

6.2 PROTECCIÓN PARA SISTEMAS DE ENTREPISO Y CUBIERTAS EN ACERO

Cuando se necesite brindar protección contra fuego en estas partes de la estructura para poder garantizar la resistencia al fuego requerida, se debe evaluar la posibilidad de generar dicha resistencia mediante la protección de los miembros individuales (vigas y viguetas generalmente) o mediante el suministro de una barrera térmica (normalmente mediante cielorrasos con materiales resistentes al fuego). El costo de proporcionar un cielorraso debe ser comparado cuidadosamente con el costo de brindar protección individual a los miembros.

A diferencia de la protección para columnas, los métodos analíticos para calcular el espesor de la protección no se encuentran con la misma facilidad. Tanto la protección individual en forma de cajón para vigas y viguetas y la protección mediante cielorraso no es posible ser calculada analíticamente su diseño normalmente se basa en resultados de pruebas de laboratorio con ensamblajes completos.

6.2.1 Protección con Cielorraso Los sistemas de cielorraso con clasificación de protección contra incendios protegen la estructura de las temperaturas elevadas al crear una barrera protectora debajo la construcción de piso o cubierta. La construcción de esta envoltura consiste comúnmente en unir una capa horizontal de paneles de yeso, tableros de lana mineral, o malla con pasta de yeso en la parte inferior de la estructura. Los paneles de cielorraso utilizados en estos ensambles no están clasificados en sí mismos, deben ser un componente enumerado en la descripción del ensamble completo. Todos los detalles relevantes para el ensamblaje deben seguirse ser cumplidos para garantizar que la integridad de esta barrera no se vea comprometida. Los detalles para los sistemas de cielorraso con calificación de fuego pueden incluir:

1. Proteger las penetraciones de iluminación con paneles de yeso o material acústico.
2. Limitar el área de penetraciones para las lámparas y ductos.
3. Requerir ductos protegidos.
4. Suministro de recubrimiento de teflón para el cableado en el cielorraso.
5. Construir miembros de soporte adicionales en los bordes del cielorraso.
6. Es importante especificar los perfiles del entramado, cables de suspensión, tipos de tornillo y las separaciones máximas de estos elementos.
7. Especificar las demás condiciones que establezca el diseño de laboratorio¹¹

6.2.2 Protección Individual de Miembros Los sistemas de protección individual difieren de los sistemas de cielorraso en que preservan la integridad de la estructura al proteger elementos específicos del sistema estructural. Los dos tipos principales de sistemas de protección individual son los gabinetes aislantes de vigas y los revestimientos protectores de aplicación directa. Los sistemas de gabinetes con clasificación contra incendios están contruidos generalmente con tableros de lana mineral, malla con pasta de yeso, o paneles de yeso. Los gabinetes de vigas aislantes a menudo se usan donde la viga sobresale en el espacio arquitectónico o donde la estética del elemento es importante.

Los revestimientos protectores de aplicación directa incluyen SFRM y recubrimientos de pintura intumescente. En lugares donde el elemento se encuentra de manera tal que la estética no es una preocupación principal, el SFRM es la opción más económica. Los recubrimientos intumescentes pueden usarse cuando la estética es de cuidado o como en ubicaciones exteriores.

La razón por la cual en los códigos de construcción y en las guías de diseño no se encuentran registrados ecuaciones para determinar el espesor de protección

¹¹ INSTITUTO AMERICANO DE CONSTRUCCIÓN EN ACERO (AISC), Op. Cit.

adecuado para un sistema de entrepiso, sin importar si es protección individual o de cielorraso, se debe básicamente a la cantidad variables que afectan la resistencia de los entrepisos en acero, entre ellas se puede mencionar:

1. Resistencia del concreto y peso unitario.
2. Vigas compuestas o no compuestas.
3. Propiedades del Steel Deck.
4. Protección o no del Steel Deck.

Por lo anterior el método apropiado para determinar el grosor de protección adecuado en los elementos de un sistema de entrepiso o cubierta será basado en los resultados de las pruebas de laboratorio que se realizan a los montajes de entrepiso para dar garantía del funcionamiento producto ensayado junto con el resto de los componentes del ensamble.

7. CONCLUSIONES

Es importante aclarar que gran parte del contenido de este artículo se redactó en base a la interpretación de las labores de traducción del material técnico y normativo encontrado y por ende se recomienda consultar la bibliografía original para tener certeza de la información. Otro aspecto que se debe tener en cuenta es que este documento es realizado con fines netamente académicos como resultado de un proyecto de grado y que las ecuaciones y conceptos en general no deben ser usados en los cálculos para el diseño de algún proyecto en particular.

El análisis y diseño estructural para condiciones de incendio es un tema que ha sido poco documentado en Colombia, más aún para el caso de edificaciones con estructura en acero por no ser el tipo de construcción más usual en el país. Sin embargo, las estructuras en acero, resultan ser más susceptibles a la acción del fuego que las estructuras de concreto debido a la alta conductividad térmica del material.

La vulnerabilidad del acero ante el fuego hace que sea completamente necesario el estudio de la resistencia al fuego de estructuras en acero para poder garantizar responsablemente la seguridad de sus habitantes. La gran mayoría de información relacionada con este tema se encuentra en la literatura extranjera, especialmente en Europa y Norteamérica, por lo tanto para el desarrollo de este trabajo se revisó cuidadosamente varios códigos de construcción y guías de diseño con el fin de recopilar la mayor cantidad de información que permitiera llevar a cabo el inicio de una guía de diseño para condiciones de incendio en estructuras de acero.

Uno de los documentos más completos en este tema de estudio es la guía de diseño número 19 del AISC (American Institute of Steel Construction) el cual debió ser

traducido al español casi que por completo para poder tener mayor claridad en su contenido. También se debe mencionar que las labores de traducción del material bibliográfico se extendieron a fragmentos otros documentos relacionados con el tema.

Es importante tener en cuenta que no todas las edificaciones presentan los mismos requisitos de resistencia al fuego, la ocupación o uso de la edificación y la cantidad área construida son los dos aspectos más relevantes que determinan la resistencia requerida ante el fuego en una estructura.

Todos los materiales de construcción se deterioran con la exposición al fuego, el acero sin ningún tipo de protección contra incendios puede llegar a alcanzar altas temperaturas en un corto tiempo y su resistencia se puede disminuir en más de un 60% a temperaturas superiores a 600°C, por lo tanto en edificaciones con altas exigencias al fuego lo más común es que sea necesario el diseño de protección pasiva contra fuego para poder cumplir con los requisitos.

Los incendios son eventos de baja probabilidad de ocurrencia, por lo tanto lo más esperado es que en caso de presentarse un incendio en un edificio las cargas que se presenten no sean las cargas más altas en la vida de la estructura, es por eso que existe una combinación de carga particular para este caso.

La resistencia al fuego para los elementos de una construcción se representa en unidades de tiempo y las ecuaciones para el cálculo de protección pasiva están basadas en pruebas de laboratorio bajo condiciones estandarizadas (ISO 834 y ASTM E119).

Como se pudo ver en este documento, la mayoría de métodos analíticos para determinar el espesor de protección pasiva se limitan a los elementos estructurales como columnas, las ecuaciones para el cálculo de protección en los elementos del

sistema de entrepiso o cubierta (vigas, viguetas y losa) son muy escasas y en este caso lo más común es hacer referencia al resultado de un ensayo de laboratorio donde se haya probado el producto de protección en un montaje que se asemeje a la configuración real de la construcción.

BIBLIOGRAFÍA

AISC Specification for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 360-16, American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois. 2016

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials, Specification No. E119-00, West Conshohocken, PA. 2000

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA, AIS, Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10, Bogotá D.C., 2010.

EUROPEAN CONVENTION FOR CONSTRUCTIONAL STEELWORK (ECCS) – Technical Committee 3 Model Code on Fire Engineering, First Edition, Brussels, Belgium 2001

GYPSUM ASSOCIATION (GA) FireResistance Design Manual, Sixteenth Edition, Ref. No. GA- 600-2003, Washington, D.C. 2000

INSTITUTO AMERICANO DE CONSTRUCCIÓN EN ACERO (AISC), “Fire Resistance of Structural Steel Framing”, Estados unidos de América, diciembre 2003.

INTERNATIONAL CODE COUNCIL, INC. (ICC) International Building Code, 2009, Falls Church, VA. 2009

NATIONAL CONCRETE MASONRY ASSOCIATION (NCMA) Steel Column Fire Protection, TEK 7-6. 1996

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION (NFPA) NFPA 251 Standard Methods of Tests of Fire Endurance of Building Construction and Materials, 1999 Edition, Quincy, MA.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION (NFPA) NFPA 5000: Building Construction and Safety Code, 2003 Edition, Quincy, MA. 2003

OMEGA POINT LABORATORIES Inc. (OPL) Directory of Listed Building Products, Materials and Assemblies, Elmendorf, TX. 2003

SCHULTZ, Neil Fire and Flammability Handbook, Van Nostrand Reinhold Company, Inc., New York, NY. 1985

SEI/ASCE 7-10 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, American Society of Civil Engineers (ASCE), Reston, VA. 2010

TWYLT L., HASS R., KLINGSCH W., EDWARDS M., DUTTA D.; Guía de diseño para columnas de perfiles tubulares estructurales sometidas a fuego; Colección Construcción con perfiles tubulares de acero CIDECT-TÜV Verlag.

UNDERWRITERS LABORATORIES INC. (UL) Fire Tests of Building Construction and Materials, Standard No. UL X307, Northbrook, IL. 2003

WALKER, Jerry A. "All Things Gypsum-The Moisture in Gypsum," Walls & Ceilings, 2002 <www.wconline.com>.