



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**COMPORTAMIENTO AL FUEGO DE EDIFICACIONES LIVIANAS CON
CUBIERTA DE MEMBRANA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

VALENTINA ROCÍO LINGAN ROJAS

PROFESOR GUÍA:
MIGUEL ÁNGEL PÉREZ ARIAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MIGUEL BUSTAMANTE SEPÚLVEDA
MARIO WAGNER MUÑOZ

SANTIAGO DE CHILE
2018

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniera Civil
POR: Valentina Rocío Langan Rojas
FECHA: 26/04/2018
PROFESOR GUÍA: Miguel Ángel Pérez Arias

COMPORTAMIENTO AL FUEGO DE EDIFICACIONES LIVIANAS CON CUBIERTA DE MEMBRANA

En muchas instalaciones, con diversos usos, se utilizan estructuras livianas con cubierta de membrana, las cuales ofrecen baja resistencia al fuego. Este tipo de construcciones no está abordado de manera específica en la reglamentación chilena de prevención de incendios, por lo habrían de satisfacer los mismos requisitos que cualquier otro tipo de edificación. Dichos requisitos apuntan fundamentalmente a la resistencia al fuego de la estructura (NCh 935/1), sin considerar otros aspectos del comportamiento al fuego. Bajo este contexto, las edificaciones estudiadas no cumplen con las exigencias mínimas de resistencia al fuego. Por lo tanto, su uso queda limitado a casos que no requieren resistencia al fuego: edificaciones con destino de equipamiento, realizadas con elementos de construcción no combustible, carga de ocupación inferior a cien personas y baja carga combustible, entre otros requisitos.

Sin embargo, debido a la naturaleza de estas edificaciones especiales, las características del desarrollo de un incendio y el comportamiento ante el mismo diferirían de los edificios comunes. En algunos códigos de construcción y estándares de prevención de incendios extranjeros se abordan de manera específica las edificaciones especiales y los requerimientos que estas deben cumplir. En este trabajo se realiza una revisión de la normativa de países desarrollados (Estados Unidos y Europa) y los estándares de una compañía especialista en prevención de pérdidas, y se los compara con la reglamentación vigente en Chile. Con ello, se proponen bases para una normativa chilena de prevención de incendios en edificaciones especiales.

Se concluye que la normativa chilena se encuentra desactualizada en lo que se refiere al comportamiento al fuego de edificaciones especiales. Se deben revisar y modificar los requerimientos de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, para garantizar un comportamiento óptimo que cumpla con los objetivos de la seguridad contra incendios. Para ello, se generan las propuestas pertinentes en cuanto a resistencia y reacción al fuego, disposición de salidas, usos de la edificación, entre otros. De manera general, se debe dar especial importancia a la reacción al fuego de los materiales de la cubierta, para lo cual se recomienda que se exija una reacción al fuego equivalente a C-s2,d0 de las Euroclases. La resistencia al fuego de la estructura no debería cumplir con ninguna clasificación en base a la norma NCh 935/1, mientras se asegure la evacuación de los ocupantes en su interior.

*Todo verdor perecerá
dijo la voz de la escritura
como siempre
implacable*

*pero también es cierto
que cualquier verdor nuevo
no podría existir
si no hubiera cumplido su ciclo
el verdor pericido*

*de ahí que nuestro verdor
esa conjunción un poco extraña
de tu primavera
y de mi otoño
seguramente repercute en otros
enseña a otros
ayuda a que otros
rescaten su verdor*

*por eso
aunque las escrituras
no lo digan
todo verdor
renacerá.*

Mario Benedetti

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo pone punto final a una importante etapa de mi vida. Por medio de estas líneas, quiero agradecer a todos quienes han contribuido, de una u otra manera, a superarla y llenarla de hermosos recuerdos.

A mi familia, por todo su cariño y apoyo. A mis padres, Verónica y Mark; por su confianza y por las oportunidades que me han dado. A mis hermanos, Fernando, Tomás y Mauricio; por su compañía y comprensión. A mis abuelos, Sonia (q.e.p.d.), Magdalena, Sadio y Juan Antonio (q.e.p.d.); por creer siempre en mí. A mis queridos Scooby (q.e.p.d.), Julia, Ringo y Peppa; por alegrarme día a día.

A Jonás, por su amor, comprensión y apoyo incondicional; por compartir conmigo las alegrías y ayudarme a superar las dificultades.

A mis profesores guía y de la comisión, Miguel Pérez, Miguel Bustamante y Mario Wagner; por su disposición y consejos para sacar adelante este trabajo.

A mis amigas del colegio, Iahue, Isa, Pau y Paz; por todos los buenos momentos vividos, por aceptarme siempre como soy y estar conmigo en las buenas y en las malas.

A todos mis amigos de la universidad que han formado parte de este camino. A Magda, Feña, Ara, Sofi, Natu, Kati, Daisy, Mei, Demi, Nico, David, Pancho y Leo; por las horas de estudio, los almuerzos, las tardes de viernes, las prácticas, y tanto más. También a Carla, Cata, Isi, Javi y Marti; por el cariño, las conversaciones, los consejos, y por el viaje a África que no haremos (al menos este año). A Rocío, por su cálida compañía en los laboratorios de Métodos Experimentales.

A mi equipo de balonmano, por dar todo de sí mismas en la cancha, por el compañerismo, por ayudarme a crecer y mejorar, y por permitirme salir de la rutina practicando este lindo deporte.

A la Universidad de Chile, por abrirme puertas, por ampliar mis horizontes, por las valiosas experiencias y aprendizajes que llevo conmigo.

A todos, gracias por ser parte de esta aventura y permitirme ser quien soy hoy.

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivo general.....	2
1.1.2. Objetivos específicos	2
1.2. Alcance	2
1.3. Organización de la memoria	2
2. Marco Teórico.....	4
2.1. Fuego e incendios	4
2.1.1. Combustión.....	4
2.1.2. Incendios	4
2.1.3. Desarrollo de un incendio	5
2.2. Transferencia de calor.....	9
2.3. Acciones térmicas sobre los elementos	10
2.4. Modelos de incendio	10
2.4.1. Curvas nominales.....	10
2.4.2. Curvas paramétricas.....	12
2.4.3. Incendios localizados	16
2.4.4. Modelos avanzados.....	18
2.5. Combustión de sólidos.....	19
2.5.1. Pirólisis	19
2.5.2. Ignición	19
2.5.3. Flujo de calor crítico y temperatura de ignición efectiva	20
2.5.4. Tiempo de ignición	21
2.5.5. Tasa de combustión	21
2.5.6. Propagación de llama.....	22
2.5.7. Efectos de retardantes de combustión.....	22
2.5.8. Producción de humo	23
2.6. Seguridad contra incendios	25
2.6.1. Evacuación de personas	25

2.6.2. Compartimentación.....	26
2.7. Normativa	26
2.7.1. Chile.....	26
2.7.2. Unión Europea	27
2.7.3. España.....	28
2.7.4. Reino Unido.....	28
2.7.5. Estados Unidos	29
2.7.6. FM Global.....	30
3. Estructura	31
3.1. Resistencia al fuego	31
3.1.1. Chile.....	32
3.1.2. Unión Europea	36
3.1.3. España.....	38
3.1.4. Reino Unido.....	40
3.1.5. Estados Unidos	42
3.1.6. FM Global.....	45
3.2. Otras disposiciones	46
3.3. Materiales de la estructura	46
3.3.1. Acero.....	47
3.3.2. Aluminio	48
3.4. Protección al fuego la estructura.....	49
4. Reacción al Fuego.....	51
4.1. Comportamiento de la membrana.....	51
4.1.1. Características de respuesta al fuego	52
4.2. Clases y exigencias de reacción al fuego.....	52
4.2.1. Chile.....	53
4.2.2. Unión Europea	54
4.2.1. España.....	57
4.2.2. Reino Unido.....	58
4.2.3. Estados Unidos	60
4.2.4. FM Global.....	63
4.3. Productos ignífugos	64
5. Diseño de Edificios Especiales	66
5.1. Resistencia y reacción al fuego.....	66
5.2. Otras disposiciones	69
5.3. Usos permitidos	70

5.3.1. Chile.....	70
5.3.2. España.....	70
5.3.3. Reino Unido.....	71
5.3.4. Estados Unidos	72
6. Discusión y Situación Chilena.....	75
6.1. Discusión	75
6.1.1. Resistencia al fuego	76
6.1.2. Reacción al fuego.....	77
6.2. Situación chilena actual	78
6.3. Recomendaciones	79
7. Conclusiones.....	81
8. Bibliografía	84

1. INTRODUCCIÓN

Para los propósitos de este trabajo, se entenderá por “edificaciones livianas con cubierta de membrana” aquellas instalaciones, de carácter permanente o temporal, compuestas por una estructura liviana, y una cubierta de material de tipo textil, el cual podría o no estar tensionado. Por lo general, la perfilería es de acero o aluminio y la cubierta de lona o plástico, ofreciendo baja resistencia al fuego. La rapidez de instalación y el bajo costo constituyen unas de sus principales ventajas. Este tipo de edificaciones se utiliza para una amplia gama de propósitos, por ejemplo: instalaciones de faenas, instalaciones provisionales para comedores, recintos de bodegaje, dormitorios en faenas mineras, eventos (matrimonios, cenas, etc.), exposiciones, entre otros.

Este tipo de estructuras y/o instalaciones no están abordadas de manera específica en la reglamentación chilena. Por lo tanto, tienen que cumplir con los mismos requisitos de resistencia al fuego que se aplican al resto de edificaciones, que dependen de su uso, carga de ocupación, carga combustible, superficie edificada o número de pisos. Estos requerimientos van desde F-120 hasta F-30 (120 y 30 minutos de resistencia al fuego, respectivamente, frente a una curva de incendio estándar, normalizada en Chile por la NCh 935/1). Dado su tipo de perfilería, si estas estructuras son sometidas a un incendio estándar, su colapso se espera antes de los 15 minutos de exposición. En consecuencia, de acuerdo con la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC), su uso queda limitado a casos muy específicos con baja carga combustible y destino de equipamiento.

Sin embargo, el comportamiento al fuego de las edificaciones con cubierta de membrana sería distinto al de edificios comunes, ya que no existiría el efecto de compartimento típico de estos últimos. Aunque esto supondría un menor tiempo para la evacuación de personas, también tendría efectos en el desarrollo del incendio. La tela o membrana de la cubierta se destruiría en los primeros minutos, liberando los gases combustibles e impidiendo que la temperatura se eleve a los rangos de un incendio típico y/o un incendio estándar (NCh 935/1). Estas menores temperaturas podrían tener directa incidencia en el soporte de cargas y el colapso estructural en caso de incendio, por lo que es cuestionable que su resistencia al fuego sea evaluada con la curva de incendio estándar. Por otro lado, además de la resistencia al fuego, podría haber otros aspectos importantes al estudiar el comportamiento al fuego de este tipo de edificaciones.

En países desarrollados se pueden encontrar estándares más avanzados, que en algunos casos abarcan de manera específica las estructuras de membrana, con exigencias y ensayos acordes a la naturaleza de estas instalaciones. Existen también normativas que, para estudiar la resistencia al fuego de elementos de construcción, permiten el uso de curvas de incendio paramétricas u otras alternativas acordes a cada caso. Estas disposiciones permiten ajustarse con mayor precisión a las condiciones de incendio reales que afectan a las estructuras.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es realizar una comparación entre las normas extranjeras y la normativa vigente en Chile, en lo que respecta al comportamiento al fuego de estructuras livianas con cubierta de membrana.

El trabajo sentará las bases para una futura reglamentación chilena de incendios, específica para este tipo de estructuras.

1.1.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos que se pretenden alcanzar con el desarrollo del presente trabajo se listan a continuación:

- Analizar el comportamiento al fuego de los materiales que conforman las edificaciones con cubierta de membrana.
- Caracterizar los tipos de incendio que se podrían producir en estos edificios especiales.
- Comprender los requerimientos de resistencia al fuego de estructuras que se establecen en los estándares extranjeros.
- Analizar la normativa nacional, considerando lo establecido en la reglamentación extranjera.
- Proponer bases para una futura reglamentación nacional de prevención de incendios, específica para edificaciones livianas con cubierta de membrana.

1.2. Alcance

El alcance del trabajo corresponde a la revisión de la normativa vigente nacional e internacional en lo que respecta a la resistencia al fuego de estructuras livianas de materiales incombustibles (acero, aluminio) con cubierta de membrana. Las edificaciones cubiertas de membrana con estructura de madera no están contempladas en este trabajo. No se contempla la generación de nueva información, sino que la revisión y comparación de normativas existentes.

1.3. Organización de la memoria

El presente trabajo se organiza en siete capítulos, cuyos contenidos aportan al tema como se describe a continuación:

- Capítulo 1: Se introduce el trabajo de memoria, presentando la motivación para su desarrollo, además de los objetivos generales y específicos que se persiguen.
- Capítulo 2: Se desarrollan los conceptos que tienen mayor relevancia para el tema tratado.
- Capítulo 3: Se presentan aquellas consideraciones relativas a la resistencia al fuego de la estructura de las edificaciones con cubierta de membrana.

- Capítulo 4: Se presentan las consideraciones que respectan a la reacción al fuego de la edificación, considerando particularmente los materiales que podrían conformar su cubierta.
- Capítulo 5: Se recogen las normas de ensayo, clasificación y exigencias de resistencia al fuego revisadas, con el fin de determinar los aspectos más relevantes del comportamiento al fuego de edificaciones con cubierta de membrana.
- Capítulo 6: Se presentan la discusión, la situación chilena actual y se establecen recomendaciones para modificar la normativa chilena actual.
- Capítulo 7: Se presentan las conclusiones del trabajo.
- Capítulo 8: Se listan las referencias bibliográficas consultadas.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Fuego e incendios

2.1.1. Combustión [1]

La combustión, que se manifiesta generalmente en forma de fuego, es un proceso químico de oxidación de un material combustible, que ocurre de manera suficientemente rápida como para producir energía, además de gases, líquidos y sólidos vaporizados, material particulado y cenizas. La energía generada por la combustión se presenta en forma de sonido, luz y calor. Es esta última forma la más preocupante en cuanto al daño que puede causar.

La cantidad de energía térmica que una sustancia combustible debe absorber para encenderse y quemarse se denomina energía de ignición, y depende de cada sustancia. Se pueden clasificar los combustibles en dos grandes grupos: aquellos en estado gaseoso o que se vaporizan fácilmente, que requieren fuentes de ignición de baja energía; y aquellos que necesitan un precalentamiento sustancial para encenderse, lo cuales requieren fuentes de ignición de alta energía. Parte del calor que se genera de la combustión sirve como energía de ignición para el resto del combustible, produciéndose una reacción en cadena. Este concepto se denomina *heat feedback* o “retroalimentación de calor”.

Entonces, para que la combustión pueda iniciarse y continuar en el tiempo, deben presentarse una serie de condiciones o factores: presencia de un material combustible (por lo general compuestos orgánicos); presencia de un oxidante o comburente (oxígeno); la energía de activación; y la reacción en cadena mediante retroalimentación de calor, que permite la combustión sostenida sin la presencia constante de una fuente de ignición, al mantener una cierta temperatura mínima.

Asimismo, para que la combustión cese (se extinga el fuego), se deben eliminar o limitar uno o más de dichos factores. Es decir, debe haber una limitación de combustible, oxígeno o temperatura.

2.1.2. Incendios

Un incendio es la ocurrencia no deseada y no controlada de combustión, que atenta contra la vida, los bienes materiales y el medio ambiente. En lo que se refiere a ingeniería contra incendios, el fenómeno puede ser descrito por sus curvas de temperatura y tasa de liberación de calor en función del tiempo. De manera general, se pueden agrupar los incendios como compartimentados y no compartimentados, dependiendo de las condiciones de confinamiento que provee el espacio en que se produce.

2.1.3. Desarrollo de un incendio

Un típico incendio compartimentado ocurre en cuatro etapas o fases: ignición, crecimiento y decaimiento. Además, se identifica un proceso denominado flashover.

- Fase de ignición: se produce el calentamiento del (los) elemento(s) combustible(s), por medio de procesos de combustión con llamas, sin llamas o por radiación, hasta su ignición. El fuego inicialmente se encuentra localizado y la distribución de temperaturas en el compartimento es muy poco uniforme. Si no existen limitaciones de combustible y oxígeno, el incendio crece, emitiendo gases calientes que se acumulan en la parte superior del recinto, formando un estrato caliente en crecimiento.
- Fase de crecimiento: aumenta rápidamente la velocidad de calentamiento, alcanzándose la temperatura máxima y la participación total del compartimento en el incendio, como resultado del flashover.
- Flashover: se define como una fase de transición en el desarrollo de un incendio compartimentado, en que las superficies expuestas a la radiación térmica alcanzan la temperatura de ignición de forma aproximadamente simultánea y el fuego se propaga rápidamente en el espacio [2]. De este proceso resulta un incendio generalizado, cuya duración depende de la carga combustible y la ventilación del recinto.
- Fase de decaimiento: la mayor parte del combustible se ha consumido y comienza a disminuir la tasa de combustión, llegando eventualmente a la extinción del fuego.

La curva tiempo-temperatura idealizada de un incendio natural compartimentado se muestra en la Figura 2.1, donde se la compara con una curva nominal estándar (que se verá en la sección 102.4.1). Un incendio real tiene características que no son tomadas en cuenta en la curva estándar.

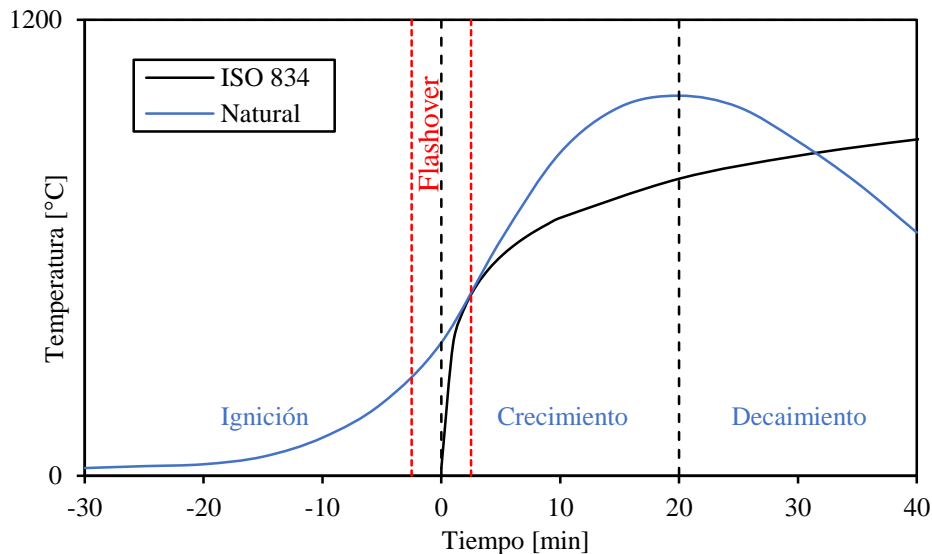


Figura 2.1. Curva tiempo-temperatura típica de un incendio natural compartimentado y curva tiempo-temperatura nominal ISO 834 [3]. La escala de tiempo está acorde a la curva nominal, que comienza cuando el incendio está totalmente desarrollado. La duración de cada fase del incendio natural varía dependiendo de las condiciones en que se produce.

2.1.3.1. Liberación de calor

La energía térmica o calorífica es una forma de energía que se caracteriza por la vibración de las moléculas de los materiales, siendo capaz de iniciar y sustentar cambios químicos y cambios de estado [4]. Corresponde a la energía necesaria para cambiar la temperatura de un objeto: al añadir energía térmica, la temperatura aumenta; al quitarla, la temperatura disminuye.

Para que se produzca la combustión se requiere la suficiente cantidad de oxígeno para reaccionar con el combustible disponible, como se vio anteriormente. La liberación de calor está directamente relacionada con la cantidad de oxígeno necesaria para la combustión completa de una sustancia. La energía liberada por gramo de oxígeno consumido durante la combustión completa de materiales combustibles naturales y orgánicos es aproximadamente constante, promediando 13,1 kJ/g [5].

La tasa de liberación de calor (HRR, por sus siglas en inglés) corresponde a la cantidad de energía térmica liberada por un incendio por unidad de tiempo. Es considerada una de las más importantes variables al describir el peligro que supone un incendio [6]. La tasa de liberación de calor es influenciada por la cantidad de combustible y sus características, la ventilación y la eficiencia en la combustión. Alguna parte de la energía calorífica es liberada a través de aberturas, y otra permanece sin quemar [7].

A lo largo del desarrollo de un incendio se dan, de manera general, dos escenarios [8]:

- Durante la fase de crecimiento, si hay siempre oxígeno suficiente para sustentar la combustión, entonces la tasa de liberación de calor se encuentra limitada por la disponibilidad de combustible; es decir, corresponde a un incendio controlado por la carga combustible. Las características, distribución y disposición de los elementos combustibles dominan la liberación de calor del incendio.
- Posterior al flashover, todas las superficies combustibles expuestas se ven involucradas en el incendio. Si la ventilación del compartimento no permite que entre suficiente aire (oxígeno) para sustentar la combustión, entonces la tasa de liberación de calor pasa a estar limitada por el oxígeno; es decir, corresponde a un incendio controlado por la ventilación. Mientras mayor es la carga combustible, mayor será la duración del incendio y, por tanto, mayor será su daño potencial.

La Figura 2.2 muestra el desarrollo de la tasa de liberación de calor en el tiempo, considerando los escenarios descritos. De no existir limitaciones de oxígeno, la tasa de liberación de calor aumenta hasta un punto determinado por la carga combustible, que es la que controla la combustión en dicho caso.

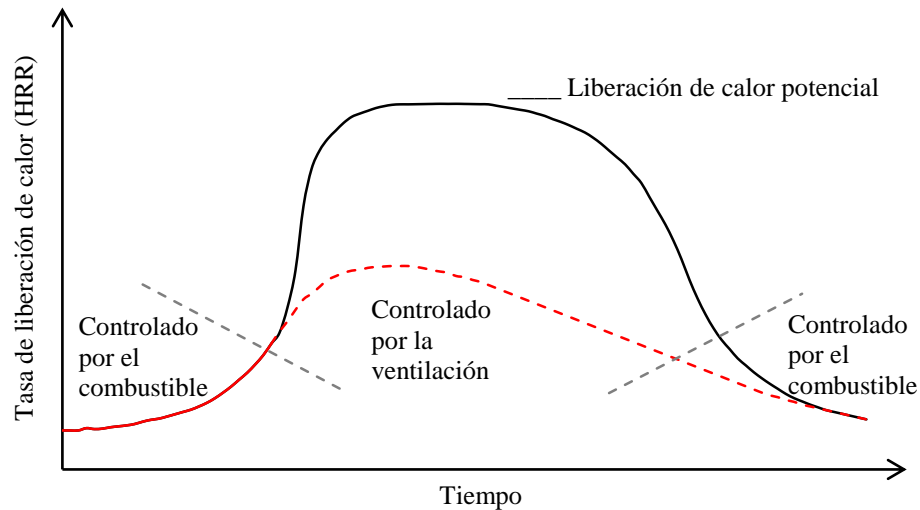


Figura 2.2. Tasa de liberación de calor en función del tiempo, en diferentes escenarios de incendio.
Fuente: CFBT-US [9].

2.1.3.2. Factores que influyen en el desarrollo de un incendio

La características de un incendio real (duración, temperaturas, altura de llamas, ocurrencia de flashover, entre otros), dependen de factores como la carga combustible, la ventilación, las características y geometría del compartimento (o bien, la no compartimentación), la ubicación del fuego y las condiciones ambientales [10].

La temperatura máxima y la duración del incendio son las principales características que afectan el comportamiento y resistencia al fuego de las estructuras. Dichas características se ven afectadas particularmente por los factores de ventilación y carga combustible. Además, estos factores tienen una importante influencia en el flashover, fenómeno que puede no ocurrir si el incendio decae antes de alcanzarse las condiciones necesarias, o si la transición al incendio generalizado ocurre de manera lenta.

- Ventilación

La ventilación se refiere a la facilidad que tiene el aire del recinto de ser intercambiado con el aire exterior. Cuando un incendio está controlado por la ventilación del compartimento, los cambios en ella influyen directamente en el comportamiento del fuego. Si se disminuye la ventilación, se reducirá la tasa de liberación de calor y la velocidad de desarrollo del incendio, aumentando por ende su duración. Por el contrario, si se aumenta la ventilación del recinto, se incrementará la tasa de liberación de calor y la velocidad de desarrollo del incendio, disminuyendo su duración [9].

Entonces, si la ventilación es insuficiente, el fuego puede no alcanzar nunca el punto máximo de liberación de calor de un incendio totalmente desarrollado. En este caso se produciría una fase de ardido lento y sin llama, a temperaturas menores que las de un incendio típico, hasta la eventual extinción.

Los cambios en la ventilación pueden ser causados por el propio incendio (rotura del vidrio de ventanas, o destrucción de la membrana en el caso de estructuras con este tipo de cubierta), por la acción de los ocupantes (al abrir puertas o ventanas), o bien por la acción de bomberos.

- Carga combustible

La cantidad, tipo de material, área superficial, y disposición de la carga combustible influyen en las características de la combustión de un incendio.

La carga combustible es una medida de la cantidad de energía que proporcionan los combustibles por unidad de superficie del recinto. Este factor influye de forma decisiva en la duración de un incendio. La carga combustible debe proveer suficiente energía calorífica para desarrollar las condiciones de flashover. Además, si la carga combustible es baja, no se alcanzará un incendio limitado por la ventilación.

- Relación ventilación – carga combustible [7]

Ambos factores se encuentran estrechamente interrelacionados, pues la carga combustible requiere de oxígeno para quemarse, mientras que la ventilación aporta a la combustión siempre que haya elementos combustibles para quemar.

En un incendio controlado por el combustible (no hay limitación de oxígeno), la tasa de liberación de calor está limitada por la superficie combustible disponible. Las temperaturas son mayores que en un incendio controlado por la ventilación y mucha energía calorífica se pierde por las aberturas del recinto.

En un incendio controlado por la ventilación (área de ventilación restringida), el suministro de aire se reduce y la tasa de liberación de calor se encuentra limitada. Esto causa que el combustible se queme de manera más lenta, más ineficiente, a menores temperaturas y por más largo tiempo.

La demarcación entre un incendio controlado por la ventilación y uno controlado por la carga combustible depende de la proporción entre estos factores. Los incendios controlados por la ventilación son más comunes en incendios de edificios y usualmente producen las condiciones más severas para la estructura. Es por esto que normalmente se da por hecho que existe una combustión controlada por la ventilación en un incendio completamente desarrollado.

En la Tabla 2.1 se resumen los cambios que se generarían en ciertas características del incendio, si la ventilación se aumenta o disminuye, cuando no hay limitación por carga combustible; o si la carga combustible se aumenta o disminuye, cuando no hay limitación por ventilación.

En la Tabla 2.2, por otra parte, se comparan los incendios controlados por la ventilación y por la carga combustible, indicando en cuál de ellos ocurre la mayor duración y temperaturas, respectivamente.

Tabla 2.1. Influencia de la ventilación y carga combustible en la duración, temperaturas y tasa de liberación de calor de un incendio.

Característica incendio	Variación de parámetros			
	Aumento ventilación	Disminución ventilación	Aumento carga combustible	Disminución carga combustible
Duración	Disminuye	Aumenta	Aumenta	Disminuye
Temperatura	Aumenta	Disminuye	Aumenta	Disminuye
HRR	Aumenta	Disminuye	Aumenta	Disminuye

Tabla 2.2. Comparación de la duración y temperaturas de un incendio según si es controlado por la ventilación o por la carga combustible.

Parámetros comparativos	
Incendio controlado por la ventilación	Incendio controlado por la carga combustible
Mayor duración	Menor duración
Menor temperatura	Mayor temperatura

2.2. Transferencia de calor [11]

En un incendio, el calor liberado es transferido a los elementos estructurales y otros elementos expuestos. La transferencia de calor determina la elevación de la temperatura en dichos elementos y su eventual ignición y combustión.

Existen tres mecanismos básicos de transferencia de calor, que son la conducción, la convección y la radiación, como se detalla a continuación.

- a) **Conducción:** es la transferencia de calor a través de un material, por un mecanismo molecular que no implica un movimiento masivo, desde una región de mayor temperatura hacia una de menor temperatura; o de un cuerpo a otro por contacto directo.
- b) **Convección:** es la transferencia de calor dentro de un medio, como un gas o un líquido, por movimiento masivo del fluido, inducido de forma mecánica o por efectos gravitacionales debido a temperaturas no uniformes dentro del fluido.
- c) **Radiación:** consiste en la transferencia de calor por medio de perturbaciones electromagnéticas (por ejemplo, radiación infrarroja), a través del espacio o la materia, desde una región de mayor temperatura hacia una de menor temperatura.

En todo incendio, es probable que los tres mecanismos contribuyan en la transferencia de calor, pero normalmente uno de ellos predomina en una determinada etapa o en una determinada ubicación.

El mecanismo de conducción determina la tasa de flujo de calor que entra y atraviesa los sólidos. Por ello, es importante en la ignición y propagación de llamas en sólidos combustibles. También es relevante en el estudio de la resistencia al fuego, pues se requiere conocimiento de la transferencia de calor a través de los límites del compartimento y hacia los elementos de la estructura.

La transferencia de calor por convección, al estar asociada al intercambio de calor entre un gas o líquido y un sólido, involucra movimiento del medio fluido. Esta ocurre en todas las fases de un incendio, pero es particularmente relevante en etapas tempranas, cuando los niveles de radiación térmica son bajos.

La transferencia radiativa, en cambio, que no requiere de un medio interpuesto entre la fuente de calor y el receptor, se hace predominante a medida que el diámetro del lecho de combustible se incrementa más allá de los 30 cm, aproximadamente. La radiación determina el crecimiento y propagación de los incendios en compartimentos. Este es el mecanismo por el cual los objetos a cierta distancia del fuego son calentados hasta las condiciones de ignición, y es responsable de la propagación de fuego entre edificaciones distintas.

2.3. Acciones térmicas sobre los elementos

Las acciones térmicas sobre un elemento estructural están dadas por el flujo de calor neto hacia la superficie del mismo. De acuerdo a la norma EN 1991-1-2 [12], el flujo de calor neto debe ser determinado considerando la transferencia de calor por convección y por radiación, como indica la Ecuación 2.1.

$$\dot{h}_{\text{neto}} = \dot{h}_{\text{neto,c}} + \dot{h}_{\text{neto,r}} \quad 2.1$$

Donde,

$\dot{h}_{\text{neto,c}}$ [W/m²]: flujo de calor neto hacia la superficie del elemento, por unidad de área.

$\dot{h}_{\text{neto,c}}$ [W/m²]: flujo de calor convectivo neto por unidad de área.

$\dot{h}_{\text{neto,r}}$ [W/m²]: flujo de calor radiativo neto por unidad de área.

El flujo neto de calor convectivo es proporcional a la diferencia entre las temperaturas, en grados Celsius, de la superficie del elemento y del gas en el entorno.

El flujo neto de calor radiativo, es proporcional a la diferencia entre las cuartas potencias de las temperaturas, en Kelvin, de la superficie del elemento y de radiación del entorno. La temperatura de radiación del entorno puede ser representada por la temperatura del gas en el entorno si el elemento se encuentra completamente inmerso en el incendio.

Dado lo anterior, para determinar las acciones térmicas sobre los elementos es fundamental conocer las temperaturas del entorno, las cuales son dadas por los modelos de incendio.

2.4. Modelos de incendio

Para estimar el desarrollo de las temperaturas de un incendio y poder predecir las acciones térmicas en los elementos estructurales, se pueden utilizar diversos modelos. Generalmente se utiliza la curva nominal temperatura-tiempo establecida en la norma ISO 834. También existen alternativas que permiten modelar un incendio natural (modelos basados en la dinámica de fluidos computacional o bien curvas paramétricas), además de modelos de incendios localizados.

2.4.1. Curvas nominales

Las curvas nominales o normalizadas de incendio establecen la evolución de la temperatura del gas en el compartimento incendiado en función del tiempo, transcurrido desde que el incendio está totalmente desarrollado. Entre las curvas nominales se encuentran las curvas estándar y otras curvas alternativas específicas para ciertas situaciones de incendio, mostradas en la Figura 2.3.

Las curvas estándar son válidas para material incendiado fundamentalmente de tipo celulósico y son utilizadas para establecer las propiedades de resistencia al fuego de los materiales de construcción. Aquellas establecidas en las normas ISO 834 [3] y ASTM E119 [13] son las más utilizadas, presentando una gráfica muy similar.

La norma ASTM E119 se usa en los Estados Unidos y define la curva de calentamiento mediante una tabla de valores de temperatura en función del tiempo de ensayo. Por otra parte, tanto la curva prescrita en la norma chilena NCh 935/1 [14], como la que se utiliza en Europa de acuerdo a EN 1363-1 [15], están basadas en la curva ISO 834, que se define por la Ecuación 2.2.

$$T = T_0 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad 2.2$$

Donde,

T [°C]: temperatura media del horno de ensayo en el instante t .

T_0 [°C]: temperatura inicial del horno de ensayo (por lo general 20 °C).

t [min]: tiempo desde inicio del ensayo.

En la norma europea EN 1363-2 [16] se proponen, además de la curva nominal estándar (ISO 834), tres curvas alternativas de temperatura, que se adaptan a otras situaciones específicas. Éstas son la curva de incendio exterior, la curva de hidrocarburos y la curva de calentamiento lento. Todas ellas se muestran en la Figura 2.3.

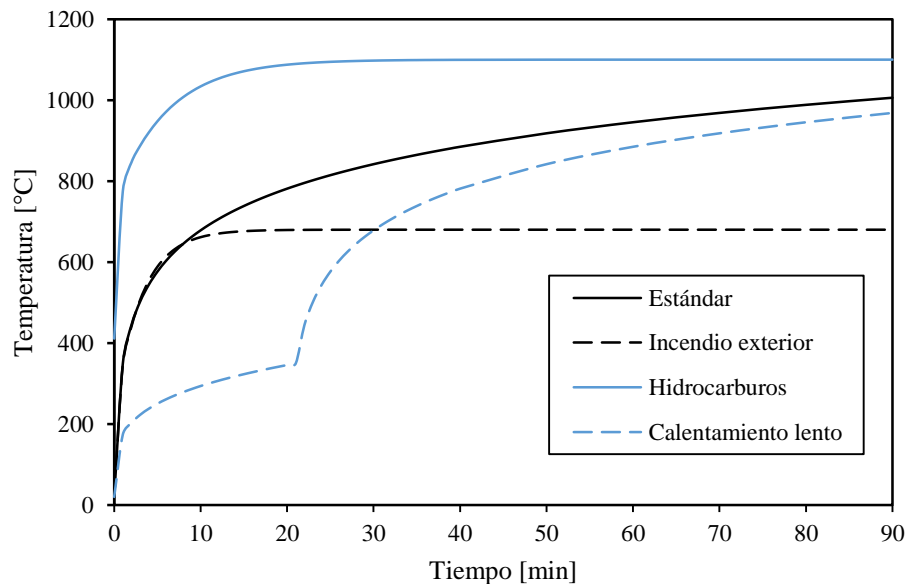


Figura 2.3. Curvas nominales de temperatura en función del tiempo, de acuerdo con las normas europeas EN 1363-1 y EN 1363-2.

La curva de incendio exterior se utiliza para estudiar el efecto producido en elementos estructurales situados en el exterior de un recinto, por un incendio en el interior del mismo, y que son afectados a través de las aberturas del recinto. Esta curva de calentamiento se define por la Ecuación 2.4.

La curva de hidrocarburos adquiere relevancia cuando el material incendiado tiene un poder calorífico similar al de los hidrocarburos. Esta curva de calentamiento se caracteriza por sus altas temperaturas y rápida tasa de crecimiento, y está definida por la Ecuación 2.4.

La curva de calentamiento lento, definida por la Ecuación 2.5, está diseñada para evaluar el comportamiento al fuego de materiales de protección intumescentes. Estos se caracterizan por su incremento de volumen frente a altas temperaturas, por lo que se utilizan en protección contra incendios.

$$T = 660(1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-3,8t}) + 20 \quad 2.3$$

$$T = 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,313e^{-2,5t}) + 20 \quad 2.4$$

$$T = \begin{cases} 154t^{0,25} + 20, & 0 < t \leq 21 \\ 345 \log_{10}(8(t - 20) + 1) + 20, & x > 21 \end{cases} \quad 2.5$$

Donde,

T [°C]: temperatura media del horno de ensayo en el instante t.

t [min]: tiempo desde inicio del ensayo.

2.4.2. Curvas paramétricas

Las curvas paramétricas, al igual que las nominales, representan la relación temperatura-tiempo de un incendio totalmente desarrollado. Sin embargo, en ellas se tienen en cuenta ciertos parámetros físicos del incendio: la densidad de carga combustible, las condiciones de ventilación y las condiciones térmicas del contorno del recinto. Por lo tanto, reproducen de mejor manera la realidad del compartimento estudiado.

Las curvas paramétricas se definen por una fase de calentamiento hasta una temperatura máxima, seguida de una fase de enfriamiento a partir de dicha temperatura, como se detalla en el Anexo A de la norma EN 1991-1 (Eurocódigo 1) [12]. Son aplicables a recintos de incendio de las siguientes características:

- Sin aberturas en el techo.
- Área menor o igual a 500 m².
- Altura máxima de 4 m.
- Carga combustible principalmente de tipo celulósico, que se consume completamente en el incendio.

2.4.2.1. Fase de calentamiento

La curva de temperatura-tiempo en la fase de calentamiento está dada por la Ecuación 2.6. Dicha ecuación se aproxima a la curva nominal estándar cuando $\Gamma = 1$.

$$\Theta_g = 20 + 1325 (1 - 0,324e^{-0,2t^*} - 0,204e^{-1,7t^*} - 0,472e^{-19t^*}) \quad 2.6$$

Donde,

Θ_g [°C]: temperatura del gas en el compartimento incendiado.

t^* [h]: tiempo modificado, definido por la Ecuación 2.7.

$$t^* [h] = t \cdot \Gamma \quad 2.7$$

Donde,

$t [h]$: tiempo (desde el inicio del incendio totalmente desarrollado).

$\Gamma [-]$: factor dado por la Ecuación 2.8.

$$\Gamma = \left(\frac{O}{b}\right)^2 / \left(\frac{0,04}{1160}\right)^2 \quad 2.8$$

Donde,

$O [m^{1/2}]$: factor de huecos, dado por la Ecuación 2.9, con límites $0,02 \leq O \leq 0,20$.

$b [J/m^2s^{1/2}K]$: factor definido por la Ecuación 2.10, con límites $100 \leq b \leq 2200$.

$$O = A_v \sqrt{h_{eq}/A_t} \quad 2.9$$

$$b = \sqrt{\rho c \lambda} \quad 2.10$$

Donde,

$A_v [m^2]$: área total de huecos verticales en todos los muros.

$h_{eq} [m]$: promedio ponderado de la altura de ventanas en todos los muros.

$A_t [m^2]$: área total del recinto (muros, techo y suelo, incluyendo huecos).

$\rho [kg/m^3]$: densidad del contorno del recinto.

$c [J/kgK]$: calor específico del contorno del recinto.

$\lambda [W/mK]$: conductividad térmica del contorno del recinto.

2.4.2.2. Temperatura máxima

La temperatura máxima $\Theta_{m\acute{a}x}$ en la fase de calentamiento ocurre cuando $t^* = t_{m\acute{a}x}^*$, tiempo que está dado por la Ecuación 2.11. A partir de esa temperatura comienza la fase de enfriamiento.

$$t_{m\acute{a}x}^* = t_{m\acute{a}x} \cdot \Gamma \quad 2.11$$

Donde,

$t_{m\acute{a}x} [h]$: tiempo máximo, dado por la Ecuación 2.12.

$\Gamma [-]$: factor dado por la Ecuación 2.8.

$$t_{m\acute{a}x} = \text{m\acute{a}x} \left\{ \left(0,2 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{q_{t,d}}{O} \right); t_{l\acute{i}m} \right\} \quad 2.12$$

Donde,

$q_{t,d} [MJ/m^2]$: carga combustible de diseño relativa al área total A_t del recinto, dada por la Ecuación 2.13, con límites $50 \leq q_{t,d} \leq 1000$.

$O [m^{1/2}]$: factor de huecos, dado por la Ecuación 2.9, con límites $0,02 \leq O \leq 0,20$.

$t_{l\acute{i}m} [h]$: tiempo límite, equivalente a 25, 20 o 15 minutos, en caso de tasa de crecimiento del fuego lenta, media o rápida, respectivamente, según Anexo E de la norma citada.

$$q_{t,d} = q_{f,d} \cdot A_f/A_t \quad 2.13$$

Donde,

$q_{f,d}$ [MJ/m²]: carga combustible de diseño relativa al área A_f del suelo del recinto, calculada como se indica en el Anexo E de la norma citada.

A_f [m²]: área del suelo del recinto.

Si $t_{máx}$ está dado por $t_{lím}$, el incendio se encuentra controlado por el combustible; si $t_{máx}$ está dado por $(0,2 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{q_{t,d}}{O})$, el incendio se encuentra controlado por la ventilación.

2.4.2.3. Fase de enfriamiento

Las curvas de temperatura-tiempo en la fase de enfriamiento están dadas por la Ecuación 2.14.

$$\Theta_g = \begin{cases} \Theta_{máx} - 625(t^* - t_{máx}^* \cdot x), & t_{máx}^* \leq 0,5 \\ \Theta_{máx} - 250(3 - t_{máx}^*)(t^* - t_{máx}^* \cdot x), & 0,5 < t_{máx}^* \leq 2 \\ \Theta_{máx} - 250(t^* - t_{máx}^* \cdot x), & t_{máx}^* \geq 2 \end{cases} \quad 2.14$$

Donde,

t^* [h]: tiempo modificado dado por la Ecuación 2.7.

$t_{máx}^*$ [h]: tiempo máximo dado por la Ecuación 2.15.

x [-]: factor dado por la Ecuación 2.16.

$$t_{máx}^* = \left(0,2 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{q_{t,d}}{O}\right) \cdot \Gamma \quad 2.15$$

$$x = \begin{cases} 1,0, & t_{máx} > t_{lím} \\ t_{lím} \cdot \frac{\Gamma}{t_{máx}^*}, & t_{máx} = t_{lím} \end{cases} \quad 2.16$$

En la Figura 2.4 se muestran cuatro curvas paramétricas, elaboradas variando diferentes parámetros, acompañadas de la curva de incendio estándar. Los valores utilizados para cada curva paramétrica son indicados en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Parámetros utilizados para la obtención de las cuatro curvas paramétricas mostradas en la Figura 2.4.

Parámetros	Curva Paramétrica 1	Curva Paramétrica 2	Curva Paramétrica 3	Curva Paramétrica 4
O [m ^{1/2}]	0,07	0,07	0,20	0,20
b [J/m ² s ^{1/2} K]	2030	2030	2030	400
Γ [-]	1,00	1,00	8,16	210,25
$q_{t,d}$ [MJ/m ²]	700	500	500	500

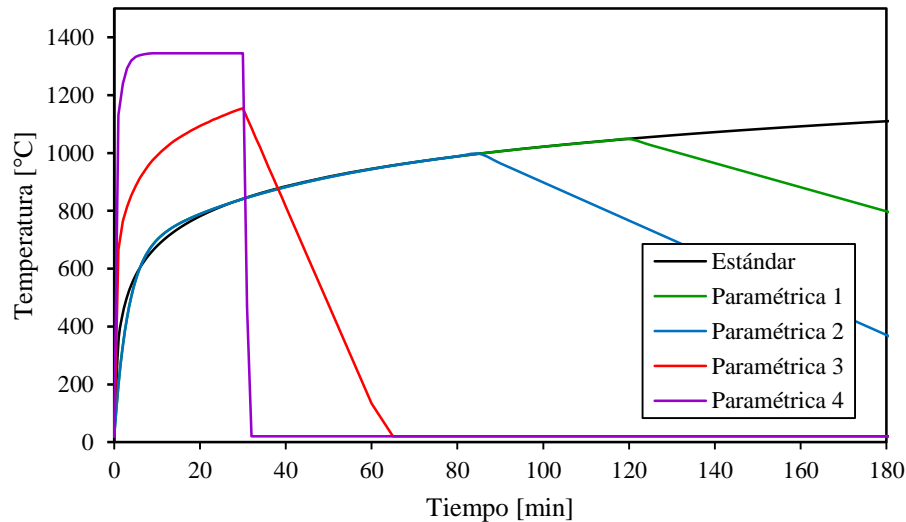


Figura 2.4. Ejemplos de curvas paramétricas de acuerdo al EN 1991-1-2 [12], elaboradas variando diferentes parámetros (ver Tabla 2.3); mostradas en relación a la curva estándar ISO 834.

Entre los parámetros de la curva 1 y la curva 2, existe una disminución en la carga de fuego relativa al área total del recinto $q_{t,d}$. El efecto de esta reducción se traduce en una menor duración de la fase de calentamiento, es decir, el enfriamiento comienza antes.

En comparación con la curva 2, la curva 3 tiene un factor de huecos O más elevado (igual al límite superior de los valores que puede tomar este parámetro). Es decir, el recinto se encuentra más ventilado, permitiendo la entrada de oxígeno para la combustión. El efecto que tiene esto es una menor duración de la fase de calentamiento, pero alcanzando temperaturas más elevadas que aquellas alcanzadas en la curva 2.

Entre los parámetros de la curva 3 y la curva 4, existe una reducción del factor b , que se relaciona con las características de densidad, calor específico y conductividad del cerramiento (ver Ecuación 2.10). El efecto de esta variación es que en la curva 4 el incendio alcanza temperaturas más elevadas, y la fase de enfriamiento ocurre más rápidamente.

En el caso de estructuras con cubierta de membrana, se esperaría la destrucción de la membrana tempranamente en el desarrollo del incendio, por lo que el factor de huecos O sería elevado, como ocurre en las curvas paramétricas 3 y 4. A su vez, las características de una membrana de, por ejemplo, PVC, entregan un valor del factor b cercano al de la curva 4.

Se podría establecer que la curva 4 es la que mejor aproxima las características de un incendio en estructuras de membrana. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que tanto las funciones que parametrizan las curvas como los rangos de sus parámetros están basados en incendios compartimentados. Además, una de las limitaciones de las curvas paramétricas es que estas no son aplicables a recintos con aberturas en la cubierta.

Al destruirse la membrana, se podría alcanzar un grado tal de ventilación, que el calor podría ser liberado al exterior a una alta tasa y la temperatura podría no alcanzar los mismos rangos que se alcanzan en las curvas paramétricas o en la curva estándar.

2.4.3. Incendios localizados

Un incendio localizado es aquel que involucra solamente un área limitada de la carga combustible del compartimento, y en el cual la distribución de temperaturas no es uniforme. Corresponde a un escenario de incendio pre-flashover. Cuando la ocurrencia de flashover es improbable, deben ser tomadas en cuenta las acciones térmicas de un incendio localizado, de acuerdo a la norma EN 1991-1-2 [12].

En el Anexo C de dicha norma, se plantean dos modelos de incendio localizado: uno de ellos es válido cuando la llama no impacta el techo (modelo de Heskestad), y el otro, cuando la llama sí impacta el techo del recinto (modelo de Hasemi). En ambos se sitúa la carga de fuego en la posición previsible más desfavorable.

Los modelos de incendios localizados permiten estimar la altura de llama y temperatura, y son válidos cuando se cumplen las siguientes condiciones:

- El diámetro del incendio es menor o igual a 10 m.
- La tasa de liberación de calor del incendio es menor o igual a 50 MW.

2.4.3.1. Altura de llamas y temperaturas

La altura de llamas L_f , en metros, de un incendio localizado (ver Figura 2.5), está dada por la Ecuación 2.17.

$$L_f = -1,02 D + 0,0148 Q^{2/5} \quad 2.17$$

Si la llama no impacta el techo del compartimento (es decir, $L_f < H$ en la Figura 2.5), o si el incendio ocurre al aire libre, la temperatura $\Theta_{(z)}$ en la columna de fuego a lo largo del eje vertical de simetría de la llama, está dada por la Ecuación 2.18.

$$\Theta_{(z)} = 20 + 0,25 Q_C^{2/3} (z - z_0)^{-5/3} \leq 900 \quad 2.18$$

$$z_0 = -1,02 D + 0,00524 Q^{2/5} \quad 2.19$$

Donde,

D [m]: diámetro del incendio, ver Figura 2.5.

Q [W]: tasa de liberación de calor, de acuerdo con Anexo E de la norma citada.

Q_C [W]: parte convectiva de la tasa de liberación de calor, igual a $0,8 Q$, por defecto.

z [m]: altura a lo largo del eje de la llama, ver Figura 2.5.

z_0 [m]: origen virtual del eje de la llama.

H [m]: distancia entre el foco del incendio y el techo del compartimento, ver Figura 2.5.

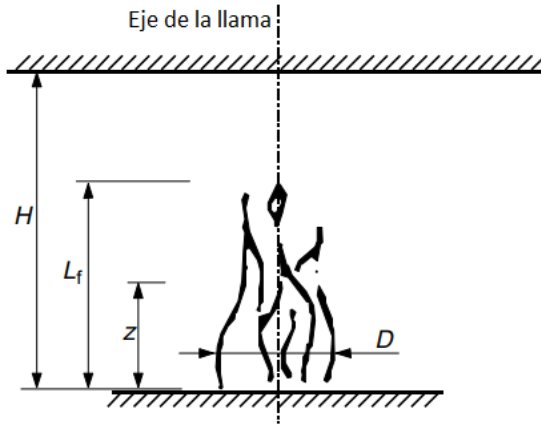


Figura 2.5. Esquema de un incendio localizado cuya llama no impacta el techo del compartimento (Fuente: EN 1991-1-2 [12]).

Cuando la llama sí impacta el techo (es decir, $L_f \geq H$, ver Figura 2.6), el flujo de calor recibido por la superficie unitaria expuesta al fuego al nivel del techo, está dado por la Ecuación 2.20, y la longitud horizontal de la llama (ver Figura 2.6) está dada por la Ecuación 2.22.

$$\dot{h} = \begin{cases} 100000, & y \leq 0,30 \\ 136300 \text{ a } 121000 y, & 0,30 < y < 1,0 \\ 15000 y^{-3,7}, & y \geq 1,0 \end{cases} \quad 2.20$$

$$y = \frac{r + H + z'}{L_h + H + z'} \quad 2.21$$

$$L_h = (2,9 H (Q_H^*)^{0,33}) - H \quad 2.22$$

$$Q_H^* = \frac{Q}{1,11 \cdot 10^6 \cdot H^{2,5}} \quad 2.23$$

$$z' = \begin{cases} 2,4 D \left((Q_D^*)^{\frac{2}{5}} - (Q_D^*)^{\frac{2}{3}} \right), & x < 0 \\ 2,4 D \left(1,0 - (Q_D^*)^{\frac{2}{5}} \right), & x \geq 0 \end{cases} \quad 2.24$$

$$Q_D^* = \frac{Q}{1,11 \cdot 10^6 \cdot D^{2,5}} \quad 2.25$$

Donde,

r [m]: distancia horizontal entre el eje vertical del incendio y el punto a lo largo del techo donde el flujo térmico es calculado, ver Figura 2.6.

H [m]: distancia entre el foco del incendio y el techo, ver Figura 2.6.

L_h [m]: longitud horizontal de la llama que impacta el techo, ver Figura 2.6.

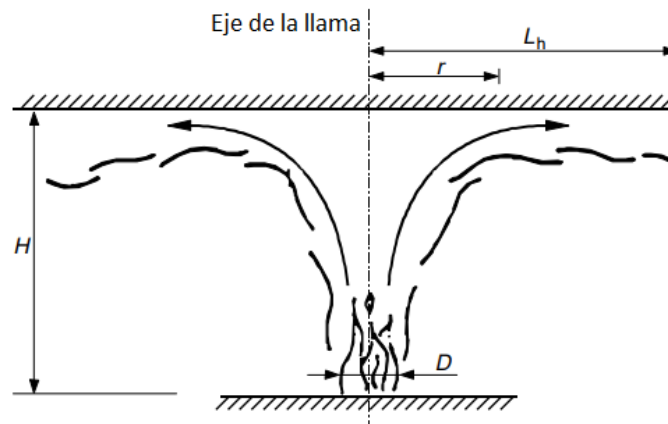


Figura 2.6. Esquema de un incendio localizado cuya llama sí impacta el techo del compartimento (Fuente: EN 1991-1-2 [12]).

En el caso de existir varios incendios localizados separados, la Ecuación 2.20 permite obtener los flujos de calor individuales que recibe la superficie unitaria expuesta al fuego al nivel del techo. El flujo de calor total puede ser considerado como la suma de los flujos de calor individuales, con un límite de $100.000 \text{ [W/m}^2\text{]}$.

2.4.4. Modelos avanzados

Los modelos avanzados de incendio del Eurocódigo (EN 1991-1-2, Anexo E [12]) toman en cuenta las propiedades del gas, el intercambio de masa y el intercambio de energía. Por lo general, los métodos de cálculo consisten en procedimientos iterativos. Entre los modelos avanzados se encuentran los de una zona, los de dos zonas y los modelos basados en la dinámica de fluidos computacional (CFD).

2.4.4.1. Modelos de una zona

Los modelos de una zona aplican a condiciones de incendio post-flashover. Se asume en el compartimento una distribución de temperaturas uniforme y dependiente del tiempo. Además, se consideran homogéneas en el compartimento la densidad, la energía interna y la presión de gas.

La temperatura es calculada considerando: la resolución de las ecuaciones de conservación de masa y energía; el intercambio de masa entre el gas interno, el gas externo (por aberturas) y el fuego (tasa de pirólisis); y el intercambio de energía entre el fuego, el gas interno, los muros y las aberturas.

2.4.4.2. Modelos de dos zonas

Un modelo de dos zonas corresponde a aquel en que se asume que hay acumulación de productos de la combustión en una capa debajo del techo del compartimento, con una interfaz horizontal. En este modelo son definidas diferentes zonas: la capa superior, la capa inferior, el fuego y su columna, el gas externo y los muros.

En la capa superior se asume uniforme la temperatura (y demás características) del gas. Los intercambios de masa, energía y sustancias químicas son calculados entre las diferentes zonas.

En un compartimento de incendio dado, con una carga combustible uniformemente distribuida, un modelo de dos zonas podría convertirse en un modelo de una zona, si la temperatura del gas de la capa superior supera los 500 °C, o si la capa superior crece de manera de cubrir un 80% de la altura del compartimento.

2.4.4.3. Modelos de dinámica de fluidos computacional [12]

Un modelo de dinámica de fluidos computacional (CFD) puede ser usado para resolver numéricamente las ecuaciones diferenciales parciales que entregan las variables termodinámicas y aerodinámicas en cada punto del compartimento.

Estos modelos analizan sistemas que involucran el flujo de fluidos, transferencia de calor y los fenómenos asociados, mediante la resolución de las ecuaciones fundamentales del fluido. Dichas ecuaciones representan las leyes físicas de conservación.

2.5. Combustión de sólidos [17]

La combustión de materiales sólidos involucra procesos tanto físicos como químicos. Para poder quemarse, los materiales deben vaporizarse formando una mezcla combustible en su superficie. En la mayoría de sólidos esto ocurre mediante un proceso denominado pirólisis. Dependiendo de la naturaleza del material, dicho proceso puede ser precedido por el derretimiento del mismo, o puede dejar residuos sólidos (cenizas).

2.5.1. Pirólisis

La pirólisis consiste en la descomposición química de moléculas complejas de un material, debido a la aplicación de calor. Como resultado, los combustibles liberan vapores inflamables que son capaces de encenderse, si se encuentran en la concentración adecuada. El proceso de pirólisis es fundamental en la combustión de sólidos, pues la tasa a la cual ocurre gobierna el tiempo de ignición y la tasa de liberación de calor de las llamas generadas. El concepto de calor efectivo de vaporización, representa la cantidad de calor que debe ser absorbida por un material sólido para que se vaporice una unidad de masa del mismo.

2.5.2. Ignición

Para que se produzca la ignición de la mezcla de aire con vapores combustibles (dado que la concentración de estos se encuentra en el rango inflamable), es necesario elevar su temperatura hasta el punto de ignición, para lo cual se necesita una fuente de calor externa. Si una vez encendido el material se produce la suficiente retroalimentación de calor, la combustión se sustentará sin la necesidad de dicha fuente.

La concentración de combustible en la mezcla con aire determina la ignición de los materiales sólidos, de acuerdo con los siguientes conceptos:

- Rango inflamable: rango de concentraciones de una sustancia combustible establecido por los límites inflamables superior e inferior. En este rango ocurrirá la combustión. El rango inflamable se amplía en función de la temperatura.
- Límite inflamable inferior: es la mínima concentración de un gas o vapor en una mezcla con oxígeno, bajo la cual la ignición no ocurrirá.
- Límite inflamable superior: es la máxima concentración de un gas o vapor en una mezcla con oxígeno, sobre la cual la ignición no ocurrirá.

La ignición pilotada ocurrirá si es que hay presente una fuente de ignición donde existe una concentración inflamable de vapores combustibles. La combustión sostenida en la superficie del sólido ocurrirá solamente si los vapores continúan siendo liberados a una tasa lo suficientemente alta para mantener la combustión luego de la ignición. La ignición también puede ocurrir en ausencia de una fuente de ignición si los vapores están lo suficientemente calientes para encenderse de manera espontánea, en lo que se conoce como ignición no pilotada.

Los materiales sólidos pueden ser clasificados de diversas maneras. Algunas de las más importantes con respecto a su comportamiento al fuego son las siguientes: según la formación de material carbonizado en su superficie; y según su espesor.

En los materiales que forman una capa carbonizada en su superficie, esta actúa reduciendo la tasa de transferencia de calor al interior del material donde ocurre la pirólisis, consecuentemente reduciendo con el tiempo la tasa de pirólisis y combustión. En materiales que no forman dicha capa, la temperatura superficial será cercana o igual a la de pirólisis, y el flujo neto de calor a la zona de pirólisis será igual al flujo neto de calor a la superficie del material.

Según su espesor, los materiales pueden ser clasificados como térmicamente gruesos o térmicamente finos. En estos últimos, el espesor es lo suficientemente reducido como para que los gradientes de temperatura a través de este sean despreciables, por lo que su temperatura se considera uniforme en aquella dirección. Por el contrario, un material térmicamente grueso es tratado como sólido semi-infinito para el análisis de transferencia de calor. Para discriminar en la clasificación, es utilizado el número de Biot, que evalúa la razón entre la superficie y la resistencia interna al flujo de calor.

2.5.3. Flujo de calor crítico y temperatura de ignición efectiva

El flujo de calor crítico (CHF, por sus siglas en inglés) de un material sólido corresponde al mínimo flujo de calor externo que provocará que se liberen suficientes vapores en la superficie del material para permitir su ignición. Este parámetro puede ser evaluado para condiciones de ignición tanto pilotadas como no pilotadas, tendiendo a ser de menor magnitud en el primer caso. Generalmente se asume que es probable la existencia de alguna fuente de ignición cuando un material está sujeto a flujos de calor de incendio, por lo cual es conservador usar el flujo de calor crítico pilotado para analizar el peligro de incendio.

Para que ocurra la ignición con producción de llamas de un sólido, se requiere la liberación de suficientes vapores combustibles en su superficie para formar, junto al aire, una mezcla inflamable; además debe haber presente una fuente de ignición. El concepto de temperatura de ignición efectiva es utilizado para evaluar las condiciones térmicas en que dicha mezcla inflamable se formará. Los valores de temperatura de ignición efectiva derivan de los datos de

flujo de calor crítico, por medio de un balance de energía cuasi-estático en la superficie del material.

2.5.4. Tiempo de ignición

La resistencia a la ignición de un material polimérico se expresa en términos del tiempo que demora este en encenderse cuando se expone al calor. El tiempo de ignición depende de la magnitud del calor al que se expone y del espesor del material relativo a la profundidad de penetración térmica.

Para un material térmicamente fino, el tiempo de ignición satisface la Ecuación 2.26. Además, la Ecuación 2.27 define el parámetro de respuesta térmica (TRP, por sus siglas en inglés), que representa la resistencia a la ignición de los materiales.

$$\frac{1}{t_{\text{ign}}} = \frac{q_e'' - q_p''}{\Delta T_{\text{ign}} \cdot d \rho c} \quad 2.26$$

$$\text{TRP} = \Delta T_{\text{ign}} \cdot d \rho c \quad 2.27$$

Donde,

t_{ign} [s]: tiempo de ignición.

q_e'' [kW/m²]: flujo de calor externo por unidad de superficie del material.

q_p'' [kW/m²]: pérdida de calor por unidad de superficie del material.

ΔT_{ign} [°C]: diferencia entre la temperatura de ignición y la temperatura ambiente.

d [mm]: espesor del material.

ρ [g/cm³]: densidad del material.

Cuando las pérdidas de calor por convección y conducción son despreciables (en condiciones sin flujo de aire), la pérdida de calor q_p'' es aproximadamente igual al flujo de calor crítico (CHF), bajo el cual no ocurre la ignición. El CHF también es un parámetro representativo de la resistencia a la ignición de un material, y se relaciona con la temperatura de ignición T_{ign} [°C] según la Ecuación 2.28 (en condiciones sin flujo de aire, asumiendo que las pérdidas son debidas principalmente a rerradiación).

$$T_{\text{ign}} = (\text{CHF}^{0,25} \cdot 364) - 273 \quad 2.28$$

2.5.5. Tasa de combustión

Una vez que la superficie del material sólido ha alcanzado su temperatura de ignición, la superficie comenzará a pirolizarse y quemarse, a una tasa (masa por unidad de tiempo) directamente proporcional al flujo neto de calor en el frente de pirólisis, e inversamente proporcional al calor de vaporización del material.

Para los materiales que no forman una capa carbonizada, el frente de pirolisis se mantiene en la superficie del elemento, la cual va retrocediendo a medida que el material se piroliza. Para los

materiales que forman una capa carbonizada en su superficie, el frente de pirólisis penetrará al interior del material; el flujo neto de calor en el frente de pirólisis será la diferencia entre la tasa de conducción de calor a través de la capa carbonizada hasta el frente de pirólisis y la tasa de conducción de calor a través del material virgen desde el frente de pirólisis. Por lo tanto, el flujo de calor será mayor en aquellos materiales que no forman dicha capa.

Finalmente, la tasa de liberación de calor es directamente proporcional a la tasa de pirólisis del elemento y al calor de combustión del material. Entonces, es a su vez directamente proporcional al flujo neto de calor en el frente de pirólisis y a la razón de combustibilidad, que se define para estos propósitos como la razón entre el calor de combustión y el calor de vaporización.

2.5.6. Propagación de llama

La propagación de llama en la superficie de un sólido puede ser considerada como una secuencia de igniciones, en que la tasa de propagación es gobernada por la rapidez con que nuevos elementos de la superficie del combustible son elevados a la temperatura de ignición, por el flujo de calor impuesto por la llama que avanza y por cualquier fuente externa. La propagación de llama no ocurrirá si un elemento en combustión no se quema por el tiempo suficiente para causar la ignición de un elemento adyacente. En ese caso, ocurrirá la combustión total (y consecuente apagado) localizada del elemento en cuestión. Entonces, se podría considerar el potencial de propagación de llama como una carrera entre la ignición de nuevos elementos combustibles y la combustión total de los elementos que ya se han encendido y están quemándose. La tasa de propagación de llama puede ser expresada como la tasa a la cual avanza el frente de pirólisis a lo largo de la superficie del material.

Existe un flujo de calor crítico para que ocurra la propagación de llama en materiales en que la combustión total es significativa. Este flujo de calor crítico se espera que aumente con la inercia térmica del material y disminuya con el incremento de masa combustible por unidad de área. Por ejemplo, si se añaden capas adicionales de pintura a una superficie, el flujo de calor crítico para la propagación de llama disminuirá y, así, el potencial de propagación de llama se incrementará. La mayor implicancia de esto es que ciertos materiales de bajo espesor podrían exhibir un comportamiento deseable en ensayos de fuego, al quemarse por completo y apagarse, pero exhibir un comportamiento indeseado en el campo (de aplicación), debido a diferencias entre los flujos de calor impuestos en el ensayo y las condiciones del campo.

En los métodos de ensayo estandarizados para evaluar la propagación de llama, se hacen especificaciones para las observaciones visuales del movimiento de la llama y restos carbonizados, y medidas de la temperatura superficial y tasas de liberación de vapores, calor y compuestos químicos, incluyendo humo.

2.5.7. Efectos de retardantes de combustión

Los retardantes de combustión son a veces agregados a los materiales sólidos para cambiar sus características de inflamabilidad. Estos pueden ser simplemente materiales inorgánicos inertes, así como materiales hidratados o materiales químicamente reactivos, tales como compuestos halogenados.

Los materiales de relleno inorgánicos inertes sirven para reemplazar materiales orgánicos en un material compuesto sólido. Estos materiales inorgánicos absorben calor en conjunto con los orgánicos, contribuyendo así al calor efectivo de vaporización del material compuesto, pero no contribuyen al calor efectivo de combustión. El efecto neto es una disminución de la razón de combustibilidad (razón entre el calor de combustión y el calor de vaporización) del material y la consecuente disminución en la tasa de pirólisis. Algunos rellenos inorgánicos también promueven la formación de una capa carbonizada, reduciendo más aún la tasa de pirólisis.

Los materiales de relleno hidratados, como el trihidrato de aluminio, también contribuyen al calor efectivo de vaporización sin contribuir al calor efectivo de combustión. Estos materiales son particularmente efectivos para absorber calor debido al alto calor de vaporización del agua de hidratación. Además, cuando esta agua es vaporizada en conjunto con las partículas pirolizadas del material compuesto, las moléculas de vapor de agua diluyen la concentración de los vapores combustibles en la superficie del material, disminuyendo así la inflamabilidad de dichos vapores.

El funcionamiento de retardantes de fuego que actúan mediante reacciones químicas es más complejo que aquel de los rellenos inorgánicos simples o hidratados. Algunos actúan en la fase sólida, promoviendo la formación de una capa carbonizada, mientras otros actúan en la fase gaseosa, inhibiendo la combustión de los vapores combustibles liberados por el sólido.

2.5.8. Producción de humo [17-19]

El humo puede ser definido como las partículas sólidas y líquidas en el aire, y los gases despedidos cuando un material experimenta pirólisis o combustión, junto con la cantidad de aire que se arrastra o se mezcla en la masa de productos de la combustión. En base a esta definición, el humo no corresponde tan solo al producto real de la combustión, sino que incluye también el volumen de aire contaminado por los productos de la combustión. Es decir, si se mezcla más aire con el humo, el volumen de este se incrementa y las concentraciones de productos de la combustión disminuyen. La producción de humo representa un aspecto significativo de los riesgos de incendio de materiales. Esto es debido, entre otros factores, a la disminución de visibilidad, la toxicidad de los productos de la combustión, y el daño no térmico a las estructuras, equipamiento y posibles mercancías almacenadas.

2.5.8.1. Visibilidad

El humo tiende a oscurecer la visión a concentraciones mucho más bajas que aquellas requeridas para causar efectos tóxicos o incapacitantes. Para los ocupantes de la edificación, el oscurecimiento causado por el humo es significativo principalmente en términos de visibilidad y orientación. Las personas inmersas en una nube de humo pueden desorientarse y ser incapaces de ver carteles de salida u otras señales visuales para facilitar la evacuación de la edificación. La rapidez de evacuación tiende a disminuir a mayores concentraciones de humo, causando que los ocupantes estén inmersos en una nube de humo por periodos más prolongados. Para los bomberos, el oscurecimiento puede dificultar el hallazgo del origen del incendio, además de causar desorientación.

2.5.8.2. Toxicidad

Los productos de la combustión liberados en un incendio pueden causar daños o la muerte, si las personas se exponen a concentraciones lo suficientemente altas por periodos lo suficientemente prolongados. El concepto de dosis corresponde al producto de la concentración por el tiempo de exposición. En general hay una relación inversa entre la concentración y el tiempo de exposición requeridos para causar incapacidad o la muerte. La dosis necesaria para causar dichos efectos depende de la toxicidad de cada componente de una nube de humo, del potencial efecto sinérgico entre componentes, y de la sensibilidad de la persona expuesta. Entre los diversos compuestos tóxicos que se pueden producir en incendios de edificaciones, el monóxido de carbono es el principal, debido a su rol dominante en muertes relacionadas a estos siniestros.

El monóxido de carbono es un producto de la combustión incompleta de combustibles carbonosos. Se libera en cantidades abundantes en algunos incendios de edificaciones, debido principalmente a un desbalance entre la producción de vapores combustibles y la disponibilidad de oxígeno para la combustión completa del material. Este gas es asfixiante para las personas, provocando la anoxemia, que es el estado en el cual el suministro de oxígeno a los tejidos del cuerpo es insuficiente, produciendo una depresión del sistema nervioso central, la pérdida del conocimiento y, finalmente, la muerte.

Otros gases tóxicos asfixiantes son el ácido cianhídrico y el dióxido de carbono. Además, el propio agotamiento de oxígeno produce el mismo efecto. También se pueden encontrar en el humo productos irritantes, como los ácidos halogenados, los óxidos de nitrógeno y los irritantes orgánicos como la acroleína.

La baja ventilación de incendios flameantes en espacios cerrados está normalmente asociada al flashover. Como se vio anteriormente, en esta fase transitoria el incendio escala de uno o algunos objetos ardiendo en la habitación a la participación de todas las superficies combustibles expuestas. Como consecuencia de este salto en la tasa de combustión, los incendios típicamente pasan de ser sobreventilados a subventilados, aumentando en órdenes de magnitud la producción de monóxido de carbono. Es por esto que la prevención del flashover es uno de los objetivos principales de una estrategia de protección contra incendios efectiva.

2.5.8.3. Daño no térmico

El daño no térmico, en vez de estar causado por exposición directa al calor liberado por un incendio, está causado por la contaminación que conlleva la producción de humo. Este daño incluye los efectos de descoloración, olor, corrosión, cambios en la conductividad eléctrica, y otros efectos causados por la deposición de humo sobre superficies sólidas. En edificaciones industriales, muchas veces las pérdidas económicas asociadas al daño no térmico son mayores que aquellas asociadas al daño térmico directo. Esto es cierto, por ejemplo, en instalaciones que albergan equipamiento eléctrico sensible, o donde se almacenan productos sensibles.

2.6. Seguridad contra incendios

La seguridad contra incendios de una edificación permite alcanzar un nivel de riesgo aceptable. En Chile, de acuerdo con la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC) [20], toda edificación debe cumplir ciertas condiciones mínimas de seguridad:

- Facilitar el salvamento de los ocupantes de los edificios en caso de incendio.
- Reducir al mínimo, en cada edificio, el riesgo de incendio.
- Evitar la propagación del fuego, tanto al resto del edificio, como desde un edificio a otro.
- Facilitar la extinción de los incendios.
- Minimizar las pérdidas económicas producto de un incendio.

Para lograr cumplir con las condiciones mínimas de seguridad, en la mayor parte de los casos son necesarias medidas redundantes de protección contra incendios. Ellas se pueden agrupar generalmente en dos tipos [20]:

- Protección pasiva: es aquella que se basa en los elementos de construcción, que por sus condiciones físicas aíslan la estructura de un edificio de los efectos del fuego durante un determinado tiempo. De esta forma, retardan la acción del incendio, permitiendo la evacuación de sus ocupantes antes del eventual colapso de la estructura, y dando tiempo para la llegada y acción de bomberos. Los elementos de construcción y/o sus revestimientos pueden ser de materiales no combustibles, con capacidad propia de aislación o por efecto intumescente o sublimante frente a la acción del fuego.
- Protección activa: es aquella compuesta por sistemas que, conectados a sensores o dispositivos de detección, entran automáticamente en funcionamiento frente a determinados rangos de partículas y/o temperatura del aire, descargando agentes extintores de fuego tales como agua, gases, espumas o polvos químicos.

Por lo general, la estrategia para proteger un edificio consiste, en primera instancia, en evitar que se produzca un incendio, controlando la carga combustible, presencia de sustancias peligrosas, seguridad de los procedimientos, uso de extintores, entre otros; dada la ocurrencia de un incendio, la estrategia consiste en asegurar la evacuación de las personas, controlando el ancho de pasillos, número de salidas, distancias de recorrido, sistemas de alarma y detección de incendios, manejo de humos, iluminación de emergencia, entre otros; evitar la propagación del fuego, mediante compartimentación y selección de materiales; evitar el colapso del edificio; facilitar la labor de bomberos y la lucha contra el fuego (asegurando el funcionamiento de red seca, red húmeda, resistencia estructural contra incendios).

2.6.1. Evacuación de personas

Dada la ocurrencia de un incendio, la evacuación es uno de los procedimientos más importantes para salvaguardar la vida de los usuarios. Las salidas de emergencia deben tener suficiente capacidad y estar dispuestas de manera tal que la evacuación sea lo más rápida posible.

En algunos casos, es necesario realizar prácticas de evacuación, para que los ocupantes de la edificación estén preparados para realizar este procedimiento con rapidez. De acuerdo con el Manual de la NFPA 101 [21], los tiempos de estas prácticas se traducen a la capacidad de evacuación de la siguiente manera:

- Hasta tres minutos: adecuadamente rápido.
- Más de 3 minutos, pero menos de 13 minutos: lento.
- Más de 13 minutos: inapropiado.

2.6.2. Compartimentación

La seguridad contra incendios de un edificio se ve afectada por su diseño arquitectónico, su construcción y los materiales que la conforman, además del uso de la edificación. Todo ello tiene incidencia en el desarrollo del incendio.

La compartimentación es un aspecto importante de la protección contra incendios, y uno de los métodos más utilizados. Mantener el fuego confinado en su lugar de inicio y minimizar el movimiento del humo a otras áreas de un edificio han sido por mucho tiempo los objetivos principales de la ingeniería de protección contra incendios.

En un edificio típico (por ejemplo, de viviendas), se genera el efecto de compartimento debido a la distribución y materialidad de sus elementos. En el caso de edificaciones con cubierta de membrana, el efecto de compartimento toma poca relevancia. Esto, debido a que existe un único ambiente, que puede ser de grandes proporciones y, además, la membrana sería rápidamente destruida en caso de incendio, resultando en un recinto no confinado.

2.7. Normativa

2.7.1. Chile

La normativa chilena de seguridad contra incendios se encuentra establecida en diferentes leyes, reglamentos y normas. En lo que respecta al comportamiento al fuego de las estructuras, adquiere relevancia la OGUC, así como algunas Normas Chilenas Oficiales mencionadas en ella. En ningún documento de la reglamentación nacional se hace referencia de manera específica a edificaciones livianas con cubierta de membrana, por lo que estas deben cumplir los mismos requisitos que los demás tipos de construcciones.

La OGUC [20] es un documento emitido por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo, que reglamenta la Ley General de Urbanismo y Construcciones, y regula el procedimiento administrativo, el proceso de planificación urbana, el proceso de urbanización, el proceso de construcción, y los estándares técnicos de diseño y de construcción exigibles en los dos últimos.

2.7.1.1. Seguridad contra incendio

En el Capítulo 3 del Título 4 de la OGUC, se establecen las normas con las que las edificaciones en Chile deben cumplir para satisfacer las condiciones mínimas de seguridad contra incendios. Del conjunto de normas existentes de prevención y protección contra incendios, para el tema tratado son relevantes las siguientes:

- NCh 935/1 Ensaye de resistencia al fuego – Parte 1: Elementos de construcción en general.

- NCh 1914/1 Ensaye de reacción al fuego – Parte 1: Determinación de la no combustibilidad de materiales de construcción.
- NCh 1979 Determinación del comportamiento de telas a la acción de una llama.

Los edificios que requieren protección contra el fuego deben proyectarse según uno de cuatro tipos (a, b, c, d), los cuales se relacionan al tiempo que deben resistir sus elementos al ser expuestos a la curva estándar establecida en la norma NCh 935/1. Para determinar el tipo de protección que requerirán, las edificaciones se clasifican considerando, además del destino y número de pisos, la carga de ocupación, la superficie edificada o la densidad de carga combustible, según corresponda.

2.7.2. Unión Europea

Los Eurocódigos son un conjunto de normas de carácter voluntario, que proporcionan criterios y métodos unificados para la ingeniería estructural dentro de la Unión Europea. Ellas son desarrolladas por el Comité Europeo de Normalización (CEN).

Los organismos de cada país que integra el CEN deben publicar la Norma Nacional, que consta del texto del Eurocódigo y el Anexo Nacional, en caso de existir. En el Anexo Nacional se publican los Parámetros de Determinación Nacional, que son valores, clases o métodos alternativos que permiten cumplir con el nivel de seguridad exigido en cada país.

La norma EN 13782 es la reglamentación comunitaria específica que concierne a las estructuras temporales, las carpas y su seguridad. Es orientativa y no de obligado cumplimiento, como un intento de homogeneizar la normativa específica sobre estructuras temporales.

Los Eurocódigos, en sus versiones del 0 al 9, cubren lo referido a bases de diseño estructural, acciones sobre las estructuras, diseño de estructuras de diferentes materiales, diseño geotécnico y diseño sísmico de estructuras. A continuación, se indican aquellos documentos que toman relevancia para el tema de estudio, particularmente la parte 1-2 de cada uno de ellos, que aborda el diseño de estructuras sometidas al fuego.

- Eurocódigo 1: Acciones en estructuras (EN 1991).
- Eurocódigo 3: Diseño de Estructuras de Acero (EN 1993).
- Eurocódigo 5: Diseño de Estructuras de Madera (EN 1995).
- Eurocódigo 9: Diseño de Estructuras de Aluminio (EN 1999).

En lo relativo a la reacción al fuego de los materiales o productos de construcción, la norma EN 13501-1 es la responsable de unificar los criterios de clasificación para la Unión Europea (Euroclases de reacción al fuego).

Por otro lado, en lo que se refiere a la resistencia al fuego de las estructuras, la norma EN 1363 indica los métodos de ensayo y la norma EN 13501-2 unifica los criterios de clasificación (Euroclases de resistencia al fuego).

2.7.3. España

En España la construcción está regulada por la Ley de Ordenación de la Edificación (LOE), que establece los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad que deben cumplir los edificios y sus instalaciones.

A pesar de que los Eurocódigos existen en su versión española (UNE-EN), estos son voluntarios y es el Código Técnico de la Edificación (CTE) el marco normativo por el cual se regula la LOE. Dentro del CTE, el Documento Básico de Seguridad en Caso de Incendio (DB-SI) [22] especifica parámetros objetivos y procedimientos cuyo cumplimiento asegura la satisfacción de las exigencias básicas y la superación de los niveles mínimos de calidad propios del requisito básico de seguridad en caso de incendio. Se exceptúa el caso de los edificios, establecimientos y zonas de uso industrial a los que les sea de aplicación el Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales (RSCIEI).

Por otro lado, y debido a que el CTE no es directamente aplicable a este tipo de edificaciones especiales, la ASPEC, Asociación Nacional de Profesionales Empresarios de Carpas y Estructuras Móviles, elaboró el “Protocolo CEM” (Carpas y Estructuras Móviles), que complementaría las disposiciones del CTE para edificaciones especiales. El documento se encuentra basado en el reglamento francés “Seguridad contra pánico e incendios en estructuras especiales de pública concurrencia”, el cual, a su vez, ha sido elaborado conforme a la norma europea EN 13782. Además, se pretende crear el Reglamento de Disposiciones Aplicables a los Establecimientos Especiales (Carpas y Estructuras Móviles), con el fin de proporcionar una normativa que regularice la fabricación, el control de calidad y el montaje de dichas instalaciones.

Finalmente, el RSCIEI [23], emitido por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España, tiene el objetivo de alcanzar un grado suficiente de seguridad en caso de incendio en los establecimientos e instalaciones de uso industrial. El ámbito de aplicación de este documento son los establecimientos industriales, entendiéndose como tales:

- Las industrias.
- Los almacenamientos industriales.
- Los talleres de reparación y los estacionamientos de vehículos destinados al servicio de transporte de personas y transporte de mercancías.
- Los servicios auxiliares o complementarios de las actividades anteriores.

En los documentos mencionados se hace referencia a diversas normas, algunas de ellas españolas, redactadas la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), y otras, europeas, redactadas por el CEN.

2.7.4. Reino Unido

Las regulaciones de construcción que aplican en el Inglaterra y Gales están establecidas por ley en el Building Act 1984, mientras que aquellas que aplican en Escocia están establecidas en el Building (Scotland) Act 2003. Para efectos de este trabajo, se considerará aquello relativo al Building Act 1984 (Inglaterra y Gales). Las regulaciones establecidas bajo dicha ley se encuentran consolidadas The Building Regulations 2010. Además, los *Approved Documents*

proporcionan una guía práctica para cumplir con los requerimientos establecidos. En particular, el Approved Document B se refiere a los requerimientos de seguridad contra incendios.

En The Building Regulations, la seguridad contra incendios es abordada en el Approved Document B. En cuanto a ensayos, se hace referencia principalmente a la norma británica BS 476, donde se recopilan todos los ensayos de fuego en materiales de construcción y estructuras.

Sin embargo, hay edificaciones exentas de cumplir con el Approved Document B (entre otros) de The Building Regulations, que son las Clases 1 a 7, como se indica en el Schedule 2:

- Clase 1: edificios controlados por otra legislación.
- Clase 2: edificios no frecuentados por personas.
- Clase 3: invernaderos y edificios de agricultura.
- Clase 4: edificaciones temporales.
- Clase 5: Edificios auxiliares.
- Clase 6: edificios separados pequeños.
- Clase 7: extensiones de otras edificaciones.

Por otro lado, los Eurocódigos tienen también una versión en el Reino Unido, donde son utilizados de forma opcional como un medio para cumplir con lo establecido en la reglamentación nacional.

2.7.5. Estados Unidos

En la mayor parte de los Estados Unidos, la construcción está regulada por los códigos del International Code Council (ICC). Estos son el International Building Code (IBC) [24] y el International Fire Code (IFC) [25], en lo que se refiere a protección contra incendios. En ellos, además, se hace referencia a estándares ISO, ASTM, y de la NFPA (National Fire Protection Association). En algunas secciones de ellos se abordan de manera específica las estructuras con cubierta de membrana.

El IBC establece los requerimientos mínimos para salvaguardar la vida y el bienestar público, además de la seguridad de la propiedad, ante incendios u otros peligros del entorno construido. Ha sido adoptado en la mayoría de las jurisdicciones de los Estados Unidos, como también en los países de la Comunidad del Caribe y Arabia Saudita, entre otros.

El IFC establece los requerimientos mínimos para proveer un nivel razonable de seguridad vital y protección a la propiedad ante el peligro de incendio, explosión u otras condiciones peligrosas en edificaciones nuevas o existentes. Este código ha sido adoptado en gran parte de las jurisdicciones de los Estados Unidos: 42 estados, el Distrito de Columbia, la Ciudad de Nueva York, Guam y Puerto Rico.

Además, por parte de la NFPA, se encuentra el Life Safety Code (NFPA 101), que es un código ampliamente adoptado en los Estados Unidos, ya sea de manera parcial o total. Esta aborda aquellas características de construcción, protección y ocupación necesarias para minimizar el peligro a la vida por los efectos del fuego, incluido el humo, el calor y los gases tóxicos generados durante un incendio [2]. La norma NFPA 102, que será consultada en este trabajo, provee todos los requerimientos reglamentarios extraídos de las normas NFPA 101 y NFPA 5000, para la seguridad humana relacionada a fuego y otros peligros en carpas y estructuras de membrana.

2.7.6. FM Global

Además de la reglamentación mencionada, se revisarán los estándares de FM Global (Factory Mutual), que es una compañía aseguradora con presencia a nivel mundial y que se especializa en servicios de ingeniería de prevención de pérdidas.

La empresa tiene disponible para el público los documentos denominados FM Global Data Sheets, estándares que permiten reducir el riesgo de pérdidas debido a diferentes factores, entre ellos, incendios. Estas normas incorporan cerca de 200 años de experiencia en pérdida de bienes, resultados de continua investigación e ingeniería, así como aportes de comités de estándares, fabricantes de equipos y otros.

En particular, se revisan los Data Sheets 1-21 y 1-59, de resistencia al fuego de elementos de edificaciones, y de estructuras con cubierta de tela o membrana, respectivamente.

3. ESTRUCTURA

El desempeño de la estructura es un factor relevante en el comportamiento ante el fuego de las edificaciones con cubierta de membrana. Las altas temperaturas que se alcanzan en un incendio tienen un efecto importante en las propiedades mecánicas de los elementos estructurales.

En la práctica, son muchos los factores que pueden influenciar el riesgo de daño a la estructura. Algunos ejemplos son los siguientes [26]:

- Tipo de construcción y ocupación.
- La resistencia al fuego de los elementos estructurales.
- La combustibilidad de los materiales de construcción.
- Espacios grandes ininterrumpidos.
- Carga de fuego de la edificación.
- Conductos abiertos, horizontales o verticales.
- Malas prácticas de mantenimiento y almacenamiento.
- Procesos inseguros.
- Indisponibilidad de puertas cortafuego u otros tipos de barreras contra el fuego.
- Medidas inadecuadas de lucha o protección contra el fuego.
- Servicios inseguros en el edificio.
- Elementos humanos desfavorables.

3.1. Resistencia al fuego

La resistencia al fuego se refiere a la capacidad de un producto o elemento de prevenir la propagación del fuego, y de continuar soportando cargas durante el desarrollo de un incendio. Los requerimientos de resistencia al fuego de estructuras tienen el fin de permitir la evacuación y facilitar la labor de lucha contra el fuego.

Convencionalmente, la resistencia al fuego se determina mediante el ensayo hasta la falla de probetas a escala real sometidas a un incendio estándar, definido por una curva de temperatura-tiempo. Estos ensayos son generalmente aplicados a barreras contra incendios y elementos soportantes.

3.1.1. Chile

3.1.1.1. Ensayo de resistencia al fuego

En Chile, para determinar la clasificación de resistencia al fuego de elementos estructurales, se recurre a la norma NCh 935/1 [14]. La resistencia al fuego se define en ella como “la cualidad de un elemento de construcción de soportar las condiciones de un incendio estándar, sin deterioro importante de su capacidad funcional”.

El ensayo consiste en el calentamiento de probetas a escala real dentro de un horno, cuya elevación de temperatura en el tiempo concuerda con la curva estándar ISO 834. Las probetas se ensayan bajo condiciones similares a las que deberán ser sometidas en servicio. La exposición al calor depende del tipo de elemento: las columnas se calientan en toda su superficie; las vigas, por tres de sus caras; los elementos de separación, solo por una cara. La medición de temperaturas se efectúa por medio termocuplas regularmente distribuidas en el elemento. El calentamiento del elemento se realiza hasta que se observa el fallo de alguno de los criterios exigidos, como se indica en la Tabla 3.1. Dichos criterios se establecen de según la función del elemento, detallándose a continuación:

- Capacidad de soporte de carga

Para elementos estructurales, se establece que el elemento falla cuando no puede seguir cumpliendo la función de soporte de carga para la cual fue diseñado.

- Aislamiento

Para elementos de separación, horizontales o verticales, se requerirá:

- a) que la temperatura media de la cara no expuesta del elemento no aumente sobre la temperatura inicial en más de 140 °C;
- b) que la temperatura máxima en cualquier punto de la cara no expuesta no exceda a la temperatura inicial en más de 180 °C o no sobrepase 220 °C cualquiera sea la temperatura inicial.

Para vigas y columnas de acero protegidas, se requerirá:

- a) que la temperatura media del acero, en cualquiera de las termocuplas dispuestas, no exceda los 500 °C.
- b) que la temperatura máxima en cualquier punto no exceda de 650 °C.

Para elementos de separación perimetrales, verticales u horizontales, que no comprometan eventuales cargas combustibles por el lado exterior, sus temperaturas exteriores pueden ser cualesquiera. La resistencia al fuego se determina por la falla del elemento sin tomar en cuenta la temperatura de la superficie de la cara no expuesta.

- Estanquidad (integridad)

Para elementos de separación, verticales u horizontales, no deberá ocurrir la formación de grietas, fisuras u otras aberturas por donde las llamas o gases puedan pasar.

Se considerará que hay pérdida de estanquidad, cuando se observe, en la cara no expuesta del elemento ensayado, una llama sostenida durante al menos 10 s, o bien cuando se encienda una mota de algodón mantenida a una distancia de 20 a 30 mm de la cara no expuesta.

- No emisión de gases inflamables

Los gases emitidos por la cara no expuesta del elemento se considerarán inflamables si, al aproximar una llama cualquiera, arden y continúan espontáneamente ardiendo durante al menos 20 s luego de retirada la llama.

Tabla 3.1. Requisitos de resistencia al fuego que deben cumplir los elementos de construcción, al ser ensayados de acuerdo con la norma chilena NCh 935/1.

Tipo de elemento	Capacidad de carga	Estanquidad (integridad)	Aislamiento	No emisión de gases inflamables
Estructural	✓			✓
De separación		✓	✓	✓
Estructural de separación	✓	✓	✓	✓
Vigas o columnas metálicas protegidas			✓	✓

Luego, los elementos estructurales de una edificación con cubierta de membrana, los cuales tienen solamente función portante, deben cumplir con los criterios de capacidad de carga y no emisión de gases inflamables.

El resultado del ensayo se expresa como el tiempo, en minutos, desde el inicio del ensayo, hasta que dejan de cumplirse las condiciones mencionadas. De esta manera, según su resistencia al fuego, los elementos de construcción se clasifican como se indica en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Clasificación de resistencia al fuego de los elementos de construcción, de acuerdo con la norma NCh 935/1.

Clasificación	Duración de la resistencia al fuego, t_f
F-0	$0 \leq t_f < 15$
F-15	$15 \leq t_f < 30$
F-30	$30 \leq t_f < 60$
F-60	$60 \leq t_f < 90$
F-90	$90 \leq t_f < 120$
F-120	$120 \leq t_f < 150$
F-150	$150 \leq t_f < 180$
F-180	$180 \leq t_f < 240$
F-240	$240 \leq t_f$

3.1.1.2. Requerimientos

Los edificios que requieren protección contra el fuego deben proyectarse según alguno de los tipos señalados en la Tabla 3.3. Sus elementos de construcción deben cumplir con la resistencia al fuego que en ella se indica, al ser expuestos a la curva estándar como se establece en la norma NCh 935/1. Para determinar el tipo de protección con que deberán cumplir las estructuras, ellas se clasifican considerando, además del destino y número de pisos, la superficie edificada (Tabla

3.4), la tasa de ocupación (Tabla 3.5), o la densidad de carga combustible (Tabla 3.6), según corresponda. En el caso de estructuras con sectores con distintos destinos, sin separación en planta para ellos, se debe satisfacer siempre el estándar más exigente.

Tabla 3.3. Resistencia al fuego requerida para los elementos de construcción de edificios (OGUC).

Elementos de Construcción		Tipo			
		a	b	c	d
(1)	Muros cortafuego	F-180	F-150	F-120	F-120
(2)	Muros zona vertical de seguridad y caja de escalera	F-120	F-120	F-90	F-60
(3)	Muros caja ascensores	F-120	F-90	F-60	F-60
(4)	Muros divisorios entre unidades (hasta la cubierta)	F-120	F-90	F-60	F-60
(5)	Elementos soportantes verticales	F-120	F-90	F-60	F-30
(6)	Muros no soportantes y tabiques	F-30	F-15	-	-
(7)	Escaleras	F-60	F-30	F-15	-
(8)	Elementos soportantes horizontales	F-120	F-90	F-60	F-30
(9)	Techumbre incluido cielo falso	F-60	F-60	F-30	F-15

Tabla 3.4. Clasificación de edificaciones en Chile según su superficie edificada (OGUC).

Destino del Edificio	Superficie Edificada [m ²]	Número de Pisos						
		1	2	3	4	5	6	7 o más
Habitacional	cualquiera	d	d	c	c	b	a	a
Hoteles o similares	sobre 5000	c	b	a	a	a	a	a
	sobre 1500 y hasta 5000	c	b	b	b	a	a	a
	sobre 500 y hasta 1500	c	c	b	b	a	a	a
	hasta 500	d	c	b	b	a	a	a
Oficinas	sobre 1500	c	c	b	b	b	a	a
	sobre 500 y hasta 1500	c	c	c	b	b	b	a
	hasta 500	d	c	c	b	b	b	a
Museos	sobre 1500	c	c	b	b	b	a	a
	sobre 500 y hasta 1500	c	c	c	b	b	b	a
	hasta 500	d	c	c	b	b	b	a
Salud (clínicas, hospitales y laboratorios)	sobre 1000	c	b	b	a	a	a	a
	hasta 1000	c	c	b	b	a	a	a
Salud (policlínicos)	sobre 400	c	c	b	b	b	b	a
	hasta 400	d	c	c	b	b	b	a
Restaurantes y fuentes de soda	sobre 500	b	a	a	a	a	a	a
	sobre 250 y hasta 500	c	b	b	a	a	a	a
	hasta 250	d	c	c	b	b	a	a
Locales comerciales	sobre 500	c	b	b	a	a	a	a
	sobre 200 y hasta 500	c	c	b	b	a	a	a
	hasta 200	d	c	b	b	b	a	a
Bibliotecas	sobre 1500	b	b	a	a	a	a	a
	sobre 500 y hasta 1500	b	b	b	a	a	a	a
	sobre 250 y hasta 500	c	b	b	b	a	a	a
	hasta 250	d	c	b	b	a	a	a
Centro de reparación automotor	cualquiera	d	c	c	b	b	b	a
Edificios de estacionamientos	cualquiera	d	c	c	c	b	b	a

Tabla 3.5. Clasificación de edificaciones en Chile según su tasa de ocupación (OGUC).

Destino del Edificio	Máximo de Ocupantes	Número de Pisos					
		1	2	3	4	5	6 o más
Hoteles o similares	sobre 1000	b	a	a	a	a	a
	sobre 500 y hasta 1000	b	b	a	a	a	a
	sobre 250 y hasta 500	c	c	b	b	a	a
	hasta 250	d	d	c	c	b	a
Oficinas	sobre 1000	b	a	a	a	a	a
	sobre 500 y hasta 1000	b	b	a	a	a	a
	sobre 250 y hasta 500	c	c	b	b	a	a
	hasta 250	d	c	c	b	b	a
Museos	sobre 500	b	b	a	a	a	a
	sobre 250 y hasta 500	c	c	b	b	a	a
	hasta 250	d	c	c	b	b	a

Tabla 3.6. Clasificación de edificaciones en Chile según su carga combustible (OGUC).

Destino del Edificio	Densidad de Carga Combustible (*)		Número de Pisos						
	Media [MJ/m ²]		Puntual Máxima [MJ/m ²]		1	2	3	4	5 o más
Combustibles, lubricantes, aceites minerales y naturales	sobre 8000		sobre 24000		a	a	a	a	a
	sobre 4000 y hasta 8000		sobre 16000 y hasta 24000		b	a	a	a	a
	sobre 2000 y hasta 4000		sobre 10000 y hasta 16000		c	b	a	a	a
	hasta 2000		hasta 10000		d	c	b	a	a
Establecimientos industriales	sobre 16000		sobre 32000		a	a	a	a	a
	sobre 8000 y hasta 16000		sobre 24000 y hasta 32000		b	a	a	a	a
	sobre 4000 y hasta 8000		sobre 16000 y hasta 24000		c	b	a	a	a
	sobre 2000 y hasta 4000		sobre 10000 y hasta 16000		c	c	b	a	a
	sobre 1000 y hasta 2000		sobre 6000 y hasta 10000		d	c	c	b	a
	sobre 500 y hasta 1000		sobre 3500 y hasta 6000		d	d	c	c	b
	hasta 500		hasta 3500		d	d	d	c	c
Supermercados y centros comerciales	sobre 16000		sobre 32000		b	a	a	a	a
	sobre 8000 y hasta 16000		sobre 24000 y hasta 32000		b	b	a	a	a
	sobre 4000 y hasta 8000		sobre 16000 y hasta 24000		c	b	b	a	a
	sobre 2000 y hasta 4000		sobre 10000 y hasta 16000		c	c	b	b	a
	sobre 1000 y hasta 2000		sobre 6000 y hasta 10000		d	c	c	b	b
	hasta 1000		hasta 6000		d	d	c	c	b
Establecimientos de bodegaje	sobre 16000		sobre 32000		b	b	a	a	a
	sobre 8000 y hasta 16000		sobre 24000 y hasta 32000		c	b	b	a	a
	sobre 4000 y hasta 8000		sobre 16000 y hasta 24000		c	c	b	b	a
	sobre 2000 y hasta 4000		sobre 10000 y hasta 16000		d	c	c	b	b
	sobre 1000 y hasta 2000		sobre 6000 y hasta 10000		d	d	c	c	b
	sobre 500 y hasta 1000		sobre 3500 y hasta 6000		d	d	d	c	c
	hasta 500		hasta 3500		d	d	d	d	c

1 MJ/m² = 238,85 kcal/m²

1 MJ = 0,053 kg de madera equivalente de 4000 kcal/kg

(*) Para clasificar un edificio o sector de él, se aplica la densidad de carga combustible mayor entre ambas columnas.

La OGUC [20] indica que no requieren protección contra el fuego (es decir, no deben cumplir con una clasificación de resistencia al fuego) aquellas edificaciones que satisfagan simultáneamente los siguientes requisitos:

- Edificación de un piso.
- Destino de equipamiento.
- Realizada con elementos de construcción no combustibles (según la definición de la OGUC: aquellos que no se encienden ni alimentan la combustión bajo la acción del fuego, o bien, tienen una base estructural incombustible cubierta por un revestimiento de menos de 3 mm de espesor en el cual la propagación de la llama tiene una velocidad inferior a 5 m/min).
- Carga de ocupación inferior a 100 personas.
- Carga combustible media inferior a 250 MJ/m² en todos sus recintos.
- Asegurar ocupación solo por personas adultas que puedan valerse por sí mismas.
- Separación de los deslindes por una distancia mayor o igual a 4 metros

Mientras que, en caso de requerir protección contra el fuego, la mínima resistencia con que deben contar los elementos soportantes de una edificación corresponde a F-30 (es decir, 30 minutos de exposición al incendio estándar).

3.1.2. Unión Europea

3.1.2.1. Ensayos de resistencia al fuego

La norma EN 1991-1-2 [12], correspondiente al Eurocódigo de acciones en estructuras expuestas al fuego, prescribe tanto la curva de incendio estándar (ISO 834) como las paramétricas para determinar la resistencia al fuego de los elementos estructurales. También se contemplan modelos de una o dos zonas, incendios paramétricos y métodos basados en la dinámica de fluidos.

La norma EN 13501-2 [27] (Euroclases de resistencia al fuego) se dedica a la caracterización y clasificación de los elementos constructivos en base a su resistencia al fuego. Al estar expuestos al fuego bajo las acciones definidas por la norma EN 1363-1 o bien 1363-2, los elementos deben cumplir con los criterios R, E e I según su función, como se indica en la Tabla 3.7 y se explica a continuación:

- Solo función de separación: integridad (criterio E) y, si se exige, aislamiento (criterio I).
- Solo función de soporte de carga: resistencia mecánica (criterio R).
- Funciones de separación y soporte de carga: criterios R, E y, cuando sea exigido, I.

El criterio R (resistencia) corresponde al tiempo en minutos completos durante el cual el elemento mantiene la función de soporte de carga. Se considera que la capacidad portante falla cuando se supera el límite de cuantía de deformación o bien el límite de velocidad de deformación.

El criterio E (integridad) consiste al tiempo en minutos completos durante el cual se mantiene la función separadora, sin constatar la presencia de: ignición del tampón de algodón; apertura de huecos de ciertas dimensiones; aparición de llamas sostenidas. Dichas pruebas se explican en la norma mencionada.

El criterio I (aislamiento), es el tiempo en minutos completos durante el cual la muestra mantiene su función separadora al exponer una de sus caras al fuego, sin desarrollar temperaturas elevadas en su cara no expuesta. Es decir, se debe cumplir que el incremento de la temperatura media en toda la cara no expuesta no supere los 140°C, y que el incremento de temperatura en cualquier punto de dicha cara no exceda los 180°C.

Tabla 3.7. Requisitos de resistencia al fuego que deben cumplir los elementos de construcción, al ser ensayados de acuerdo con la norma europea EN 13501-2.

Función	Resistencia mecánica (R)	Integridad (E)	Aislamiento (I)
Soporte de carga	✓		
Separación		✓	Solo si se exige
Soporte de carga y separación	✓	✓	Solo si se exige

Los elementos portantes sin funciones de separación contra el fuego (como lo son vigas, columnas o los elementos estructurales de una edificación con cubierta de membrana), deben satisfacer solamente el criterio R, de resistencia mecánica. Las clases posibles para este tipo de elementos se muestran en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8. Clasificación de resistencia al fuego de los elementos de construcción portantes sin funciones de separación, de acuerdo con la norma EN 13501-2.

Clasificación	Duración de la resistencia al fuego, t
R-15	$15 \leq t < 20$
R-20	$20 \leq t < 30$
R-30	$30 \leq t < 45$
R-45	$45 \leq t < 60$
R-60	$60 \leq t < 90$
R-90	$90 \leq t < 120$
R-120	$120 \leq t < 180$
R-180	$180 \leq t < 240$
R-240	$240 \leq t < 360$
R-360	$360 \leq t$

Cuando no sea previsible la ocurrencia de flashover, la comprobación de la resistencia al fuego puede hacerse elemento a elemento, por medio de los incendios localizados indicados en la norma EN 1991-1-2, situando sucesivamente la carga de fuego en la posición previsible más desfavorable.

Los requerimientos de resistencia al fuego se indican en las normativas aplicables a cada país de la Unión Europea.

3.1.3. España

3.1.3.1. Código Técnico de la Edificación

En primer lugar, se ha de destacar que las edificaciones temporales no deben cumplir con las disposiciones indicadas en el CTE, por lo cual este aplicaría para aquellas edificaciones con cubierta de membrana de carácter permanente.

En el DB-SI 6 del CTE, se indican los métodos para estudiar la resistencia al fuego de los elementos estructurales ante las acciones contempladas en la UNE-EN 1991-1-2, es decir, curva nominal estándar, curvas paramétricas, modelos de incendio de una o dos zonas, incendios localizados o métodos basados en dinámica de fluidos.

Se considera que la resistencia al fuego de un elemento estructural principal del edificio es suficiente si, al ser sometido a la acción representada por la curva normalizada de tiempo-temperatura, alcanza cierta clase R (minutos de resistencia al fuego) o resiste durante el tiempo equivalente. El tiempo equivalente de exposición al fuego es el tiempo de exposición a la curva normalizada que se supone tiene un efecto térmico igual al de un incendio real en el sector de incendio considerado [12].

En el caso de las estructuras sustentantes de elementos textiles de cubierta, tales como carpas, esta normativa aplica solamente cuando estas están integradas en edificios. Dichas estructuras no deben cumplir ninguna exigencia de resistencia al fuego, siempre que los elementos textiles, además de ser clase M2 conforme a UNE-EN 23727 (como se verá en el capítulo siguiente), el certificado de ensayo acredite la perforación del elemento. En caso contrario, deberán tener una clasificación R-30. Este requisito es independiente del destino de la edificación.

El Reglamento CEM de la ASPEC igualmente indica que, por tratarse de instalaciones portátiles o desmontables con cubiertas textiles, su estructura no precisará garantizar ninguna estabilidad mínima al fuego.

3.1.3.2. Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales

En lo que respecta al RSCIEI [23], la estabilidad al fuego (EF) de los elementos constructivos de cerramiento en establecimientos industriales se define por el tiempo durante el cual se mantiene la estabilidad mecánica (o capacidad portante) en el ensayo normalizado conforme a la norma UNE 23093, que actualmente se encuentra anulada por la UNE-EN 1363-1 [15], por lo que aplicaría esta última.

Las diversas configuraciones y ubicaciones que pueden tener los establecimientos industriales se consideran reducidas a:

- Establecimientos industriales ubicados en un edificio:
 - Tipo A: El establecimiento industrial ocupa parcialmente un edificio que tiene, además, otros establecimientos, ya sean éstos de uso industrial o bien de otros usos.

- Tipo B: El establecimiento industrial ocupa totalmente un edificio que está adosado a otro/s edificio/s, ya sean éstos de uso industrial o bien de otros usos.
- Tipo C: El establecimiento industrial ocupa totalmente un edificio, o varios, en su caso, que está a una distancia mayor de 3 m del edificio más próximo de otros establecimientos.
- Establecimientos industriales que desarrollan su actividad en espacios abiertos que no constituyen un edificio:
 - Tipo D: El establecimiento industrial ocupa un espacio abierto, que puede tener cubierta más del 50 por 100 de la superficie ocupada.
 - Tipo E: El establecimiento industrial ocupa un espacio abierto que puede tener cubierta hasta el 50 por 100 de la superficie ocupada.

El nivel de riesgo intrínseco, que puede ser bajo, medio o alto, se relaciona con la densidad de carga de fuego de la instalación, que se calcula considerando el grado de peligrosidad y poder calorífico de los combustibles, la masa de ellos, la superficie construida y del tipo de instalación (A, B o C).

Las exigencias de resistencia al fuego de plantas de sótano y sobre rasante cuando la cubierta no es ligera, son de al menos EF-60, dependiendo del tipo de establecimiento y riesgo intrínseco.

Cuando la cubierta es ligera (cuya carga permanente no excede los 100 kg/m²), los tiempos de estabilidad al fuego necesarios para estructuras con cubierta ligera en plantas sobre rasante de establecimientos industriales se indican en la Tabla 3.9. Esto es válido siempre y cuando se cumpla lo siguiente:

- Edificios tipo C con cubiertas ligeras no previstas para ser utilizadas en la evacuación, cuya altura de alero respecto a la rasante exterior no exceda de 15 metros, y siempre que su fallo no pueda ocasionar daños graves a los edificios o establecimientos próximos, ni comprometer otras plantas inferiores o la sectorización de incendios implantada.
- Edificios de tipo B, siempre que al menos el 90% de la superficie del establecimiento esté en planta baja y el resto en planta sobre rasante, y los recorridos de evacuación desde cualquier punto del establecimiento hasta una salida de planta o del edificio no superen los 25 metros.

Tabla 3.9. Estabilidad al fuego de estructuras de cubierta ligera en plantas sobre rasante (RSCIEI).

Nivel de riesgo intrínseco	Tipo A Sobre rasante	Tipo B Sobre rasante	Tipo C Sobre rasante
Riesgo bajo	No admitido	EF-15	No se exige
Riesgo medio	No admitido	EF-30	EF-15
Riesgo alto	No admitido	EF-60	EF-30

En tanto, cuando la superficie total del sector de incendio esté protegida por un sistema de rociadores automáticos de agua, y bajo las mismas condiciones antes mencionadas, se pueden adoptar los valores de la Tabla 3.9. Estabilidad al fuego de estructuras de cubierta ligera en plantas sobre rasante (RSCIEI). Tabla 3.9.

Tabla 3.10. Estabilidad al fuego de estructuras de cubierta ligera con instalación de rociadores automáticos (RSCIEI).

Nivel de riesgo intrínseco	Tipo A Sobre rasante	Tipo B Sobre rasante	Tipo C Sobre rasante
Riesgo bajo	EF-60	No se exige	No se exige
Riesgo medio	EF-90	EF-15	No se exige
Riesgo alto	No admitido	EF-30	EF-15

Por otra parte, se establece que los establecimientos industriales de una sola planta con cubiertas ligeras situados en edificios de tipo C, separados al menos 10 metros de los edificios o establecimientos industriales más próximos, no requieren RF en la estructura principal ni en la cubierta.

La máxima superficie construida admisible para un sector de incendio depende del tipo de establecimiento y del riesgo intrínseco, como se indica en la Tabla 3.11. Cuando se instalen sistemas de rociadores automáticos de agua que no sean exigidos preceptivamente el Reglamento, las máximas superficies construidas admisibles indicadas en la Tabla 3.11 pueden multiplicarse por 2. En configuraciones tipo C y para actividades de riesgo intrínseco bajo o medio, el sector de incendio puede tener cualquier superficie si así lo requieren las cadenas de fabricación, siempre que cuenten con una instalación fija de extinción, y la distancia a edificios de otros establecimientos industriales sea superior a 10 m.

Tabla 3.11. Máxima superficie admisible de cada sector de incendio, en m², según el RSCIEI.

Riesgo intrínseco		Configuración del establecimiento		
		Tipo A	Tipo B	Tipo C
Bajo	1	1000	4000	6000
	2	1000	4000	6000
Medio	3	500	3500	5000
	4	400	3000	4000
	5	300	2500	3500
Alto	6	No admitido	2000	3000
	7	No admitido	1500	2500
	8	No admitido	No admitido	2000

3.1.4. Reino Unido

3.1.4.1. Ensayo de resistencia al fuego

En primer lugar, cabe mencionar que hay ciertas edificaciones exentas de cumplir con las disposiciones de The Building Regulations [28], algunas de las cuales comprenden las edificaciones con cubierta de membrana: las edificaciones temporales (destinadas a permanecer erigidas por hasta 28 días), las edificaciones auxiliares de trabajos de construcción o ingeniería civil (destinadas a ser utilizadas solamente durante el curso de dichos trabajos y no adaptadas para el alojamiento), entre otros, como se indicó anteriormente en la sección Reino Unido 2.7.4.

Aquellas edificaciones que sí están incluidas en esta reglamentación, en cuanto a seguridad contra incendios deben cumplir con el Approved Document B. Según este documento, los edificios deben ser diseñados y construidos de manera que existan las disposiciones apropiadas para la alerta temprana de incendios y, en caso de incendio, los medios de escape apropiados,

desde el edificio a una zona de seguridad fuera del mismo capaz de ser utilizada de forma segura y efectiva en todo momento.

El desempeño en términos de resistencia al fuego de los elementos estructurales se determina en base a la norma BS 476 Partes 20 a 22 [28–30], o bien en base a las normas europeas armonizadas, de acuerdo con el método de clasificación de la norma EN 13501-2 [27], como se indicó previamente.

El ensayo de resistencia al fuego de la norma BS 476 consiste en el calentamiento de los elementos de construcción en un horno, según la curva nominal estándar (ISO 834). El ensayo continúa hasta la duración requerida para el elemento, o bien hasta que el espécimen falla ante uno o más de los tres criterios siguientes:

- Capacidad de carga: la capacidad de soportar la carga aplicada sin que ocurra el colapso.
- Integridad: la capacidad de resistir el paso de las llamas o gases calientes. El criterio de integridad es determinado mediante un ensayo de ignición usando un tampón de algodón o un medidor del tamaño de las aberturas, o por la presencia de llamas sostenidas a través de una abertura.
- Aislamiento: la capacidad de restringir el aumento de temperatura en la cara no expuesta. La falla del aislamiento se produce cuando el aumento de temperatura promedio en la cara no expuesta supera los 140°C por encima de la temperatura promedio inicial, o si en cualquier punto el aumento de la temperatura es superior a 180°C por encima de la temperatura promedio inicial.

Algunos elementos de construcción requieren el cumplimiento de los tres criterios, otros dos y algunos solamente uno, como se indica en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12. Requisitos de resistencia al fuego que deben cumplir los elementos de construcción, para cumplir con The Building Regulations [28].

Elemento constructivo	Capacidad de carga	Integridad	Aislamiento
Muro soportante	✓	✓	✓
Suelo/cielorraso	✓	✓	✓
Viga	✓		
Columna	✓		
Partición		✓	✓
Puerta		✓	✓
Muro de vidrio		✓	✓

En The Building Regulations no se hace referencia explícita a estructuras con cubierta de membrana. Los elementos en general deben cumplir con los periodos mínimos de resistencia al fuego según el uso de la edificación, mostrados en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13. Resistencia al fuego exigida a elementos de edificaciones de un piso sobre el nivel del suelo, según *The Building Regulations* [28].

Destino de la edificación	Mínimos periodos de resistencia al fuego (minutos) en edificaciones de un piso sobre el nivel del suelo.	
	Sin aspersores	Con aspersores
Residencial	30	30
Oficinas	30	30
Comercial	60	30
Reunión de personas y recreación	60	30
Industrial	60	30
Almacenamiento y otros no-residenciales	60	30

Sin embargo, los elementos que solamente soportan un techo, o que corresponden al piso más bajo de una edificación, no requieren cumplir con dichas disposiciones de resistencia al fuego, a menos que:

- Sean parte de un muro de compartimentación.
- Soporten una galería.
- Sean parte (o soporten) un muro exterior que tenga limitaciones en el porcentaje de áreas desprotegidas (que son las partes de un muro que tienen menos resistencia al fuego que la exigida, es decir, que lo indicado en la Tabla 3.13).

Respecto al último punto, el cerramiento completo puede prescindir de resistencia al fuego si es que se cumplen las condiciones del apartado B4 del Approved Document B para permitir un 100% de áreas desprotegidas:

- La distancia mínima a los deslindes es de 12,5 metros para destinos residencial, de oficinas, de reunión de personas y recreación.
- La distancia mínima a los deslindes es de 25 metros para destinos de tienda o comercial, industrial, de almacenamiento, y otros no-residenciales.
- El edificio no debe exceder los 10 metros de altura.

3.1.5. Estados Unidos

3.1.5.1. Ensayos de resistencia al fuego

En Estados Unidos, según la sección 703 del IBC [24], para la clasificación de resistencia al fuego se utilizan los procedimientos descritos en la norma ASTM E 119 [13]. El código NFPA 101 [2] también indica el uso de dicha norma. El ensayo de resistencia al fuego se lleva a cabo de la misma manera que los anteriormente descritos. La curva de calentamiento está dada por una tabla de valores de la temperatura en función del tiempo y es similar a la ISO 834, como se aprecia en la Figura 3.1.

Además del ensayo de resistencia al fuego, esta norma contempla el ensayo del chorro de agua, que se realiza sobre una probeta duplicada. El procedimiento consiste en la exposición del elemento a los efectos de un chorro de agua (de características estandarizadas), inmediatamente

después del ensayo de resistencia al fuego, por un periodo de tiempo igual a la mitad de la clasificación de resistencia al fuego determinada en la probeta original.

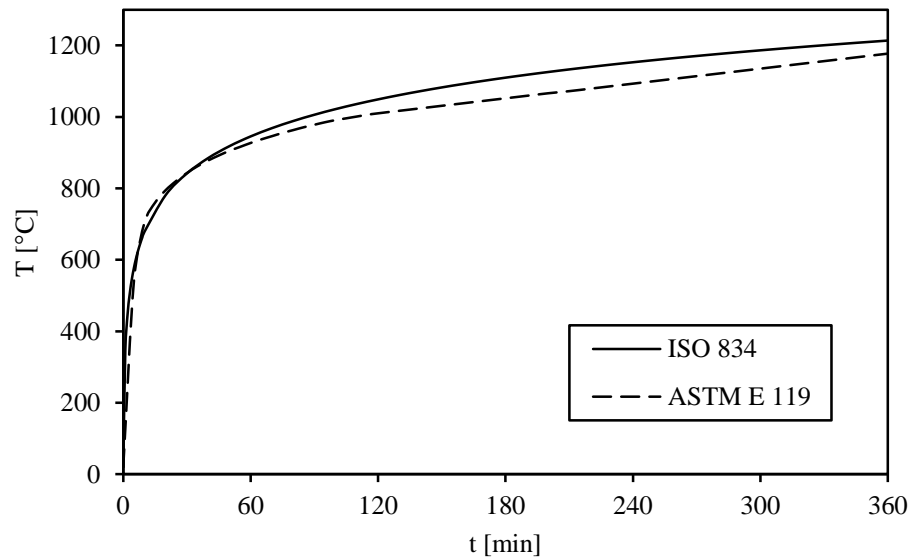


Figura 3.1. Comparación de curvas de calentamiento para ensayo de resistencia al fuego, de las normas ASTM E119 e ISO 834.

Los resultados del ensayo se expresan en minutos enteros de resistencia al fuego. Las condiciones de aceptación para la clasificación de resistencia al fuego dependen de la función del elemento. Para muros y elementos de separación soportantes, las condiciones son las siguientes:

- El elemento debe soportar las cargas aplicadas durante el ensayo de resistencia al fuego, sin el traspaso de llamas o gases lo suficientemente calientes para encender una mota de algodón, por un periodo igual a aquel para el cual se desea la clasificación.
- El elemento debe soportar las cargas aplicadas durante los ensayos de resistencia al fuego y del chorro de agua, sin el traspaso de llamas o gases lo suficientemente calientes para encender una mota de algodón, o del chorro de agua. Se considera que el montaje falla el ensayo del chorro de agua si se desarrolla una abertura que permite la proyección de agua del chorro más allá de la superficie no expuesta.
- La transmisión de calor a través del elemento durante el ensayo de resistencia al fuego no debe ser tal que la cara no expuesta eleve su temperatura más de 250°C sobre su temperatura inicial.

Para muros y elementos de separación no soportantes, las condiciones de aceptación para la clasificación de resistencia al fuego son las siguientes:

- El elemento debe superar el ensayo de resistencia al fuego sin el traspaso de llamas o gases lo suficientemente calientes para encender una mota de algodón, por un periodo igual a aquel para el cual se desea la clasificación.
- El elemento debe superar los ensayos de resistencia al fuego y de chorro de agua sin el traspaso de llamas o gases lo suficientemente calientes para encender una mota de algodón, o del chorro de agua. Se considera que el montaje falla el ensayo del chorro de

agua si se desarrolla una abertura que permite la proyección de agua del chorro más allá de la superficie no expuesta.

- La transmisión de calor a través del elemento durante el ensayo de resistencia al fuego no debe ser tal que la cara no expuesta eleve su temperatura más de 250°C sobre su temperatura inicial.

Para columnas, la condición de aceptación para la clasificación de resistencia al fuego es la siguiente:

- La columna debe soportar la carga aplicada durante el ensayo de resistencia al fuego, por un periodo igual a aquel para el cual se desea la clasificación.

Para evaluar la protección de columnas estructurales de acero, las condiciones de aceptación para la clasificación de resistencia al fuego son:

- La transmisión de calor a través de la protección, durante el periodo de exposición al fuego para el cual se desea la clasificación, no debe superar en más de 538°C el promedio aritmético de la temperatura del acero en cualquiera de los cuatro niveles donde se ubican las termocuplas, ni debe superar en más de 649°C la temperatura en cualquiera de los puntos medidos.

Para vigas soportantes restringidas, las condiciones de aceptación para la clasificación de resistencia al fuego son las siguientes:

- La muestra debe soportar la carga aplicada durante el periodo de clasificación.
- Para muestras con elementos de acero estructural, y durante la mitad del tiempo de clasificación del montaje o 1 hora (lo que sea mayor), se debe cumplir que: la temperatura del acero no debe exceder los 704°C en ningún punto, y la temperatura promedio registrada por cuatro termocuplas en cualquier sección no debe exceder los 593°C.

Para evaluar la protección de vigas estructurales de acero, las condiciones de aceptación para la clasificación de resistencia al fuego son:

- La transmisión de calor a través de la protección, durante el periodo de exposición al fuego para el cual se desea la clasificación, no debe superar en más de 538°C el promedio aritmético de la temperatura del acero en cualquiera de los cuatro niveles donde se ubican las termocuplas, ni debe superar en más de 649°C la temperatura en cualquiera de los puntos medidos.

Tabla 3.14. Requisitos de resistencia al fuego que deben cumplir los elementos de construcción, al ser ensayados de acuerdo con la norma ASTM E119.

Tipo de elemento	Resistencia mecánica	Integridad	Aislamiento	Chorro de agua
Muros y divisores soportantes	✓	✓	✓	✓
Muros y divisores no soportantes		✓	✓	✓
Columnas	✓			
Protección de columnas estructurales de acero			✓	
Vigas restringidas soportantes	✓		✓	
Protección de vigas estructurales de acero			✓	

3.1.5.2. Clasificación y requerimientos

Los requerimientos de resistencia al fuego dependen del tipo de construcción. De acuerdo con la sección 3102 del IBC, la clasificación del tipo de construcción de las estructuras con cubierta de membrana procede de la siguiente manera:

- Las estructuras de membrana no combustibles (criterios de no combustibilidad indicados en la sección 4.2.3.1 de esta memoria) clasifican como construcción Tipo IIB.
- Las estructuras de marcos o cables no combustibles cubiertos por una membrana aprobada (no combustible o que cumpla con NFPA 701, ver criterios en la sección 4.2.3.1 de esta memoria) clasifican como construcción Tipo IIB.
- Otras estructuras de membrana, compuestas por materiales permitidos por el IBC, clasifican como construcción Tipo VB.

En base a lo anterior, a los elementos del marco estructural primario de construcción Tipo IIB y VB se les exige 0 horas de resistencia al fuego.

En tanto, la NFPA indica que no se deben usar materiales de membrana en construcciones que requieran cumplir con una clase de resistencia al fuego en techos o muros. Es decir, de acuerdo con esta reglamentación, las edificaciones especiales estudiadas pueden considerarse como construcción Tipo II(000) o Tipo V(000):

- Aquellas cuyos elementos son de materiales aprobados no combustibles o de combustibilidad limitada, clasifican como construcción Tipo II(000).
- Aquellas cuyos elementos son entera o parcialmente de madera u otro material aprobado, clasifican como construcción Tipo V(000).

3.1.6. FM Global

Para la evaluación de la resistencia al fuego de los elementos, el Data Sheet 1-21 [32] recomienda usar el procedimiento de la norma ASTM E119, pero indica que el uso de otras curvas nominales como la ISO 834 no producirá diferencias significativas. Sin embargo, en otras normas, condiciones de ensayo como el tamaño mínimo de las muestras o la cantidad de termocuplas, podrían diferir de lo indicado en ASTM 119, siendo dichos ensayos en algunos casos inválidos para los estándares de FM Global.

De acuerdo a lo que indica el Data Sheet 1-59 [33], no se permite el uso de telas o membranas en construcciones que requieran cumplir con una clasificación de resistencia al fuego, o en las que se necesita una barrera contra el fuego.

La clase de resistencia al fuego que deben alcanzar los elementos, de manera general, es la indicada por los códigos de construcción pertinentes a cada jurisdicción.

3.2. Otras disposiciones

Además de la resistencia al fuego de la estructura, se reglamenta la ubicación y cantidad de salidas de emergencia del recinto (en caso de que sea usado por público), la distancia mínima a otros recintos y las condiciones del terreno circundante. También se regula el uso de sistemas de protección activa, desde rociadores automáticos hasta la presencia de extintores portátiles. Todo esto va más allá de la materialidad de la edificación, pero colabora en la creación de un ambiente más seguro en caso de incendio.

La norma europea EN 13782 [34] recopila la normativa relativa a seguridad durante todas las etapas de ingeniería relacionadas a carpas móviles y temporales. En ella se recogen las normas sobre comportamiento al fuego que aplican a dichas edificaciones especiales. Además de citar la normativa de resistencia al fuego ya mencionada, se indican ciertas recomendaciones de diseño con respecto al acceso y egreso de espacios cerrados en edificaciones especiales con personas en su interior, así como de las dimensiones de espacios interiores:

- Las salidas de emergencia deberían tener una altura de al menos 2,0 metros.
- Ninguna salida debería ser de anchura inferior a 1,0 metro.
- La mínima altura libre interior debería ser 2,3 metros para elementos de la estructura y 2,0 metros para elementos textiles
- La altura libre promedio de las carpas no debería ser inferior a 2,5 metros.
- Con relación a la cantidad de ocupantes, las carpas deberían tener al menos dos salidas hacia la intemperie, situadas favorablemente, de al menos 1,0 metro de anchura y 2,0 metros de altura, de las cuales al menos una debería ser apta para sillas de ruedas.
- Para calcular la anchura de las rutas de escape, debería considerarse una anchura de 1,0 m para 150 personas, admitiendo interpolación. La anchura libre mínima aceptable debería ser 1,0 metro.

En cuanto a altura de la edificación, la NFPA limita las estructuras con cubierta de membrana a un solo piso, pero sin limitar su altura.

Por otra parte, de acuerdo con el IBC la altura permitida depende del tipo de construcción y clasificación de ocupación, como se indica a continuación:

- Tipo IIB: dependiendo de la clase de ocupación, 55, 70 o 75 pies (16764, 19812 o 22860 mm, respectivamente) sobre el nivel del terreno.
- Tipo VB: dependiendo de la clase de ocupación, 40 o 60 pies (12192 o 18288 mm, respectivamente) sobre el nivel del terreno.

3.3. Materiales de la estructura

Las estructuras de las edificaciones de membrana se construyen mayoritariamente en perfiles livianos de acero o aluminio. Las normas EN 1993-1-2 (Eurocódigo 3) y EN 1999-1-2 (Eurocódigo 9) se utilizan en conjunto con la norma EN 1991-1-2 y se ocupa del diseño de estructuras (protección pasiva) para la situación accidental de exposición al fuego, teniendo en cuenta las propiedades mecánicas de los materiales en función de la temperatura.

3.3.1. Acero

El acero, en diversas aleaciones, es uno de los materiales más comúnmente utilizados en edificaciones, siendo asimismo usado en estructuras con cubierta de membrana. Este material tiene por lo general buenas propiedades mecánicas, pero sufre de dilatación y pérdida de resistencia al ser sometido a elevadas temperaturas.

Este material comienza a perder resistencia a partir de los $\sim 550^{\circ}\text{C}$, pero la rapidez con que el acero estructural fallará depende de muchos factores. Que una columna o viga de acero pueda continuar desempeñando su función a temperaturas mayores, dependerá de la carga, de las condiciones de soporte, del grado de restricción, de la dependencia en la temperatura de las propiedades del material, y del gradiente de temperatura en la sección.

Según el Eurocódigo 3 [35], para fines de diseño se considera que el acero carbono comienza a reducir sus propiedades de resistencia sobre los 200°C (en el caso del límite de proporcionalidad y el módulo de elasticidad) o bien los 400°C (en el caso del esfuerzo de fluencia efectivo), como se puede apreciar en la Tabla 3.15. Asimismo, a los 600°C todas aquellas propiedades de resistencia se ven reducidas a menos de la mitad.

Un incendio estándar (ISO 834) alcanza los 200°C en menos de un minuto, los 400°C en menos de dos minutos, y los 600°C en menos de 10 minutos, por lo cual los elementos estructurales de acero expuestos no podrían resistir un tiempo mucho más prolongado que este último. Igualmente, en cualquier incendio paramétrico se alcanzarán dichas temperaturas a los pocos minutos de exposición.

Tabla 3.15. Factores de reducción de las relaciones de esfuerzo-deformación del acero carbono. Las relaciones de esfuerzo-deformación están asociadas a la Figura 3.2. Fuente: Eurocódigo 3, EN 1993-1-2 [35].

Temperatura del acero θ_a [$^{\circ}\text{C}$]	Factores de reducción a la temperatura θ_a , relativos al valor de f_y o E_a a 20°C		
	Factor de reducción (relativo a f_y) para el esfuerzo de fluencia efectivo $k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	Factor de reducción (relativo a f_y) para el límite de proporcionalidad $k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$	Factor de reducción (relativo a E_a) para pendiente del rango lineal elástico $E_{y,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$
20	1,000	1,000	1,000
100	1,000	1,000	1,000
200	1,000	0,807	0,900
300	1,000	0,613	0,800
400	1,000	0,420	0,700
500	0,780	0,360	0,600
600	0,470	0,180	0,310
700	0,230	0,075	0,130
800	0,110	0,050	0,090
900	0,060	0,038	0,068
1000	0,040	0,025	0,045
1100	0,020	0,013	0,023
1200	0,000	0,000	0,000

Nota: Para valores intermedios de temperatura, puede ser usada la interpolación lineal.

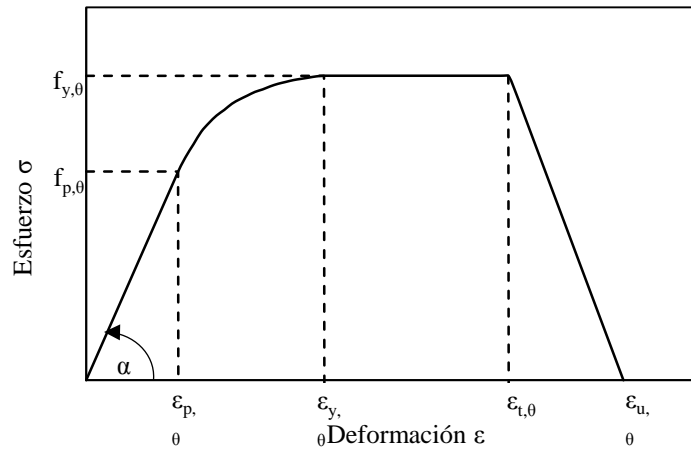


Figura 3.2. Relación esfuerzo-deformación del acero carbón a altas temperaturas. Fuente: Eurocódigo 3, EN 1993-1-2 [35].

3.3.2. Aluminio

El aluminio es un material resistente, liviano y durable, que a la vez proporciona a las estructuras rapidez de instalación y desarmado. Diversas aleaciones de este material son utilizadas en los elementos estructurales de las edificaciones cubiertas de membrana. Sin embargo, este material también está sujeto a la dilatación y pérdida de resistencia con el aumento de la temperatura.

La resistencia al 0,2% de deformación a temperaturas elevadas se expresa como una proporción $k_{0,\theta}$ de la resistencia a temperatura ambiente, de acuerdo con la Ecuación 3.1. Esta proporción de reducción dependerá del tipo de aleación y de su tratamiento.

$$f_{0,\theta} = k_{0,\theta} \cdot f_0 \quad 3.1$$

Donde,

$f_{0,\theta}$: resistencia al 0,2% de deformación a elevadas temperaturas.

f_0 : resistencia al 0,2% de deformación a temperatura ambiente.

En estructuras de membrana se suelen utilizar aleaciones de serie 6000, con tratamientos de tipo T5 o T6. En la Tabla 3.16 se muestran valores de diseño de $k_{0,\theta}$ para algunas de aquellas aleaciones, extraídos del Eurocódigo 9 [36].

Por otra parte, el módulo de elasticidad de las aleaciones de aluminio, a altas temperaturas, se ve modificado según los valores de la Tabla 3.17, cuyos valores también fueron extraídos del Eurocódigo 9.

En todas las aleaciones mostradas, la resistencia de diseño comienza a reducirse antes de alcanzar los 100°C, y en la mayoría de ellas ésta se reduce a la mitad antes de alcanzar los 250°C. En un incendio estándar (ISO 834), dichas temperaturas se alcanzan en menos de un minuto.

Tabla 3.16. Proporciones de la resistencia al 0,2% de deformación $k_{o,\theta}$ de aleaciones de aluminio a temperaturas elevadas, para un periodo de exposición térmica de hasta dos horas. Fuente: Eurocódigo 9, EN 1999-1-2 [36].

Aleación	Tratamiento	Temperatura de la aleación de aluminio [°C]							
		20	100	150	200	250	300	350	550
6005	T5	1,00	0,93	0,81	0,66	0,42	0,23	0,11	0
6061	T6	1,00	0,95	0,91	0,79	0,55	0,31	0,10	0
6063	T5	1,00	0,92	0,87	0,76	0,49	0,29	0,14	0
6063	T6	1,00	0,91	0,84	0,71	0,38	0,19	0,09	0
6082	T6	1,00	0,90	0,79	0,65	0,38	0,20	0,11	0

Tabla 3.17. Módulo de elasticidad de las aleaciones de aluminio a altas temperaturas $E_{al,\theta}$, para una exposición térmica de hasta dos horas. Fuente: Eurocódigo 9, EN 1999-1-2 [36].

Temperatura de la aleación de aluminio, θ [°C]	Módulo de elasticidad, $E_{al,\theta}$ [N/mm ²]
20	70000
50	69300
100	67900
150	65100
200	60200
250	54600
300	47600
350	37800
400	28000
550	0

3.4. Protección al fuego la estructura

Para reducir la acción y propagación del fuego en los elementos estructurales en general, se puede recurrir a ciertas prácticas: compartimentación, masividad de los elementos, revestimientos especiales, recubrimientos o pinturas. Sin embargo, no todas ellas son apropiadas para las edificaciones especiales. La compartimentación no es posible, ya que estos edificios consisten en un solo gran ambiente cerrado por la cubierta de membrana. La masividad de los elementos se puede aumentar hasta cierto punto, mientras los costos sean razonables.

Para las edificaciones livianas, la forma más apropiada de reducir la acción del fuego es mediante la protección con materiales aislantes como revestimiento, o recubrimientos con pinturas u otros materiales especiales.

Existen diversos revestimientos y recubrimientos para limitar la temperatura de los elementos estructurales en un incendio. Las dos categorías más básicas de estos protectores contra el fuego son: membranas protectoras y productos de aplicación directa. Las membranas protectoras son materiales sólidos que se mantienen independientemente de la superficie protegida, como fieltros, mantas o placas. Un ejemplo son las placas de materiales como yeso cartón. La protección de aplicación directa se refiere a productos que son aplicados directamente al sustrato a proteger,

sujetándose generalmente de forma adhesiva. Pueden ser aplicados con espátula, vertidos o rociados. Un ejemplo es el revestimiento de hormigón o estuco de yeso.

Hay una gran variedad de materiales de recubrimiento que se aplican en forma de pintura o rocío, los cuales se pueden clasificar de manera general en tres tipos [32]:

- Recubrimientos de fibra mineral: corresponde a roca volcánica fundida hilada en finas fibras, que son aplicadas al sustrato rociándolas con agua. Opcionalmente se puede compactar y usar adhesivos y sellantes.
- Recubrimientos cementicios: estos recubrimientos utilizan cemento y algún agregado. Típicamente se usan minerales expandidos como la perlita y vermiculita o plásticos expandidos como el poliestireno.
- Recubrimientos intumescentes: estos materiales se expanden al ser expuestos al calor de un incendio y forman una capa protectora. Se pueden clasificar en dos tipos: pinturas y masillas.

4. REACCIÓN AL FUEGO

La reacción al fuego es la forma en que un producto o material responde al calentamiento o a un incendio. Esto incluye características como la inflamabilidad, propagación de llamas, liberación de calor, y la generación de productos de la combustión. Los ensayos de reacción al fuego son generalmente aplicados a materiales combustibles.

4.1. Comportamiento de la membrana

Al estudiar el comportamiento al fuego de edificaciones livianas con cubierta de membrana, tienen particular relevancia las propiedades de combustión de esta última, ya que representa gran parte del área del cerramiento.

Algunos de los materiales más usados en la fabricación de las membranas que recubren las edificaciones livianas, son los polímeros sintéticos como el etileno-tetrafluoroetileno (ETFE), el polietileno de alta densidad (HDPE), la polietersulfona (PES), el politetrafluoroetileno (PTFE), el policloruro de vinilo (PVC), y el polifluoruro de vinilideno (PVDF); las fibras de poliéster; las fibras de vidrio; y combinaciones de algunos ellos, en lo que se conoce como materiales compuestos o *composite*.

Las características más importantes de un material ante un escenario de incendio son aquellas relacionadas con la ignición, la propagación de llama, la tasa de liberación de calor (HRR), y la liberación de humo, gases tóxicos y productos corrosivos.

En la Tabla 4.1 se indican ejemplos de propiedades relativas a la ignición de algunos de los materiales comúnmente utilizados en la fabricación de cubiertas de membrana, mencionados anteriormente.

Tabla 4.1. Temperatura de descomposición, de máxima tasa de pirólisis y de ignición, y flujo de calor crítico (CHF) para ignición pilotada de materiales utilizados en cubiertas de membrana [17].

Material	T _d [°C]	T _p [°C]	T _{ign} [°C]	TRP [kW·s ^{1/2} /m ²]	CHF [kW/m ²]
Etileno-tetrafluoroetileno (ETFE)	400	520	540	478	17 - 27
Polietileno alta densidad (HDPE)	411	469	380	343	15
Polietersulfona (PES)	533	572	502	360	19 - 30
Tereftalato de polietileno (PET)	392	426	407	403	50
Politetrafluoroetileno (PTFE)	543	587	630	654	50
Policloruro de vinilo (PVC)	273	285	395	174	21
Polifluoruro de vinilideno (PVDF)	438	487	643	609	30 - 50

4.1.1. Características de respuesta al fuego

Hilaldo [37] identifica 10 características que describen la respuesta de un material de tipo textil que es expuesto al fuego, las cuales se señalan a continuación:

1. Susceptibilidad de ardido sin llama: la combustión sin llama es la propagación lenta de una onda de combustión a través de un combustible poroso, caracterizada por temperaturas relativamente bajas y oxidación incompleta.
2. Susceptibilidad de ignición: la facilidad con que se enciende, especialmente por acción de una pequeña llama o chispa.
3. Propensión a combustión repentina: un incendio que se propaga con extrema rapidez, como podría ocurrir con la ignición de un estanque de líquido inflamable.
4. Propagación de llama: el progreso de la llama sobre una superficie.
5. Liberación de calor: el calor producido por la combustión de una cantidad dada de material.
6. Resistencia al fuego: el tiempo durante el cual un material mantiene su integridad de diseño bajo condiciones de combustión especificadas.
7. Facilidad de extinción: la facilidad con la que la combustión puede ser extinguida para un material específico.
8. Evolución de humo: la generación de una suspensión de partículas visible, no luminosa, expresada usualmente en términos de oscurecimiento.
9. Evolución de gases tóxicos: gases que son venenosos o destructivos para los tejidos del cuerpo.
10. Evolución de gases corrosivos: gases que corroen materiales que en otro caso son estables, especialmente metales.

A la lista anterior se puede sumar otra característica de la respuesta al fuego, especialmente relevante al tratarse de un material que podría conformar la cubierta de membrana: la producción de gotas incandescentes.

4.2. Clases y exigencias de reacción al fuego

En el ámbito internacional, no existe uniformidad en la clasificación de reacción al fuego de materiales. Hay una gran cantidad de ensayos, que permiten evaluar diversas propiedades, tanto de materiales en general, como de líquidos o sólidos, etc. Además, los diferentes ensayos son rara vez comparables entre sí.

En Estados Unidos existen normas y criterios de clasificación redactados por diversos organismos, como lo son la NFPA y la ICC. En Chile existen normas de ensayo de reacción al fuego para diferentes tipos de elemento o materiales, pero no existen los criterios de clasificación ni exigencias.

Por otro lado, en los últimos años la Unión Europea ha intentado unificar los criterios de clasificación de materiales por medio de las Euroclases (EN 13501), que además son más

precisas que antiguos estándares que cumplían el mismo objetivo como, por ejemplo, la norma española UNE 23727.

4.2.1. Chile

En Chile existen diversos ensayos que permiten evaluar la reacción al fuego de los materiales, de los cuales hay dos relevantes que se describirán brevemente a continuación. A pesar de existir las normas de ensayo, no existen los criterios de clasificación, ni exigencias de reacción al fuego en la normativa vigente, por lo que éstos son escasamente aplicados.

4.2.1.1. No combustibilidad

La norma NCh 1914/1 [38] establece un método que permite valorar la característica de un material de emitir, en condiciones controladas, un calor superior a un nivel dado o de emitir llamas. Esta se aplica a los materiales o productos de construcción y/o edificación, que hayan recibido - o no - una capa de acabado; no es aplicable a la materia empleada en el acabado. Sus resultados no permiten describir o evaluar el riesgo de incendio que presenta un material en condiciones de uso reales, sino más bien compararlo a otros materiales.

El método consiste en el calentamiento de cinco probetas cilíndricas de 45 mm de diámetro y 50 mm de altura, dentro de un horno precalentado 840°C, durante 20 minutos. A lo largo del periodo de calefacción, se registran las temperaturas, y la aparición eventual de llamas sostenidas y su duración.

Un material ensayado bajo este método se considera no combustible si, durante el ensayo, todas sus probetas cumplen con las siguientes condiciones (y, en contraste, se considera que un material es combustible si cualquiera de las probetas deja de cumplir alguna de ellas):

- a) La media de las cinco lecturas de la temperatura máxima de la termocupla del horno no excede en más de 50 °C la temperatura inicial.
- b) La media de las cinco lecturas de la temperatura máxima de la termocupla de superficie no excede en más de 50 °C la temperatura inicial del horno.
- c) La media de las cinco lecturas de la temperatura máxima de la termocupla central no excede en más de 50 °C la temperatura inicial del horno.
- d) La duración media calculada de las llamas sostenidas no excede los 20 segundos.
- e) La pérdida de masa media no excede el 50% de la masa media original.

4.2.1.2. Comportamiento de telas a la acción de una llama

La norma NCh 1979 [39], describe un procedimiento que permite estudiar la respuesta de telas bajo condiciones de laboratorio, siendo sus resultados útiles solo para fines de comparación. El ensayo determina el lapso de combustión con llama y sin llama, así como las superficies dañadas por la acción de una llama normalizada aplicada sobre telas. La norma se aplica a telas, excepto aquellas usadas como revestimiento.

El método consiste en colocar probetas, de 340 mm x 75 mm, verticalmente en una cámara de combustión especial. En total se ensayan veinte probetas, de las cuales diez están cortadas en la

dirección de la urdimbre y las restantes en la dirección de la trama. Las probetas se fijan verticalmente en el portaprobetas. El quemador se enciende con una llama de altura $40 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$, a una distancia mínima de 50 mm de la probeta. Por el canto inferior de la probeta, se aplica la llama normalizada durante 3 segundos (a cinco probetas cortadas en cada dirección), o bien 15 s (al resto de las probetas). Si la probeta arde, se determina el lapso de combustión con llama. Si la probeta continúa ardiendo sin llama luego de que la misma se ha extinguido, se determina el lapso de combustión sin llama.

Una vez retirada la muestra del portaprobetas, se realiza el ensayo de desgarro. Para ello, se perforan orificios de aproximadamente 5 mm a cada lado del lugar quemado y a una distancia de aproximadamente 5 mm del canto inferior. Por uno de los orificios se cuelga la probeta a un gancho ubicado en el soporte, y del otro orificio se cuelga, de manera lenta y uniforme, una carga según se indica en la Tabla 4.2. Finalmente, se mide la longitud del desgarro provocado por la acción de la carga sobre la tela, desde el canto inferior.

Tabla 4.2. Carga de desgarro en función de la masa por unidad de área de la muestra de tela.

Masa tela, m [g/m^2]	$m \leq 200$	$200 < m \leq 500$	$500 < m \leq 750$	$750 < m$
Carga de desgarro [g]	100	250	350	450

4.2.2. Unión Europea

La norma EN 13501-1 [40] proporciona el procedimiento de clasificación de reacción al fuego para los productos de construcción. Las clases de comportamiento al fuego que esta norma establece (conocidas como Euroclases), se determinan por medio de diferentes métodos de ensayo, a decir:

- Ensayo de no combustibilidad (EN ISO 1182): identifica productos que no contribuirán a un incendio, o lo harán de manera poco importante, independientemente de su uso final. Sus criterios son: incremento de temperatura en la probeta (ΔT [K]), duración de llamas sostenidas (t_f [s]), y pérdida de masa de la probeta (Δm [%]).
- Ensayo del calor de combustión (EN ISO 1716): determina el máximo desprendimiento potencial total de calor de un producto cuando se quema por completo, independientemente de su uso final. Entrega el poder calorífico superior del material (PCS [MJ/kg o MJ/m^2]).
- Ensayo de un único objeto ardiendo (EN 13823): evalúa la contribución potencial de un producto al desarrollo de un incendio, bajo una situación de fuego que simula un único objeto ardiendo en una esquina de una habitación cerca de ese producto. Como resultado, este ensayo entrega los siguientes parámetros: producción o no de gotas/partículas inflamadas en 600 segundos; HRR en función del tiempo; índice de la velocidad de crecimiento del fuego (FIGRA [W/s]); velocidad de crecimiento del humo (SMOGRA [m^2/s^2]); propagación lateral de la llama (LFS [m]); producción total de humo en 600 segundos ($\text{TSP}_{600\text{s}}$ [m^2]); y emisión total de calor en 600 segundos ($\text{THR}_{600\text{s}}$ [MJ]).
- Ensayo de inflamabilidad (EN ISO 11925-2): evalúa la inflamabilidad de un producto expuesto a una llama pequeña. Este ensayo evalúa si se produce la ignición del material, la producción de gotas o partículas en llamas y la propagación de la llama (F_s [mm]).

En la Tabla 4.3 se presentan los parámetros de clasificación pertinentes a productos de construcción (excluidos los revestimientos de suelos y productos aislantes térmicos para tubos lineales), de acuerdo con los ensayos mencionados.

En la Tabla 4.4 se presenta la clasificación de los materiales en lo que respecta a su producción de humos, la cual se realiza en función de los parámetros SMOGRA y TSP_{600s}, determinados de acuerdo con la norma EN 13823. Esta clasificación adicional aplica para las clases A2, B, C y D.

En la Tabla 4.5, se presenta la clasificación de los materiales según su producción de gotas o partículas en llamas dentro de 600 segundos, al ser ensayado de acuerdo con la norma EN 13823. Esta clasificación adicional aplica para las clases A2, B, C y D. En el caso de los productos de clase E, la clasificación se realiza en conformidad con la norma EN ISO 11925-2. Dichos productos tendrán una clasificación d2 si se produce la inflamación del papel filtro, y no tendrán ninguna indicación para d si no se produce la inflamación.

Tabla 4.3. Clases de comportamiento al fuego para productos de construcción (excluidos los revestimientos de suelos y los productos aislantes térmicos para tubos lineales), según EN 13501-1.

Clase	Método(s) de ensayo	Criterios de clasificación	Clasificación adicional
A1	EN ISO 1182 y	$\Delta T \leq 30$ °C; y $\Delta m \leq 50\%$; y $t_f = 0$ (es decir, sin producción sostenida de llamas)	-
	EN ISO 1716	$PCS \leq 2,0$ MJ/kg	-
A2	EN ISO 1182 o	$\Delta T \leq 50$ °C; y $\Delta m \leq 50\%$; y $t_f = 20$ s	-
	EN ISO 1716 y	$PCS \leq 3,0$ MJ/kg	-
	EN 13823	$FIGRA \leq 120$ W/s y LFS < borde de la muestra y $THR_{600s} \leq 7,5$ MJ	Producción de humo y Gotas/partículas inflamadas
B	EN 13823 y	$FIGRA \leq 120$ W/s y LFS < borde de la muestra y $THR_{600s} \leq 7,5$ MJ	Producción de humo y Gotas/partículas inflamadas
	EN ISO 11925-2: Exposición = 30 s	$F_s \leq 150$ mm dentro de 60 s	
C	EN 13823 y	$FIGRA \leq 250$ W/s y LFS < borde de la muestra y $THR_{600s} \leq 15$ MJ	Producción de humo y Gotas/partículas inflamadas
	EN ISO 11925-2: Exposición = 30 s	$F_s \leq 150$ mm dentro de 60 s	
D	EN 13823 y	$FIGRA \leq 750$ W/s	Producción de humo y Gotas/partículas inflamadas
	EN ISO 11925-2: Exposición = 30 s	$F_s \leq 150$ mm dentro de 60 s	
E	EN ISO 11925-2: Exposición = 30 s	$F_s \leq 150$ mm dentro de 20 s	Gotas/partículas inflamadas
F	Ningún comportamiento determinado o no cumple con Clase E.		

Tabla 4.4. Clasificación adicional de materiales según producción de humos, norma EN 13823.

Humos	SMOGRA	TSP _{600s}
s1	$\leq 30 \text{ m}^2/\text{s}^2$	$\leq 50 \text{ m}^2$
s2	$\leq 180 \text{ m}^2/\text{s}^2$	$\leq 200 \text{ m}^2$
s3	No cumple s1 o s2	

Tabla 4.5. Clasificación adicional de materiales según producción de gotas o partículas en llamas, norma EN 13823.

Goteo	Gotas/partículas en llamas dentro de 600 segundos
d0	Ausencia de gotas/partículas en llamas
d1	Ausencia de gotas/partículas en llamas persistiendo más de 10 s
d2	No cumple d0 o d1

Por otra parte, la norma EN 15619 establece las especificaciones de los tejidos recubiertos de caucho o plástico destinados a carpas y estructuras similares de carácter temporal. La norma establece a su vez un sistema de clasificación de materiales según su comportamiento al fuego, basado en el ensayo de la norma EN 14115.

El ensayo descrito en la norma EN 14115 consiste en aplicar un ataque inferior combinado de radiación de calor y llama directa sobre probetas de material colocadas en posición oblicua en 45°. El técnico observa y mide la facilidad de ignición, la posible perforación del material, la propagación de la llama y la posible caída de gotas o partículas inflamadas. Los resultados conducen a la clasificación presentada en la Tabla 4.6, donde T1 correspondería al nivel que presenta la mejor reacción al fuego.

Tabla 4.6. Clasificación de materiales tejidos recubiertos de caucho o plástico destinados a carpas y estructuras similares (EN 15619).

Clasificación	Inflamación de probeta	Propagación longitudinal	Anchura destruida entre los 450 y 600 mm	Caída de gotas o partículas
Nivel T1	< 5s	< 250 mm	Sin requisito	No inflamadas
Nivel T2	Sin requisito	< 350 mm	Sin requisito	No inflamadas
Nivel T3	Sin requisito	< 600 mm	< 90 mm	No inflamadas
Nivel T4	Sin requisito	< 600 mm	< 90 mm	Sin requisito
No clasificado	Sin requisito	Sin requisito	Sin requisito	Sin requisito

4.2.2.1. Otras recomendaciones de diseño

La norma EN 13782 [34] recopila la normativa relativa a seguridad durante todas las etapas de ingeniería relacionadas a carpas móviles y temporales. En ella se recogen las normas sobre comportamiento al fuego que aplican a dichas edificaciones especiales. Además de citar la normativa mencionada en los párrafos anteriores, se indican ciertas recomendaciones de diseño con respecto al comportamiento a la llama:

- Las paredes, tejidos utilizados para decoración y otros materiales presentes en las edificaciones deberían tener un retardo permanente a la llama.
- No es necesario que aquellos materiales usados para techos a 2,3 metros de altura tengan retardo permanente a la llama.

Los requerimientos normativos de reacción al fuego de los materiales se indicarían en las normas aplicables en cada país de la Unión Europea.

4.2.1. España

Para evaluar la reacción al fuego del material, tanto el CTE como la norma EN 13782 admiten las normas antiguas nacionales y también las Euroclases. La normativa de reacción al fuego de materiales, anterior a las Euroclases, corresponde a la UNE 23727. En ella se clasifican los materiales por medio de diversos ensayos, que tienen en cuenta las características del material, pero no la aplicación real del producto. Para materiales flexibles de espesor inferior o igual a 5 mm, como membranas y textiles, se consideran los siguientes ensayos:

- Ensayo del quemador eléctrico (UNE 23723): por medio de un quemador de radiación calibrada, evalúa la inflamación, caída de gotas (inflamadas o no), destrucción de la probeta, puntos incandescentes y características de los humos.
- Ensayo de goteo (UNE 23725): consisten en la aplicación de una radiación de $3W/cm^2$ durante 10 minutos, la cual se retira al aparecer inflamación y se aplica nuevamente tras su extinción. Se evalúa la caída de gotas (inflamadas o no), tiempo y duración de las inflamaciones, emisión y características de humos, y aspecto y cantidad de residuos.
- Ensayo de velocidad de propagación de la llama (UNE 23724): por medio de la aplicación de una llama durante 5 segundos y 10 veces por probeta, se verifica la no persistencia de la misma, además de la caída de gotas inflamadas. En caso de persistir la llama, se mide su velocidad media de propagación al aplicarla durante 30 segundos.

En la Tabla 4.7 se presentan los criterios de clasificación de la UNE 23727 según los respectivos métodos de ensayo mencionados.

Tabla 4.7. Clases de comportamiento al fuego de materiales flexibles de espesor inferior o igual a 5 mm, de acuerdo con la norma UNE 23727.

Métodos de ensayo y criterios de clasificación						Clas e	
UNE 2372 3	Inflamación < 5 s	Sin caída de gotas					M1
		Caída de gotas	UNE 23725	Inflamación guata		M4	
				Sin inflamación guata	Gotas no inflamadas	M1	
				Gotas inflamadas	M2		
	Inflamación > 5 s	Destrucción < 350	Sin caída de gotas				M2
			Caída de gotas	UNE 23725	Inflamación guata		M4
		Sin inflamación guata			Gotas no inflamadas	M2	
					Gotas inflamadas	M3	
		350 mm < destrucción < 600 mm y anchura < 90 mm	Sin caída de gotas				M3
			Caída de gotas	UNE 23725	Inflamación guata		M4
	Sin inflamación guata	Gotas no inflamadas			M3		
				Gotas inflamadas	M4		
UNE 23724	Propagación continua sobre 250 mm a una velocidad inferior a 2 mm/s					M4	

Las exigencias de reacción al fuego se definen por medio de la clase que deben alcanzar los materiales de acuerdo con UNE 23727, M0 a M4, que se describen de la siguiente manera:

- M0: material no combustible ante la acción térmica normalizada del ensayo.
- M1: material combustible, pero no inflamable, es decir, cuya combustión no se mantiene al quitar la aportación de calor desde un foco exterior.
- M2: material combustible con grado de inflamabilidad baja.
- M3: material combustible con grado de inflamabilidad media.
- M4: material combustible con grado de inflamabilidad alta.

Para adoptar la normativa común de la Unión Europea, se establecen equivalencias aproximadas entre la clasificación de la UNE 23727 y las Euroclases, como se muestra en la Tabla 4.8. De esta manera, las clases exigidas conforme a la norma española deben acreditarse conforme a la norma europea.

Tabla 4.8. Equivalencias aproximadas de la norma UNE 23727 con las Euroclases (EN 13501-1).

Descripción	UNE 23727	EN 13501-1
No combustible	M0	A1-A2-s1,d0
No inflamable	M1	B-s3,d0
Difícilmente inflamable	M2	C-s3,d0
Medianamente inflamable	M3	D-s3,d0

El DB-SI del CTE, indica que los cerramientos formados por elementos textiles, tales como las cubiertas de las edificaciones especiales estudiadas, deben alcanzar la clase M2 en conformidad con la norma UNE 23727, equivalente a C-s3,d0 en las Euroclases, y a nivel T2 en la clasificación de la norma EN 15619 [41].

En tanto, el Protocolo CEM de la ASPEC presenta las siguientes disposiciones:

- Los establecimientos deben ser implantados en espacios que no presenten riesgo de inflamación rápida.
- La cubierta, la doble curva interior eventual y el cerramiento o material de cobertura del establecimiento, debe ser realizada en materiales de categoría M2 en el cual el acta de clasificación de reacción al fuego no tenga límite de durabilidad.
- Los materiales de cubierta, cerramiento y acabados deben cumplir con la clase de reacción al fuego M2.

Por otro lado, el RSCIEI [23] indica que en establecimientos industriales, los elementos constitutivos de los productos incluidos en paredes y cerramientos deben tener clasificación de reacción al fuego M2 o más favorable.

4.2.2. Reino Unido

La clasificación británica de reacción al fuego de materiales está basada en ensayos especificados en la norma BS 476. Los ensayos particularmente relevantes para los fines de clasificación se establecen en dos partes de la norma:

- Parte 6 – Propagación de fuego: permite evaluar la contribución que tendrá un producto al crecimiento del incendio. Para ello, mide la tasa de liberación de calor durante la combustión, que afectará el aumento de temperatura del material circundante y posterior tasa de propagación del fuego.
- Parte 7 – Propagación superficial de la llama: permite evaluar la velocidad y extensión que alcanzará una llama a través de la superficie de un material o producto. Para ello, se expone el elemento a un panel radiante durante 10 minutos.

La clasificación del ensayo de propagación superficial va desde Clase 1 (mejor) hasta Clase 4 (peor, considerado como no aprobado), como se muestra en la Tabla 4.9. Para alcanzar la Clase 0, un material debe satisfacer los requisitos de la Clase 1 y obtener el mejor resultado del ensayo de propagación de fuego.

Tabla 4.9. Límites de clasificación del ensayo de propagación superficial de llama (BS 476 – Parte 7).

Clase	Propagación llama a 1,5 minutos [mm]	Propagación llama final [mm]
1	165 (+25)	165 (+25)
2	215 (+25)	455 (+45)
3	265 (+25)	710 (+75)
4	Excede los límites de Clase 3	

Para adoptar la normativa común de la Unión Europea, al igual que en España, en el Reino Unido se establecen equivalencias aproximadas de la normativa antigua con las Euroclases, las cuales se indican en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10. Equivalencias aproximadas entre la norma BS 476 y las Euroclases (EN 13501-1).

BS 476	EN 13501-1
No combustible	A1
Combustibilidad limitada	A2-s3,d2 o mejor
Clase 0	B-s3,d2 o mejor
Clase 1	C-s3,d2 o mejor
Clase 3	D-s3,d2 o mejor

Por otra parte, en The Building Regulations (Volumen 2, sección B2) se indica que cualquier material flexible usado como cubierta de una estructura (excepto estructuras soportadas por aire), debe cumplir con las recomendaciones de la norma BS 7157, la cual describe el método de ensayo para determinar la facilidad de ignición de telas usadas en la construcción de grandes estructuras con cubierta de membrana (excepto soportadas por aire).

En el ensayo descrito en BS 7157, la fuente de ignición corresponde a pilas de madera, mientras que el marco consiste en una varilla metálica dispuesta para representar las paredes principales y laterales y el techo de la estructura de la tienda. El marco es ligeramente más pequeño que el espécimen de prueba (como una pequeña carpa). Antes de realizar el ensayo, las muestras de tejido se acondicionan durante 72 horas a condiciones ambientales de interior. El ensayo se realiza en un entorno con ciertas características: libre de corrientes de aire, con una temperatura de 20 ± 5 °C y una humedad relativa de $55 \pm 20\%$. Luego de encender pila de

madera, se registra el progreso de la combustión, junto con la formación de gotas llameantes o encendidas, si es que las hay.

La normativa local indica que las telas o membranas de cubierta deben ser de materiales que inherentemente retarden llamas, o con un tratamiento retardante de llamas durable de acuerdo con la norma BS 7157. Los materiales plegables ensayados de acuerdo con la norma BS 476 deben cumplir con la Clase 1. Además, los materiales no deben producir gotas incandescentes ni aportar a la combustión.

4.2.3. Estados Unidos

4.2.3.1. Normas de ensayo

En los códigos de construcción de los Estados Unidos se citan diversos ensayos de comportamiento al fuego aplicables a membranas de edificaciones especiales. A continuación, se explican brevemente las para luego recopilar los requerimientos basados en ellos.

- NFPA 265 (Método B)

Esta norma describe un método de ensayo para determinar la contribución de revestimientos interiores textiles o de vinilo expandido al crecimiento del fuego en una habitación, ante condiciones de exposición al fuego especificadas. Se utiliza para evaluar las características de inflamabilidad de dichos materiales, cuando constituyen las superficies interiores expuestas de edificaciones.

Los especímenes, montados como recubrimiento de tres muros completos del compartimento, se ensayan usando una exposición en esquina. El quemador produce una tasa de calor de 40 kW por 5 minutos seguida por 150 kW por 10 minutos, dando un periodo de exposición total de 15 minutos. La contribución del material al crecimiento del fuego debe ser medida por medio del monitoreo constante del flujo de calor incidente en el centro del suelo, la temperatura de los gases en la parte superior de la habitación, la tasa de liberación de calor, la liberación de humo, y el tiempo hasta el flashover. El ensayo se lleva a cabo con ventilación natural de la habitación a través de una puerta. Se registra la ocurrencia de flashover cuando cualesquiera dos de las siguientes condiciones se han alcanzado:

- a) La tasa de liberación de calor excede 1 MW.
- b) El flujo de calor en el suelo excede 20 kW/m².
- c) La temperatura promedio de la capa superior excede 600°C.
- d) Las llamas salen por la puerta.
- e) Se produce la autoignición de un objetivo de papel en el suelo.

Finalmente, se considera que el desempeño de los materiales ensayados es satisfactorio cuando se cumplen las siguientes condiciones:

- La llama no se debe propagar al techo durante la exposición a 40 kW.
- La llama no se debe propagar a las extremidades externas de las muestras en los muros de 2,44 m x 3,66 m.
- No debe ocurrir flashover.

- El humo total liberado durante el ensayo no debe exceder los 1000 m².

- ASTM E84

El método descrito en la norma ASTM E84, aplicable a superficies expuestas como muros y cielorrasos, permite medir y describir la respuesta de materiales y productos al calor y la llama bajo condiciones controladas. El propósito es determinar características (comparativas al roble rojo) de combustión del material ensayado, por medio de la observación de la propagación de llama.

El ensayo expone la muestra a un flujo de aire controlado y fuego flameante ajustado para propagar la llama a todo lo largo de un espécimen de roble rojo en 5,50 minutos. Durante los 10 minutos que dura el ensayo, se registra la propagación de llama en la superficie de la muestra y la densidad del humo liberado. Se reportan los índices de propagación de llamas (FSI) y de desarrollo de humo (SDI), calculados con relación al roble rojo y paneles de cemento reforzado, a los que se asigna valores arbitrarios de 100 y 0, respectivamente (para ambos parámetros). Los materiales son clasificados como se especifica en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11. Clasificación NFPA de materiales expuestos al interior de recintos, ensayados de acuerdo con la norma ASTM E84/UL 723.

Clase	Índice de propagación de llamas (FSI)	Índice de desarrollo de humo (SDI)
A	0-25	0-450
B	26-75	0-450
C	76-200	0-450

- ASTM E136

El método descrito en la norma ASTM E136 se utiliza para determinar, bajo condiciones de ensayo especificadas, las características de combustión de materiales de construcción (excepto materiales laminados o recubiertos) en un horno de tubo vertical a 750°C. El método permite medir y describir la respuesta de materiales, productos o montajes al calor y llamas bajo condiciones controladas, de modo que sirve como un indicador de aquellos materiales que no aportan a la combustión, y no sirve para mediciones cuantitativas de las propiedades de un material.

Cualquier material sólido es considerado no combustible si tres de cuatro especímenes ensayados cumplen con alguno de los siguientes criterios de aprobación:

1. Primer criterio:
 - a. La pérdida de peso del espécimen no supera el 50%.
 - b. Las temperaturas en la superficie del espécimen y en el centro geométrico del espécimen durante el ensayo no superan los 30°C por sobre la temperatura de equilibrio del horno, medida previo a la introducción del espécimen.
 - c. Durante los primeros 30 segundos de ensayo, no se producen llamas en el espécimen.

2. Segundo criterio:

- a. Si hay pérdida de peso del espécimen superior al 50%, el material es clasificado como incombustible si cumple ambas de las condiciones siguientes.
- b. Las temperaturas en la superficie del espécimen y en el centro geométrico del espécimen durante el ensayo no superan la temperatura de equilibrio del horno medida antes de la introducción del espécimen.
- c. No se producen llamas en el espécimen en ningún momento durante el ensayo.

• NFPA 701 (Método 2)

La norma NFPA 701 [42] proporciona los métodos de ensayo estandarizados por la NFPA para evaluar la propagación de llamas en textiles y películas plásticas. En ella se establecen dos métodos de ensayo, de los cuales el Método 2 es aplicable a telas utilizadas en el montaje de toldos, carpas y otras estructuras de membrana.

El Método de Ensayo 2 consiste en la exposición de un espécimen textil a una llama dentro de un gabinete de ensayo normalizado. Para llevar a cabo ensayos de llama en materiales suspendidos en pliegues, se deben usar al menos cuatro especímenes, cada uno de los cuales debe ser plegado longitudinalmente para formar cuatro pliegues. Aquellos materiales que no puedan ser plegados se ensayan en hojas lisas, para lo cual se deben usar al menos 10 especímenes. Los criterios de comportamiento a la propagación de la llama se listan a continuación:

- Si cualquier espécimen continúa flameando por más de 2 segundos después de que la llama de ensayo ha sido alejada del contacto con el mismo, el material es reprobado.
- Si la longitud quemada de cualquier espécimen plegado excede 1050 mm, el material es reprobado.
- Si la longitud quemada de cualquier espécimen liso excede 435 mm, el material es reprobado.
- Si en cualquier instante, durante o después de la aplicación de la llama de ensayo, porciones o residuos del material ensayado se separan del espécimen o gotean desde el mismo y continúan ardiendo por más de 2 segundos (la medición se aproxima al 0,5 más cercano) después de haber alcanzado la base del aparato, el material debe ser reprobado.

4.2.3.2. Requerimientos de resistencia a la llama y propagación

La normativa de la NFPA indica que, todo material de membrana expuesto al interior de la edificación, cuando es de carácter permanente, debe ser Clase A, en base al ensayo ASTM E84 (ver Tabla 4.11) o bien al Método B de NFPA 265. Además, todas las telas utilizadas en estructuras con cubierta de membrana deben cumplir con los requerimientos del Método 2 de NFPA 701, certificado por una autoridad u organización aceptable.

De acuerdo con el IBC, las membranas y materiales de revestimiento interior deben ser no combustibles (según se indica en el párrafo siguiente) o bien satisfacer los criterios del Método 2 de la norma NFPA 701. En tanto, el IFC indica que las cubiertas de estructuras de membrana deben estar compuestas por materiales que cumplan los criterios del Método 2 de NFPA 701, o bien tratados con un retardante de llama de tal manera que logren cumplir dichos criterios.

Para cumplir con el criterio de no combustibilidad, los materiales elementales (simples) deben ser aprobados de acuerdo con el ensayo ASTM E136; mientras que los materiales tipo *composite*, deben tener como base un material elemental no combustible, con un material superficial de espesor no mayor a 0.125 pulgadas (3.18 mm) que posea un índice de propagación de llama menor o igual a 50, según el ensayo ASTM E84.

4.2.3.3. Otras indicaciones

Las normas de la NFPA no permiten el uso de materiales de membrana cuando se requiera cumplir con clases de resistencia al fuego en muros o techos, a menos que: todo el techo esté a 6100 mm o más sobre cualquier piso, balcón o pasillo (caso en el que se permite el uso de una membrana no combustible o de combustibilidad limitada); o toda parte de la membrana del techo esté lo suficientemente por encima de cualquier potencial de incendio, de forma tal que la temperatura impuesta no exceda la capacidad de la membrana para mantener su integridad [43].

El terreno encerrado por la estructura, así como el terreno que la rodea a una distancia de al menos 3050 mm debe encontrarse despejada de vegetación y material combustible o inflamable. Además, las instalaciones deben mantenerse libres de materiales inflamables o combustibles durante el periodo durante el cual serán usadas por el público.

Por otra parte, la norma NFPA 102 indica que un área cerrada debe estar protegida por rociadores, cumpliendo así con las disposiciones de NFPA 13; a menos que corresponda a una de las siguientes instalaciones:

- Estadios, arenas y estructuras similares cerradas.
- Salas de prensa de área inferior a 93 m².
- Instalaciones de almacenamiento de área inferior a 93 m² si el cerramiento cumple con una clase de resistencia al fuego de al menos una hora.
- Áreas cerradas debajo de tribunas o gradas de uso accesorio de área menor o igual a 27,9 m², cuya construcción es no combustible, de combustibilidad limitada o resistente al fuego; o de área inferior a 93 m² cuyo cerramiento cumple con una clase de resistencia al fuego de al menos una hora.

4.2.4. FM Global

Al igual que la normativa NFPA, el Data Sheet 1-59 [33] indica que no se permite el uso de telas o membranas en construcciones que requieran cumplir con una clasificación de resistencia al fuego, o en las que se necesita una barrera contra el fuego.

Por otro lado, en los casos en que se permite usar este tipo de cubierta, se debe usar una tela o membrana no combustible o bien que no propague el fuego.

- Las telas se consideran no combustibles si han aprobado el ensayo ASTM E136. El ensayo es aplicable a materiales compuestos de fibras, que no sean termoplásticos, y no son aplicables a materiales laminados o tipo *composite*, como la mayoría de membranas. La fibra de vidrio recubierta con PTFE puede ser considerada no combustible.

- Para determinar si una tela o membrana propaga o no el fuego, se debe ensayar de acuerdo con la norma NFPA 701, Método 2.

Cuando la clase de ocupación lo requiera, se debe proveer protección de rociadores automáticos, pero con algunas consideraciones. Los materiales de tela o membrana que son expuestos al fuego pueden fallar (perder integridad, derretirse, quemarse), creando agujeros en la envoltura del edificio y permitiendo que el calor (en forma de gases calientes) escape. Los rociadores automáticos dependen del calor de la exposición al fuego para su funcionamiento adecuado, por lo que la liberación de los gases podría retrasar la respuesta de los rociadores y resultar en protección inadecuada. Por lo tanto, los rociadores deben cumplir con ciertos requisitos: deben ser de respuesta rápida y con baja temperatura nominal, certificados por “*FM Approvals*”; se debe realizar un ensayo a escala real de la edificación, que demuestre el funcionamiento satisfactorio del sistema; no se deben usar estructuras con cubierta de membrana para ocupaciones con almacenamiento de combustibles o líquidos inflamables. Si no se cumplen estos requisitos, se asume que el sistema de protección de rociadores automáticos no funcionará adecuadamente.

4.3. Productos ignífugos [17]

Los productos ignífugos son un conjunto diverso de sustancias químicas que se agregan a otros productos manufacturados, como textiles y plásticos, con el fin de modificar sus características de inflamabilidad. De esta manera, se incrementa la resistencia del material a la ignición y, una vez que esta ocurre, se reduce la tasa de propagación de la llama. Así, estos tratamientos constituyen una forma de mejorar el comportamiento al fuego de los materiales y, en algunos casos, permitir que sean utilizados en la cubierta de edificaciones especiales.

Los tratamientos ignífugos pueden actuar por diferentes métodos, tanto físicos como químicos. Existen en general cinco maneras distintas a través de las cuales se puede retardar la propagación de la llama en un tejido mediante la aplicación de ciertos productos químicos:

- **Minerales hidratados:** el principio de acción en el uso de estos productos es su descomposición endotérmica y liberación de agua, resultando en la dilución de los gases de la combustión y enfriamiento del polímero. Entre ellos, se encuentran el trihidrato de aluminio, hidróxido de magnesio y carbonato de magnesio.
- **Materiales halogenados:** el principio de acción de estos productos es la interrupción del mecanismo en cadena de radicales. Esto ocurre mediante la liberación de radicales halógenos, los cuales forman hidróxidos halogenados y neutralizan los radicales ricos en energía. Los compuestos halogenados pueden ser en base a cloro o bromo.
- **Trióxido de antimonio:** este compuesto actúa de manera sinérgica con la mayoría de compuestos halogenados, permitiendo usar una menor cantidad de ellos para alcanzar un resultado equivalente, comparado con el uso de materiales halogenados por sí solos.
- **Aditivos de fósforo:** el principio de acción de estos productos es la formación de una capa superficial sólida, por medio de reacciones entrecruzadas. Ejemplos son los clorofosfatos, polifosfato de amonio, ésteres de fosfatos, entre otros.
- **Sistemas de ignífugado intumescentes:** la intumescencia es un mecanismo que causa que el material tratado eche espuma y forme una barrera aislante al ser expuesto al calor,

reduciendo las cantidades de oxígeno y calor que llegan al elemento. Por lo general alguno de estos componentes se encuentra en los materiales intumescentes: donantes de carbono, que actúan como agentes de carbonización (por ejemplo, polialcoholes como almidón, pentaeritritol); donantes de ácidos, que actúan como catalizador (por ejemplo, polifosfato de amonio); propelentes, que actúan como agentes de soplado (por ejemplo, melamina u otras sustancias que se descomponen para generar CO_2 o NH_3).

5. DISEÑO DE EDIFICIOS ESPECIALES

En este capítulo se recogen las metodologías de ensayo y clasificación, así como los requerimientos en cuanto a resistencia al fuego de la estructura, reacción al fuego de la membrana y otras disposiciones de seguridad, reunidas de los capítulos anteriores.

A partir de lo obtenido de las normas de la Unión Europea, España, Reino Unido y Estados Unidos, además de la institución FM Global, se podrán determinar los aspectos más importantes considerar para mejorar la normativa chilena en el ámbito de las edificaciones livianas con cubierta de membrana.

5.1. Resistencia y reacción al fuego

En las tablas que se entregan a continuación, se indican los aspectos de diseño relevantes en cuanto a resistencia y reacción al fuego de los edificios especiales.

En lo que respecta a la resistencia al fuego de la estructura, en la Tabla 5.1 se indican las metodologías de ensayo y clasificación, así como las exigencias establecidas en base a ello, en las diferentes normativas revisadas en este trabajo.

En cuanto a la reacción al fuego de los materiales de la membrana, la Tabla 5.2 recopila las metodologías de ensayo y clasificación, además de las exigencias de acuerdo con las diferentes normas revisadas.

Tabla 5.1. Metodología de ensayo y exigencias según diferentes normativas de resistencia al fuego de elementos de construcción.

País / Institución	Normas	Metodología	Exigencias
Chile	NCh 935/1	Curva ensayo ISO 834	La estructura debe mantener su capacidad de carga y no emisión de gases inflamables durante al menos 30 min. (clase mínima F-30), excepto casos especiales que no requieren protección contra el fuego.
Unión Europea	EN 1363	Curva ISO 834 o Curvas paramétricas o Modelos de una/dos zonas o Incendios localizados.	Exigencias indicadas en la normativa aplicable a cada país de la Unión Europea.
España	Normativa U.E.	Curva ISO 834 o Curvas paramétricas o Modelos de una/dos zonas o Incendios localizados.	Sin exigencia de resistencia al fuego, si los elementos textiles cumplen con clase de reacción al fuego M2 (UNE-EN 23727) y el certificado de ensayo acredita la perforación del elemento. En caso contrario, se exige clasificación R-30. Para establecimientos industriales, RSCIEI exige estabilidad mecánica, estanquidad y aislamiento durante 15 a 60 minutos (excepto instalaciones tipo C de riesgo bajo).
Reino Unido	BS 476 (Partes 20 a 24) o Normativa U.E.	Curva ISO 834 o Curvas paramétricas o Modelos de una/dos zonas o Incendios localizados.	Clasificación mínima R-30 con aspersores y R-60 sin ellos, excepto en el caso de estructuras que solamente soportan un techo, cuyos elementos no requieren cumplir con ninguna exigencia de resistencia al fuego.
Estados Unidos	ASTM E119	Curva ensayo ASTM E119	Exigencia de 0 horas de resistencia al fuego de la estructura; pero solo se permiten materiales no combustibles o que cumplan con criterios de aprobación de NFPA 701.
FM Global	Data Sheet 1-21; ASTM E119	Curva ASTM E119. Se permite uso de otras curvas nominales, como la ISO 834. Pero las condiciones de ensayo deben asemejarse a las de ASTM E119 para satisfacer los estándares de FM Global.	La clase de resistencia al fuego que deben alcanzar los elementos es aquella que indican los códigos de construcción pertinentes de cada jurisdicción.

Tabla 5.2. Metodología de ensayo y exigencias según diferentes normativas de reacción al fuego.

País / Institución	Normas	Metodología	Exigencias reacción al fuego
Chile	OGUC	Ensayos de no combustibilidad (NCh 1914/1) y comportamiento de telas a la acción de la llama (NCh 1979).	Se recogen normas de ensayo en la OGUC, pero no hay exigencias respecto de las mismas.
Unión Europea	En general: EN 13501-1 (Clasificación)	Ensayos de no combustibilidad (EN ISO 1182), calor de combustión (EN ISO 1716), único objeto ardiendo (EN 13823) e inflamabilidad (EN ISO 11925-2).	Exigencias indicadas en la normativa aplicable a cada país de la Unión Europea.
	Carpas móviles y temporales: EN 15619	Ensayos de comportamiento al fuego de materiales para carpas y similares (EN 14115).	
España	Normativa española: CTE y UNE 23727	Ensayos de quemador eléctrico (UNE 23723), velocidad de propagación de la llama (UNE 23724) y de goteo (UNE 23725).	CTE indica que los cerramientos formados por elementos textiles deben alcanzar la clase M2 en conformidad con UNE 23727, equivalente a clase C-s3,d0 (EN 13501-1), y a nivel T2 (EN 15619). RSCIEI indica clase M2.
	Normativa U.E.	Ver arriba	
Reino Unido	BS 476 (Partes 6 y 7)	Ensayos de propagación de fuego (Parte 6) y de propagación superficial de la llama (Parte 7).	Los materiales plegables deben cumplir con al menos Clase 1 (BS 476), equivalente a C-s3,d2 (EN 13501-1).
	Normativa U.E.	Ver arriba	
Estados Unidos	IBC / IFC y Códigos NFPA	Ensayos de contribución al crecimiento del fuego (NFPA 265), combustión superficial (ASTM E84), comportamiento de materiales en horno de tubo vertical (ASTM E136) y propagación de llama (NFPA 701)	Se exige aprobación del Método 2 de la norma NFPA 701. Normas ICC exigen, alternativamente a NFPA 701, no combustibilidad (aprobar ASTM E136) o, si es composite, no combustibilidad del material elemental y material superficial con índice de propagación de llama menor o igual a 50 (según ASTM E84). Normas NFPA exigen, además de NFPA 701, membrana Clase A (según ASTM E84 o Método B de NFPA 265) si la edificación es permanente. No se permite uso de membranas en construcciones que requieran clase de resistencia al fuego.
FM Global	Data Sheet 1-59	Ensayos de comportamiento de materiales en horno de tubo vertical (ASTM E136) y propagación de llama (NFPA 701)	No se permite el uso de membranas en construcciones que requieran clase de resistencia al fuego, o en las que se necesita una barrera contra el fuego. En casos permitidos, la membrana debe ser no combustible (aprobar ASTM E136) o bien no propagar el fuego (aprobar Método 2 de NFPA 701).

5.2. Otras disposiciones

Además de la resistencia al fuego de la estructura y la reacción de los materiales, se debe reglamentar la ubicación y cantidad de salidas de emergencia del recinto (en caso de que sea usado por público), la altura de edificación y la distancia mínima a otros recintos. También se debe regular el uso de sistemas de protección activa, desde rociadores automáticos hasta la presencia de extintores portátiles. Todo esto colabora en la creación de un ambiente más seguro en caso de producirse un incendio.

Algunas recomendaciones importantes en cuanto a la evacuación de personas se han recogido de la norma europea EN 13782 [34]:

- Las carpas con ocupación prevista mayor a 50 personas deberían tener al menos dos salidas hacia la intemperie, situadas favorablemente, de al menos 1,0 metro de anchura y 2,0 metros de altura, de las cuales al menos una debería ser apta para sillas de ruedas.
- Para calcular la anchura de las rutas de escape, debería considerarse una anchura de 1,0 m para 150 personas (admitiendo interpolación), siendo la anchura libre mínima aceptable de 1,0 metro.

Mientras que la NFPA se establece lo siguiente:

- La distancia a recorrer para la evacuación de los ocupantes, para la mayoría de usos, no debiera ser mayor a 23 metros (distancia a la salida más próxima) [2].
- La evacuación se considera aceptablemente rápida si se realiza en un periodo máximo de 3 minutos [21].

De acuerdo con el IBC, los medios de evacuación deben cumplir con lo siguiente:

- Cualquier espacio cuya carga de ocupación exceda de 49 personas (Grupos A, B, E, F, M, U), 10 personas (Grupos I, R) o 29 personas (Grupo S), debe tener al menos dos salidas.
- Para una carga de ocupación mayor a 500 personas, debe haber al menos tres salidas; mientras que, para una carga de ocupación mayor a 1000 personas, debe haber al menos cuatro salidas.
- En pisos con una sola salida, la máxima distancia a recorrer hasta el exterior es de 23 metros.

En cuanto a la altura de la edificación, la reglamentación europea no establece límites en la altura de la edificación. Las normas NFPA, en tanto, limitan las estructuras con cubierta de membrana a un solo piso, pero sin limitar su altura. Finalmente, en el IBC también se permite un solo piso, pero la altura máxima permitida depende del tipo de construcción y clasificación de ocupación, como se indica a continuación:

- Tipo IIB: dependiendo de la clase de ocupación, 55, 70 o 75 pies (16764, 19812 o 22860 mm, respectivamente) sobre el nivel del terreno.
- Tipo VB: dependiendo de la clase de ocupación, 40 o 60 pies (12192 o 18288 mm, respectivamente) sobre el nivel del terreno.

5.3. Usos permitidos

5.3.1. Chile

En Chile, las edificaciones de membrana de carácter temporal no estarían reguladas por las normas de construcción. En tanto, aquellas de carácter permanente, cuya estructura no satisfaga alguna clase de resistencia al fuego, estarían permitidas por la OGUC [20] para los limitados casos que no requieren protección al fuego, es decir, bajo los siguientes requisitos:

- Edificación de un piso.
- Destino de equipamiento.
- Realizada con elementos de construcción no combustibles (aquellos que no se encienden ni alimentan la combustión bajo la acción del fuego, o bien, tienen una base estructural incombustible cubierta por un revestimiento de menos de 3 mm de espesor en el cual la propagación de la llama tiene una velocidad inferior a 5 m/min).
- Carga de ocupación inferior a 100 personas.
- Carga combustible media inferior a 250 MJ/m² en todos sus recintos.
- Asegurar ocupación solo por personas adultas que puedan valerse por sí mismas.
- Separación de los deslindes por una distancia mayor o igual a 4 metros

El destino de equipamiento corresponde a las construcciones destinadas a la prestación de servicios para complementar las funciones básicas de habitar, producir y circular. Es decir, actividades de carácter científico, comercio, de culto o cultura, deporte, educación, esparcimiento, salud, seguridad, servicios, y social.

Por lo tanto, este tipo de edificaciones se permitiría para todas dichas actividades, pero con las limitaciones constructivas y de ocupación antes mencionadas, reduciendo las posibilidades.

5.3.2. España

En el DB-SI [22] se exige que los cerramientos de tipo textil deben ser de clase M2 (UNE 23727). Por otra parte, se establecen las áreas máximas admisibles de los compartimentos de incendios, pero no se menciona la existencia de establecimientos para los cuales no se requiera cerramiento con resistencia al fuego. Las estructuras secundarias sí pueden tener un cerramiento textil.

En cuanto al uso comercial, se indica que los establecimientos destinados a actividades diferentes a espectáculos, al interior de centros comerciales, no deben constituir un sector de incendio diferenciado si su superficie no excede 500 m².

Por otro lado, de acuerdo con el RSCIEI [23], los establecimientos industriales con cubiertas ligeras no requieren resistencia al fuego bajo las siguientes condiciones:

- Si tienen un sistema de rociadores automáticos: configuraciones de Tipo C con riesgo intrínseco medio o bajo, o de Tipo B con riesgo intrínseco bajo.

- Si no tienen un sistema de rociadores automáticos: configuraciones de Tipo C con riesgo intrínseco bajo.
- Configuraciones de Tipo C, con una separación de al menos 10 m a los edificios o establecimientos industriales más próximos.

Se debe recordar que los establecimientos de Tipo B son aquellos que ocupan totalmente un edificio que está adosado a otro/s edificio/s, ya sean éstos de uso industrial o bien de otros usos; mientras que los establecimientos de Tipo C son aquellos que ocupan totalmente uno o varios edificios, que están a una distancia mayor de 3 m del edificio más próximo de otros establecimientos. Además, en el Apéndice 1 del RSCIEI se encuentra una tabla con los riesgos intrínsecos asociados a una gran cantidad de actividades industriales.

Finalmente, en la Tabla 5.3 se recogen los usos permitidos en España para edificaciones livianas con cubierta de membrana.

Tabla 5.3. Destinos de edificación y condiciones para los cuales se permiten las edificaciones con cubierta de membrana de acuerdo con las normas españolas (DB-SI o RSCIEI).

Destino del edificio	Condiciones
Estructuras secundarias de la edificación.	Material de la cubierta de clase M2 o superior (UNE 23727). Superficie menor o igual a 500 m ² .
Establecimientos al interior de centros comerciales.	Material de la cubierta de clase M2 o superior (UNE 23727).
Establecimientos industriales en configuración tipo C.	Material de la cubierta de clase M2 o superior (UNE 23727). Sin condiciones especiales para riesgo intrínseco bajo. Protegido con sistema de rociadores automáticos, si es de riesgo intrínseco medio. Se admite cualquier tipo de riesgo si la separación a otros establecimientos es de al menos 10 m.
Establecimientos industriales en configuración tipo B.	Material de la cubierta de clase M2 o superior (UNE 23727). Solo riesgo intrínseco bajo, y debe estar protegido con sistema de rociadores automáticos.

5.3.3. Reino Unido

De acuerdo con The Building Regulations [28], los elementos que solamente soportan un techo, o que corresponden al piso más bajo de una edificación, no tienen exigencias de resistencia al fuego, a menos que:

- Sean parte de un muro de compartimentación.
- Soporten una galería.
- Sean parte de (o soporten) un muro exterior que tenga limitaciones en el porcentaje de áreas desprotegidas (que son las partes de un muro que tienen menos resistencia al fuego que la exigida, es decir, que lo indicado en la Tabla 3.13).

Respecto al último punto, el cerramiento completo puede prescindir de resistencia al fuego si es que se cumplen las condiciones del apartado B4 del Approved Document B para permitir un 100% de áreas desprotegidas:

- La distancia mínima a los deslindes es de 12,5 metros para destinos residencial, de oficinas, de reunión de personas y recreación.
- La distancia mínima a los deslindes es de 25 metros para destinos de tienda o comercial, industrial, de almacenamiento, y otros no-residenciales.
- El edificio no debe exceder los 10 metros de altura.

Así, las edificaciones con cubierta de membrana, de acuerdo con la normativa del Reino Unido, son permitidas para los destinos y bajo las condiciones indicadas en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4. Destinos de edificación y condiciones para los cuales se permiten las edificaciones con cubierta de membrana de acuerdo con The Building Regulations.

Destino del edificio	Condiciones
Residencial, de oficinas, de reunión de personas, recreación.	Estructura sin resistencia al fuego, siempre que la altura del edificio no exceda los 10 metros, y la distancia mínima al deslinde sea de 12,5 metros.
Tienda o comercial, industrial, de almacenamiento, y otros no-residenciales.	Estructura sin resistencia al fuego, siempre que la altura del edificio no exceda los 10 metros, y la distancia mínima al deslinde sea de 25 metros.

5.3.4. Estados Unidos

De acuerdo con los códigos NFPA [2, 44], en que las edificaciones con cubierta de membrana se limitan a un piso, estas se permiten para los siguientes usos:

- Como techo en cualquier tipo de construcción, siempre que la membrana sea no combustible o de combustibilidad limitada y se encuentre a no menos de 6,1 metros sobre cualquier piso.
- Como instalaciones temporales o permanentes al interior de centros comerciales, siempre que estén protegidos por rociadores aprobados y el material de la membrana apruebe el Método 2 de NFPA 701. Además, la máxima área que puede tener es de 27,8 m², mientras que la mínima separación con otras estructuras dentro del mall debe ser de 6,1 m.
- En ocupaciones de reunión de personas (como auditorios, salas de conferencia o de exposición, salones de reunión, restaurantes o comedores, teatros, entre otros), hasta 1000 personas, si la edificación es de Tipo V(000); sin límite de ocupantes, si la edificación es de Tipo II(000) y hay protección de rociadores; y hasta 1000 ocupantes, si la edificación es de Tipo II(000) y no hay protección de rociadores. El acabado interior debe ser de material de Clase A o B (ASTM E84) si la carga de ocupación es mayor a 300 personas, y de Clase C si esta es menor o igual a 300 personas. La distancia al deslinde debe ser mayor a 3 m.
- En ocupaciones mercantiles (como tiendas, ferias, salas de venta, centros de suministros para la construcción, entre otros), siempre que el contenido no sea de alto riesgo. Si la superficie excede 1115 m², debe estar protegida por rociadores. Si la superficie excede 2800 m², debe haber un sistema de alarma de incendios. Los materiales del acabado interior deben ser de Clase A o B (ASTM E84). La distancia al deslinde debe ser mayor a 3 metros.

- En ocupaciones industriales (como bodegas, graneros, garajes de estacionamiento, entre otros) y/o de almacenamiento (como fábricas, lavaderos, laboratorios, entre otros). Cuando los contenidos son de riesgo medio o bajo, la distancia al deslinde debe ser mayor a 3 metros. En el caso de contenidos de alto riesgo, la distancia al deslinde depende del nivel de protección requerido según el tipo y cantidad de contenido, pero no debe ser inferior a 9,1 m.

En tanto, de acuerdo con el IBC [24], las edificaciones livianas con cubierta de membrana también se limitan a un solo piso. En este código las limitaciones no son tan específicas como lo indicado por la NFPA. Los usos permitidos serían los siguientes:

- Como techo o tragaluz de cualquier edificio o atrio de un edificio, siempre que la membrana sea no combustible y se encuentre a no menos de 6,1 metros sobre cualquier piso.
- Como techo o tragaluz de cualquier edificio o atrio de un edificio de Tipo IIB, III, IV o V; siempre que la membrana apruebe el Método 2 del ensayo NFPA 701 y se encuentre a no menos de 6,1 metros sobre cualquier piso.
- Como instalaciones al interior de centros comerciales, siempre que estén protegidas por rociadores y el material expuesto al interior sea Clase A o B (ASTM E84).
- En techos de invernaderos donde la ocupación por público general no está permitida, y para cubiertas de acuicultura, no se requiere cumplir con los criterios de propagación del fuego de NFPA 701.
- En ocupaciones de todos los grupos, excepto H (alto riesgo), si la distancia a los deslindes es de al menos 3 metros.
- En ocupaciones de todos los grupos, si la distancia a los deslindes es de al menos 9,1 metros.
- No es posible usar estas edificaciones para ocupaciones que requieran particiones de fuego o barreras de humo, ya que aquellos elementos requieren de resistencia al fuego.
- Cada ocupación tiene limitaciones y requisitos relacionados a la protección activa (rociadores), área o cantidad de ocupantes.

Tabla 5.5. Destinos de edificación y condiciones para los cuales se permiten las edificaciones con cubierta de membrana en los códigos estadounidenses.

Uso	Condiciones (NFPA)	Condiciones (IBC)
Techo en cualquier tipo de construcción.	Membrana no combustible o de combustibilidad limitada, a no menos de 6,1 metros sobre cualquier piso.	Membrana no combustible, a no menos de 6,1 metros sobre cualquier piso. Solo en construcciones de Tipo IIB, III, IV o V: membrana que apruebe el Método 2 del ensayo NFPA 701, a no menos de 6,1 metros sobre cualquier piso.
Instalaciones al interior de centros comerciales.	Protegidas por rociadores aprobados; el material de la membrana debe aprobar el Método 2 de NFPA 701; área máxima de 27,8 m ² ; mínima separación con otras estructuras dentro del mall de 6,1 m.	Protegidas por rociadores y el material expuesto en su interior debe ser de Clase A o B (ASTM E84).
Ocupaciones de reunión de personas.	Hasta 1000 ocupantes, si la construcción es de Tipo V(000), con o sin rociadores, o de Tipo II(000) sin rociadores; sin límite de ocupantes si la construcción es de Tipo II(000) con rociadores. Acabado interior Clase A o B (ASTM E84) para más de 300 personas, y de Clase C en otro caso. La distancia al deslinde debe ser mayor a 3 m.	Protegido por rociadores: - Para más de 300 ocupantes o el área excede 1115 m ² en grupos A-1, A-3 y A-4 (teatros, actividades culturales, arenas, etc) - Para más de 100 ocupantes o el área excede 465 m ² en grupo A-2 (restaurantes, salas de cóctel, etc) - Si el área excede 93 m ² en grupo A-5 (estadios, estructuras de parques de diversiones, tribunas, etc).
Ocupaciones mercantiles.	Contenido de riesgo bajo o medio. Áreas mayores a 1115 m ² protegidas por rociadores. Áreas mayores a 2800 m ² , protegidas por sistema de alarma de incendios. Acabado interior Clase A o B (ASTM E84). La distancia al deslinde debe ser mayor a 3 m.	Protegido por rociadores: - Si el área excede 1115 m ² . - Si el área excede 464 m ² y se almacena mercadería correspondiente a muebles tapizados o colchones. - Si se almacena mercadería en pilas.
Ocupaciones industriales.	Si los contenidos son de riesgo medio o bajo, la distancia al deslinde debe ser mayor a 3 m. Si los contenidos son de riesgo alto, la distancia al deslinde depende del tipo de contenido, pero no debe ser inferior a 9,1 m.	Protegido por rociadores: - Si el área excede 1115 m ² . - Si el área excede 232 m ² y se fabrican muebles tapizados o colchones.
Ocupaciones de almacenamiento.	Si los contenidos son de riesgo medio o bajo, la distancia al deslinde debe ser mayor a 3 m. Si los contenidos son de riesgo alto, la distancia al deslinde depende del tipo de contenido, pero no debe ser inferior a 9,1 m.	Protegido por rociadores: - Si el área excede 1115 m ² . - Si el área excede 232 m ² y se almacenan muebles tapizados o colchones. - Si el área excede 464 m ² y se almacenan vehículos motorizados con fines comerciales.

6. DISCUSIÓN Y SITUACIÓN CHILENA

6.1. Discusión

Las edificaciones con cubierta de membrana forman parte del entorno cotidiano, siendo usadas para fines tan variados como eventos, espectáculos y en el sector industrial, por lo que es importante normar su diseño, instalación, y control de calidad, garantizando de esta manera la seguridad de las personas y los bienes, así como del medio ambiente.

Dadas las condiciones actuales de la normativa en Chile, el uso de las edificaciones con cubierta de membrana es principalmente de carácter temporal y no se encuentra bien regulado, ya que éstas no están incluidas en la OGUC. De manera general, no existen en Chile exigencias legales establecidas con respecto a la reacción al fuego de los materiales, sino solo con respecto al comportamiento en cuanto a resistencia al fuego de la estructura. De esta manera, no siempre se satisfacen las condiciones mínimas de seguridad ante incendios.

En la Tabla 6.1 se presenta un resumen de las exigencias revisadas en cuanto a protección contra incendios en edificaciones con cubierta de membrana, donde se puede apreciar que la reglamentación vigente en Chile se encuentra desactualizada si se la compara con aquella de países desarrollados, particularmente en lo que se refiere a reacción al fuego.

Tabla 6.1. Requerimientos de reacción y resistencia al fuego de edificaciones especiales según normativas extranjeras y de Chile.

País / Institución	Exigencias	
	Reacción al fuego de la membrana	Resistencia al fuego de la estructura
España	Clase M2 (UNE 23727), equivalente a Clase C-s3,d0 (EN 13501-1).	Sin exigencia, si se acredita la perforación de la membrana. En otro caso, Clase R-30 (EN 13501-2)
Reino Unido	Clase 1 (BS 476), equivalente a Clase C-s3,d2 (EN 13501-1).	R-60 sin aspersores, R-30 con aspersores (BS 476). Sin exigencia si la estructura solamente soporta un techo.
Estados Unidos	Clase A (ASTM E84); aprobar Método 2 NFPA 701; no combustible (ASTM E136 o ASTM E84).	No requiere resistencia al fuego (construcción tipo IIB, VB de acuerdo con IBC).
FM Global	No combustible (aprobar ASTM E136) o bien no propaga el fuego (aprobar Método 2 de NFPA 701).	Clase de resistencia al fuego que cumpla los códigos de construcción de cada jurisdicción.
Chile (actual)	Sin requerimientos de reacción al fuego.	Mínimo R-30, para construcción tipo d (NCh 935/1), o sin requerimiento para limitados casos con materiales no combustibles, destino de equipamiento, baja carga combustible, entre otros.

6.1.1. Resistencia al fuego

En cuanto a los ensayos de resistencia al fuego, las curvas ISO 834 y ASTM E119, muy similares entre sí, son las más ampliamente utilizadas. Sin embargo, para determinar las acciones de un incendio, en la normativa europea también se prescriben las curvas paramétricas, los incendios localizados, los modelos de incendio por zonas y los modelos basados en dinámica de fluidos computacional (CFD). Por otra parte, en los Eurocódigos también se encuentra el método de diseño por medio de factores de reducción de la resistencia del material en función de la temperatura. Con estos factores, es posible hacerse una idea del comportamiento de diferentes aleaciones de acero o aluminio a altas temperaturas.

La curva nominal estándar reproduce un incendio compartimentado típico post-flashover, con una serie de limitaciones. En ella no se consideran variables como la ventilación o la carga combustible, por lo que difícilmente representará un escenario de incendio real, particularmente en edificaciones especiales. Además, la función temperatura-tiempo en dicha curva tiene poca relación con lo que sucede en la mayoría de incendios reales, particularmente en edificaciones especiales. La temperatura en una curva estándar se eleva rápidamente y luego continúa aumentando indefinidamente, lo cual no ocurre en la práctica. En un incendio real, una vez que la carga combustible ha sido consumida, el incendio decae o se desplaza. Por otro lado, la severidad de un incendio está relacionada con la carga combustible y la ventilación, factores que no son tomados en consideración en una curva estándar. Es improbable que un incendio en un compartimento de baja carga combustible, o con bajos niveles de ventilación, amenace la integridad estructural, a pesar de que ambos escenarios sí pueden constituir una amenaza para la vida.

Las curvas paramétricas, aunque sí toman en cuenta la ventilación y carga combustible, entre otras variables, también se definen por funciones basadas en incendios compartimentados, no siendo aplicables a recintos con aberturas en el techo. Por tanto, se alejan de la realidad de una edificación especial, cuya membrana sería destruida a los pocos minutos de un incendio. Debido a que la abertura de la membrana se traduciría en una alta tasa de ventilación, esta misma no limitaría la combustión y, además, el calor liberado se disiparía rápidamente en comparación con un incendio típico.

Los modelos de zonas, por otro lado, suponen la acumulación de gases calientes en el recinto de incendio, proceso que no sucederá si se genera la perforación del techo. Mediante modelos computacionales, sin embargo, se podrían tomar en cuenta las variables apropiadas para aproximar un incendio en el tipo de recintos estudiados.

Los incendios localizados posiblemente constituyen una buena forma de reproducir las condiciones a las que estarían expuestos los elementos, pero solo durante los primeros minutos de incendio, pues estos dejan de ser válidos si el diámetro del incendio es mayor a 10 m o la tasa de liberación de calor es superior a 50 MW. Una ventaja de este método es que permite superponer más de un foco de incendio (con un límite de flujo de calor total de $100 \text{ [kW/m}^2\text{]})$.

Además de las curvas de calentamiento, para el diseño estructural se puede recurrir a los Eurocódigos 3 y 9 (de diseño de estructuras de acero y aluminio, respectivamente). Estos entregan herramientas para el diseño ante la situación accidental de exposición al fuego, consistentes en factores de reducción de la resistencia del material en función de la temperatura.

A pesar la existencia de variadas formas de evaluar la resistencia al fuego, principalmente en las normas de la Unión Europea, se observa que en las normativas nacionales de países europeos se continúa utilizando predominantemente la curva nominal estándar.

Sin embargo, las diferencias más importantes entre las normas extranjeras y las chilenas radican en los requerimientos establecidos. En las normas de países desarrollados, las clases de resistencia al fuego que deben alcanzar los elementos de las estructuras con cubierta de membrana son muy bajas, o nulas, pues el enfoque del comportamiento al fuego se encuentra principalmente en la reacción del material de la cubierta.

6.1.2. Reacción al fuego

La reacción al fuego de la envolvente es particularmente relevante en el caso de estos edificios especiales, pues la mayor parte de la superficie de cerramiento está compuesta por membrana que no supone ninguna resistencia al fuego. Por lo tanto, las normas de países desarrollados apuntan a garantizar un apropiado comportamiento del material al momento de un incendio.

Las normas extranjeras revisadas, al momento de evaluar la reacción al fuego de los materiales consideran principalmente los siguientes factores: combustibilidad, calor de combustión, inflamabilidad, propagación de llama, producción de gotas incandescentes y producción de humo.

Una de las normas más completas en cuanto a los parámetros que considera para la clasificación de materiales, es la EN 13501-1 (Euroclases). En ella existen siete clases distintas, de acuerdo con los resultados de cuatro ensayos. A esto se añade clasificación adicional que depende de la producción de humo y generación de gotas o partículas en llamas.

En la Unión Europea también existe la norma de ensayo EN 15619, específica para materiales destinados a carpas y estructuras similares. La clasificación, que va de T1 a T4 se realiza en función de la inflamación, propagación de llamas, destrucción de la probeta y caída de gotas inflamadas. El problema de esta norma es que actualmente no es aplicada en las normativas nacionales, por lo que no existen requerimientos en base a dicha clasificación.

Por otro lado, en Estados Unidos, para edificaciones especiales de carácter permanente, se exige la no combustibilidad de los materiales de la cubierta y cumplir criterios de propagación de llama; en el caso de edificaciones temporales, solo hay exigencias acerca de la propagación de llama. En la NFPA 701 se aborda principalmente la propagación de llama, pero también evalúa que no se produzcan gotas que ardan por más de 2 segundos, a pesar de que no se evalúa la producción de humo.

Para mejorar la reglamentación chilena, deben crearse exigencias de reacción al fuego de los materiales de la edificación, considerando, al menos, las características de propagación de llama y producción de gotas inflamables, que son factores clave en el comportamiento de la edificación en un escenario de incendio. Pero, sobre todo en el caso de edificaciones con personas en su interior, también es importante controlar la producción de humo, pues puede significar intoxicación y/o dificultad de visión para las personas al momento de evacuar.

6.2. Situación chilena actual

Las indicaciones y exigencias obligatorias de protección contra incendios de la reglamentación chilena actual, correspondiente a la OGUC, se refieren principalmente a la resistencia al fuego de los elementos estructurales. No se da importancia a las características de reacción al fuego de sus materiales, que tienen gran relevancia en las etapas iniciales de un incendio.

La norma de ensayo de resistencia al fuego de los elementos estructura, correspondiente a NCh 935/1, utiliza la curva nominal estándar ISO 834, con grandes limitaciones para ser aplicada en edificaciones especiales.

Las exigencias de resistencia al fuego de los elementos de construcción, en base a dicho ensayo, son en general altas para ser aplicadas a edificaciones con perfilería liviana. Solo quedan exentos de cumplir con dichas exigencias de resistencia al fuego aquellas construcciones que satisfagan ciertos requisitos: edificaciones de un piso realizadas con elementos de construcción no combustibles, con destino de equipamiento, carga de ocupación inferior a 100 personas, carga combustible inferior a 250 MJ/m^2 , ocupación por personas que puedan valerse por sí mismas, y distancia a los deslindes de al menos 4 metros. Las condiciones mencionadas limitan considerablemente la cantidad de actividades para las cuales es apta una edificación con cubierta de membrana. Además, al no tener más requisitos, el comportamiento (reacción) al fuego del material de la cubierta, no regulado, podría tener graves consecuencias para la seguridad en caso de incendio.

En cuanto a reacción al fuego, a pesar de haber variadas normas chilenas oficiales de ensayos, muchas de ellas no tienen requisitos ni entregan criterios para la clasificación de los materiales. Por ello, son recogidas por la OGUC, pero no existen las exigencias para establecer un real control del comportamiento al fuego de los materiales.

Además, cabe destacar que la mayoría de las normas vigentes en Chile corresponden a adaptaciones de normativas antiguas de países desarrollados. En dichos países, ellas han sido reemplazadas por estándares modernos acordes con los últimos estudios en el área.

Dicho lo anterior, existe la imperiosa necesidad de modificar la OGUC y establecer normas de carácter obligatorio que aborden condiciones de seguridad específicas para edificaciones temporales o permanentes con cubierta de membrana. El comportamiento al fuego de las edificaciones debería ser analizado de una manera diferente a la que se realiza actualmente en Chile, siendo la reacción al fuego de los materiales un aspecto que debería adquirir relevancia. Así, la nueva normativa debe considerar ensayos que evalúen características de reacción al fuego como lo son el calor de combustión, la propagación de llama, la generación de humos y goteo incandescente, entre otros. Además, se deben incluir sistemas de clasificación adecuados para su aplicación, y con ello la cuantificación de las exigencias.

Es debido a esto que en este trabajo se han estudiado las normas de países desarrollados relacionadas con protección contra incendios en edificaciones con cubierta de membrana. A partir de dicha revisión, se pudieron evaluar y comparar las disposiciones y requerimientos de cada país, además de identificar los aspectos más importantes a considerar en el diseño de edificios especiales, con el fin de entregar las recomendaciones para modificar la OGUC.

En edificaciones con cubierta de membrana, en particular, la reacción al fuego de los materiales es primordial, pues los primeros y más notorios efectos generados en un incendio tendrán relación con las características de la combustión de la cubierta textil. Por lo tanto, las exigencias principales deberían estar enfocadas en la reacción al fuego de los materiales de la edificación antes que en la resistencia al mismo de su estructura. Además, esta última es evaluada en base a un ensayo estándar muy general y poco adaptado a edificios especiales, correspondiente a la norma NCh 935/1.

6.3. Recomendaciones

En base a las revisiones realizadas en el presente trabajo, en esta sección se indicarán las recomendaciones de requerimientos que se deberían incluir en la normativa chilena, con el fin de garantizar el buen comportamiento de edificaciones especiales en caso de incendio.

La recomendación general consiste en adoptar las normas utilizadas en la reglamentación europea, ya que esta es muy específica en cuanto a ensayos y clasificación. Además, al ser utilizadas en gran cantidad de países (a diferencia de las normas norteamericanas), es más fácil la obtención de materiales certificados que cumplan con los requerimientos reglamentarios. En particular, las normas de España se consideran adecuadamente exigentes en cuanto a reacción al fuego de los materiales de la cubierta.

Las disposiciones del Capítulo 3 de la OGUC, persiguen como objetivo fundamental que el diseño de los edificios asegure ciertas condiciones mínimas de seguridad contra incendios. En la Tabla 6.2 se indican dichas condiciones, en conjunto con la forma en que deberían ser abordadas en edificaciones especiales.

Tabla 6.2. Condiciones mínimas de seguridad contra incendios que persigue la OGUC y factores a considerar para que sean satisfechas.

Condiciones mínimas de seguridad	Factores a considerar
Facilitar el salvamento de los ocupantes de los edificios en caso de incendio.	Diseño de la estructura, disposición de vías de evacuación, control de la reacción al fuego de los materiales de la membrana.
Reducir al mínimo, en cada edificio, el riesgo de incendio.	Controlar la carga combustible y otros factores de riesgo de incendio en las edificaciones.
Evitar la propagación del fuego, tanto al resto del edificio, como de un edificio a otro.	Diseño de la estructura, materialidad de la membrana de cubierta.
Facilitar la extinción de los incendios.	Métodos apropiados de lucha contra el fuego.

Debido a que las edificaciones con cubierta de membrana poseen características muy diferentes a las edificaciones típicas, se recomienda la adición de un apartado en la OGUC dedicado exclusivamente a ellas, donde se aborden los aspectos importantes para cumplir con las condiciones mínimas de seguridad contra incendio que se persiguen en la ordenanza. Dicho apartado debería abarcar edificaciones de carácter tanto permanente como temporal. Las edificaciones temporales actualmente no son abordadas en la OGUC, lo cual puede resultar en condiciones inseguras para las personas, las industrias o el medio ambiente.

En los siguientes párrafos se entregan las consideraciones que se deberían tener en cuenta en el diseño, así como los aspectos reglamentarios a incluir en el futuro apartado de la OGUC dedicado a edificaciones especiales, con el fin de lograr una eficaz protección contra incendios.

En cuanto a la estructura, tal como en las normativas extranjeras revisadas, no se debería exigir una clase de resistencia al fuego en base a la curva nominal estándar. Sí se debería garantizar un tiempo mínimo de estabilidad mecánica ante el fuego para asegurar la evacuación de personas (que debería llevarse a cabo en un periodo máximo de tres minutos), lo cual podría ser realizado mediante modelos computacionales o bien mediante los modelos de incendios localizados del Eurocódigo (EN 1991-1-2), ya que estos permiten representar las condiciones que se generan durante los primeros minutos, previo al incendio generalizado.

Con respecto al material de la membrana de cubierta, la reglamentación debe limitar el calor de combustión y propagación de llama, con el fin respectivo de acotar el aporte de energía al incendio y minimizar el avance del mismo. Además, se debe controlar que en el proceso de combustión no se liberen humos tóxicos para los ocupantes, ni se produzcan gotas o partículas incandescentes, que pudieran propagar el fuego o caer sobre las personas. Para lograr lo anterior, se recomienda adaptar los ensayos y metodología de clasificación de la norma europea EN 13501-1. El nivel mínimo de reacción al fuego a exigir debe ser equivalente a nivel C-s2,d0 tanto en casos ocupados por personas como industriales o de almacenamiento.

En el caso en que haya ocupantes en el interior, la cantidad y disposición de salidas deben permitir una evacuación expedita, apuntando a un periodo máximo de tres minutos, que es lo que establece la NFPA como un tiempo prudente. Para ello, se recomienda considerar una anchura de 1,0 metro para la evacuación de 150 personas. Sin perjuicio de lo anterior, para más de 50 ocupantes debe haber al menos dos salidas. Las salidas deben tener altura mínima de 2,0 metros y anchura mínima de 1,0 metro. La distancia a recorrer hasta la intemperie debe ser de máximo 23 metros en ocupaciones de reunión de personas.

En cuanto a la altura edificada, se recomienda limitar la edificación a un piso (sin entresijos), pero sin limitar la altura de los mismos, siempre que se cumpla la estabilidad estructural, como indican los códigos de la NFPA.

Además de lo anterior, se deberían establecer usos específicos para los cuales serían aptas construcciones con estas condiciones de comportamiento al fuego. Es decir, sin una clase de resistencia al fuego de sus elementos estructurales, y sin protección al fuego del cerramiento (correspondiente a la membrana). Para ello, se recomienda basarse en las normas de la NFPA, que son muy específicas en este aspecto.

Finalmente, se recomienda que las normas velen por la reducción al mínimo del riesgo de incendio, prohibiendo el uso de estas edificaciones en ocupaciones de alto riesgo, o el almacenamiento de productos combustibles, tóxicos, explosivos, entre otros.

7. CONCLUSIONES

En base a las normas y documentos estudiados y comparados, se concluye que la normativa chilena se encuentra desactualizada en lo que se refiere al comportamiento al fuego de edificaciones especiales. Por lo tanto, es necesario revisar y modificar la reglamentación, actualizando los requerimientos reglamentarios de la OGUC, para así garantizar un comportamiento óptimo que cumpla con los objetivos de la seguridad contra incendios.

Se lograron alcanzar los objetivos específicos planteados, con lo cual el objetivo general de este trabajo fue cumplido: se analizaron y compararon las normas chilenas relativas a protección contra incendios, con aquellas de países desarrollados; a partir de lo cual se propusieron bases y recomendaciones para una normativa chilena específica para edificaciones especiales.

En cuanto a la reacción al fuego de la membrana, se pudo apreciar que en las normas de países desarrollados son particularmente relevantes las características de propagación de llamas, goteo incandescente y liberación de humos, factores que definirán el ambiente que se generará en un escenario de incendio. Esto no ocurre en la reglamentación chilena actual, donde el comportamiento ante incendios se traduce básicamente en ensayos de resistencia al fuego de los elementos constructivos. Considerando que la membrana constituye un gran porcentaje del cerramiento de la edificación, incluir requisitos de reacción al fuego es uno de los aspectos más importantes a considerar al modificar la OGUC.

En el ámbito de la Unión Europea existen normas de ensayo y clasificación muy avanzadas y detalladas en lo que se refiere a la reacción al fuego de materiales, siendo muy eficiente en la caracterización del comportamiento al fuego de los materiales. Sin embargo, aún falta por avanzar para aplicar esto de manera óptima en las normas de cada país.

En Estados Unidos, en tanto, las normas de ensayos de reacción al fuego son más acotadas y no evalúan tantas características como lo hacen las normas europeas. Sin embargo, su aplicación se encuentra bien establecida en los códigos, siendo muy específica y habiendo mayor claridad acerca de los requerimientos que se deben cumplir para cada tipo de edificación.

En términos de protección contra el fuego, un aspecto muy relevante es la protección pasiva. Es decir, controlar que la materialidad y configuración del edificio sea la adecuada para evitar que un incendio inicie y se propague. En el caso de las edificaciones estudiadas, se deben limitar principalmente las características de combustión de la membrana: que no aporte a la combustión ni genere gotas incandescentes o humos tóxicos. Además, se deben disponer salidas de emergencia de manera de asegurar la expedita evacuación de las personas en el interior (en caso de haberlas), considerando que difícilmente los materiales de edificaciones especiales como las estudiadas podrán resistir las condiciones de un incendio desarrollado.

En las normas estudiadas también se indica el uso de rociadores de agua en ciertos casos, dependiendo de los usos, áreas y cargas de ocupación. Sin embargo, su uso tiene limitaciones que

no se deben pasar por alto: al quemarse la membrana, los gases calientes escapan, retardando la detección del incendio y activación automática de los sistemas. Por lo tanto, en caso de usar rociadores, estos deben tener características especiales y se deben cumplir ciertos requerimientos. Los rociadores deberían activarse con temperaturas inferiores a las establecidas para edificaciones comunes. En los estándares de FM Global, además, se exige la realización un ensayo a escala real de la edificación, que demuestre el funcionamiento satisfactorio del sistema. Si no se cumplen estos requisitos, se asume que el sistema de protección de rociadores automáticos no funcionará adecuadamente.

Al proyectar una edificación con cubierta de membrana, otros aspectos que se deben tener en cuenta son la ubicación del edificio en el entorno, la presencia de material combustible a su alrededor, y la calidad y cantidad de vías de evacuación, en caso de que el uso suponga personas en el interior.

En base a las normas revisadas y analizadas, en el Capítulo 6 se establecieron recomendaciones para modificar la normativa chilena, las cuales se resumen en la Tabla 7.1. En cuanto a la resistencia al fuego de la estructura y reacción al fuego de la membrana, se consideró que los requerimientos de las normas españolas eran los más adecuados. Por otra parte, las exigencias relacionadas a límites de altura, área y carga de ocupación se recogieron principalmente de las normas estadounidenses, pues eran muy específicas en ese aspecto.

Tabla 7.1. Recomendaciones de exigencias para edificios especiales a establecer o modificar en Chile.

Aspecto	Consideraciones recomendadas	Aspectos reglamentarios
Estructura	No se debería exigir resistencia al fuego ante ensayo nominal estándar (NCh 935/1).	Sin exigencia de clasificación de resistencia al fuego ante curva nominal estándar. Se debe garantizar que la estructura mantenga su estabilidad durante al menos el periodo de evacuación (en caso de personas en su interior), para lo cual se recomienda el uso de incendios localizados basados en Eurocódigo.
Membrana	Limitar el calor de combustión (bajo aporte de energía al incendio).	Desarrollar normas que adapten los ensayos de clasificación indicados en EN 13501-1 y establecer los criterios de clasificación y exigencias en la OGUC. El nivel mínimo exigido de reacción al fuego debería ser equivalente a C-s2,d0.
	Controlar la propagación de la llama.	
	Restringir la producción de gotas o partículas incandescentes.	
	Restringir la producción de humos tóxicos.	
Salidas	En caso de ser ocupada por personas, se debe asegurar la evacuación eficaz y oportuna de los ocupantes de la edificación.	Apuntar a un periodo de evacuación de 3 minutos. Se debe considerar una anchura de 1,0 metro para la evacuación de 150 personas. Para más de 50 ocupantes debe haber al menos dos salidas. Las salidas deben tener altura mínima de 2,0 metros y anchura mínima de 1,0 metro. La distancia a recorrer hasta la intemperie no debe ser mayor a 23 metros en ocupaciones de reunión de personas.
Altura	La altura debe garantizar la estabilidad estructural y permitir una óptima evacuación de los ocupantes.	Se recomienda limitar la edificación a un piso (tampoco permitir entresijos), pero sin limitar la altura, siempre que se cumpla con la estabilidad estructural.
Otros	Reducir al mínimo el riesgo de incendio.	Establecer claramente los usos para los cuales estarían permitidas este tipo de edificaciones. No se debe permitir el almacenamiento de materiales combustibles, tóxicos, explosivos, etc.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] National Fire Protection Association, *NFPA Glossary of terms*. Quincy, MA, 2016.
- [2] National Fire Protection Association, “NFPA 101. Life Safety Code.” Quincy, MA, 2015.
- [3] International Organization for Standardization, “ISO 834-1. Fire resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements.” ISO, p. 25, 1999.
- [4] National Fire Protection Association, *NFPA 921. Guide for fire and explosion investigations*. Quincy, MA, Estados Unidos, 2017.
- [5] C. Hugget, “Estimation of rate of heat release by means of oxygen consumption measurements,” *Fire Mater.*, vol. 4, no. 2, pp. 61–65, 1980.
- [6] V. Babrauskas and R. D. Peacock, “Heat release rate: the single most important variable in fire hazard,” *Fire Saf. J.*, vol. 18, no. 3, pp. 255–272, 1992.
- [7] R. W. Fitzgerald and B. J. Meacham, *Fire Performance Analysis for Buildings*. John Wiley & Sons, 2017.
- [8] J. Liu and W. K. Chow, “Determination of fire load and heat release rate for high-rise residential buildings,” *Procedia Eng.*, vol. 84, pp. 491–497, 2014.
- [9] E. Hartin, “Fire development - Compartment fire behavior.” [Online]. Available: <http://cfbt-us.com/wordpress/?tag=fire-development&paged=3>. [Accessed: 31-Oct-2017].
- [10] National Institute of Standards and Technology, “Fire Dynamics,” 2016. [Online]. Available: <https://www.nist.gov/>. [Accessed: 24-Oct-2017].
- [11] D. Drysdale, *An Introduction to Fire Dynamics*, 3rd ed. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, 2011.
- [12] CEN and BSI, *BS-EN 1991-1-2. Eurocode 1. Actions on structures. Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire*. 2004.
- [13] ASTM International, *ASTM E119. Standard test methods for fire tests of building construction and materials*. West Conshohocken, PA, 2000.
- [14] Instituto Nacional de Normalización, *NCh 935/1. Prevención de incendio en edificios - Ensayo de resistencia al fuego. Parte 1, Elementos de construcción en general*. Chile, 1997.
- [15] CEN and AENOR, “UNE-EN 1363-1. Ensayos de resistencia al fuego. Parte 1, Requisitos generales.” 2000.

- [16] CEN and AENOR, *UNE-EN 1363-2. Ensayos de resistencia al fuego. Parte 2, Procedimientos alternativos y adicionales.* 2000.
- [17] C. A. Harper, *Handbook of building materials for fire protection.* New York: McGraw-Hill, 2004.
- [18] NFPA, *Manual de protección contra incendios. Volumen I,* 5th ed. 2009.
- [19] National Fire Protection Association, “NFPA 92B. Guide for smoke management systems in malls, atria, and large areas.” Quincy, MA, 2000.
- [20] Ministerio de Vivienda y Urbanismo, *Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones.* Chile, 2015.
- [21] National Fire Protection Association, “NFPA 101. Life Safety Code - Handbook.” 2009.
- [22] Ministerio de Vivienda, *Documento Básico SI - Seguridad en caso de incendio.* España, 2006.
- [23] Ministerio de Industria Turismo y Comercio, *Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales.* España, 2004.
- [24] International Code Council, *2015 International Building Code.* 2014.
- [25] International Code Council, *2015 International Fire Code.* 2014.
- [26] G. B. Menon and J. N. Vakil, “Handbook on building fire codes.” 2005.
- [27] CEN and AENOR, “UNE-EN 13501-2. Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación. Parte 2: Clasificación a partir de datos obtenidos de los ensayos de resistencia al fuego excluidas las instalaci.” 2009.
- [28] *The building regulations.* .
- [29] BSI, “BS 476. Fire tests on building materials and structures. Part 20: Method for determination of the fire resistance of elements of construction (general principles).” 1987.
- [30] BSI, “BS 476. Fire tests on building materials and structures. Part 21: Method for determination of the fire resistance of load bearing elements of construction.” 1987.
- [31] BSI, “BS 476. Fire tests on building materials and structures. Part 22: Method for determination of the fire resistance of non-load bearing elements of construction.” 1987.
- [32] Factory Mutual Insurance Company, “FM Global Property Loss Prevention Data Sheets. 1-21. Fire Resistance of Building Assemblies.” 2012.
- [33] Factory Mutual Insurance Company, “FM Global Property Loss Prevention Data Sheets. 1-59. Fabric and Membrane Structures.” 2013.
- [34] CEN and AENOR, “UNE-EN 13782. Estructuras temporales. Carpas. Seguridad.” 2005.
- [35] CEN and BSI, *BS EN 1993-1-2. Eurocode 3. Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design.* 2005.

- [36] CEN and BSI, *BS EN 1999-1-2. Eurocode 9. Design of aluminium structures - Part 1-2: Structural fire design*. 2007.
- [37] C. J. Hilaldo, *Flammability Handbook for Plastics*, 5th ed. Lancaster, PA: Technomic Publishing, 1998.
- [38] Instituto Nacional de Normalización, *NCh 1914/1.Of84: Prevención de incendios en edificios - Ensayo de reacción al fuego. Parte 1, Determinación de la no combustibilidad de materiales de construcción*. Chile, 1984.
- [39] Instituto Nacional de Normalización, *NCh 1979. Prevención de incendio en edificios - Determinación del comportamiento de telas a la acción de una llama*. Chile, 1987.
- [40] CEN and AENOR, *UNE-EN 13501-1. Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación. Parte 1: Clasificación a partir de datos obtenidos en ensayos de reacción al fuego*. 2007.
- [41] AITEX, “Comportamiento al fuego de cerramientos textiles. Modificación del Documento Básico de Seguridad en Caso de Incendio (DB-SI) del Código Técnico de la Edificación (CTE).” Alicante, España.
- [42] National Fire Protection Association, *NFPA 701. Standard methods of fire tests for flame propagation of textiles and films*. Quincy, MA, Estados Unidos, 2015.
- [43] National Fire Protection Association, “NFPA 102. Standard for Grandstands, Folding and Telescopic Seating, Tents, and Membrane Structures.” Quincy, MA, 2016.
- [44] National Fire Protection Association, “NFPA 5000. Building construction and safety code.” 2018.