



CONGRESO INTERNACIONAL DE LA CONSTRUCCIÓN CON ACERO

2019

Medellín, *Centro de Eventos El Tesoro*
Junio 19, 20 y 21

ICCA [®]
INSTITUTO COLOMBIANO DE
LA CONSTRUCCIÓN CON ACERO



NAVES INDUSTRIALES EN CASO DE INCENDIO

Juan David Gómez Roldán. I.C., Ms.C., Ph.D.





PRINCIPIOS DE SEGURIDAD

Seguridad en caso de incendio consiste en reducir a límites aceptables el riesgo de que los usuarios de un edificio sufran daños derivados de un incendio de origen accidental, como consecuencia de las características de su proyecto, construcción, uso y mantenimiento

La reducción de pérdidas financieras, propiedades y contenidos toma cada día más fuerza.

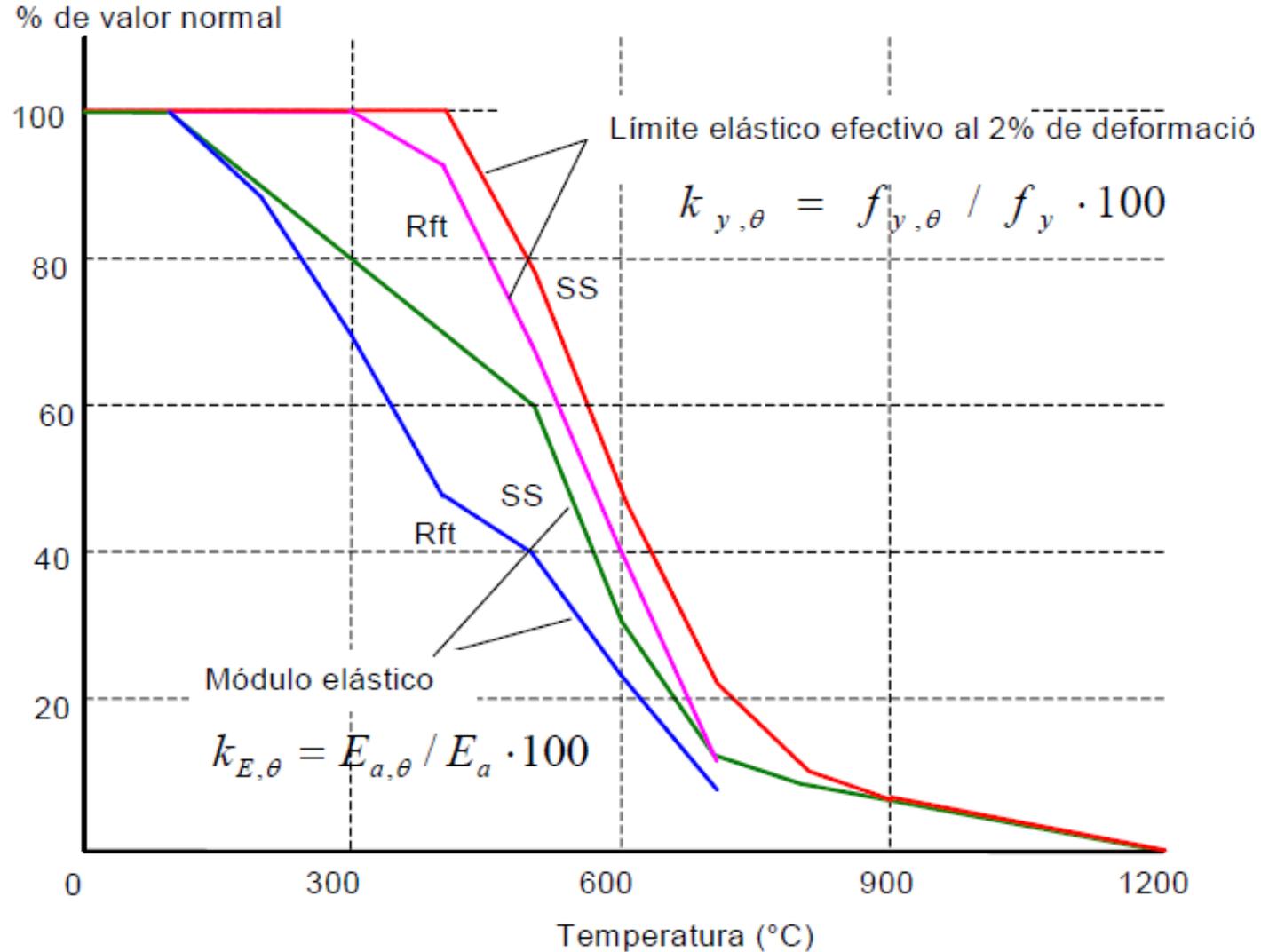
Objetivos Título J NSR-10

- (a) Reducir en todo lo posible el riesgo de incendios en edificaciones.
- (b) Evitar la propagación del fuego tanto dentro de las edificaciones como hacia estructuras aledañas.
- (c) Facilitar las tareas de evacuación de los ocupantes de las edificaciones en caso de incendio.
- (d) Facilitar el proceso de extinción de incendios en las edificaciones.
- (e) Minimizar el riesgo de colapso de la estructura durante las labores de evacuación y extinción.





EL ACERO A ALTA TEMPERATURA





DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA REQUERIDA AL FUEGO SEGÚN NSR-10 . TITULO J-K

• Procedimiento

1. Clasificación de la edificación por grupo de ocupación. Capitulo K2.
2. Clasificación de la edificación por categoría de riesgo, según uso, ocupación, área o carga de combustible y número de pisos. J.3.3.1
3. Determinación de la resistencia requerida para los elementos de la edificación. J.3.4.3.

Tabla K.2.1-1
Grupos y subgrupos de ocupación

Grupos y Subgrupos de ocupación	Clasificación	Sección
A	ALMACENAMIENTO	K.2.2
A-1	Riesgo moderado	
A-2	Riesgo bajo	
C	COMERCIAL	K.2.3
C-1	Servicios	
C-2	Bienes	
E	ESPECIALES	K.2.4
F	FABRIL E INDUSTRIAL	K.2.5
F-1	Riesgo moderado	
F-2	Riesgo bajo	
I	INSTITUCIONAL	K.2.6
I-1	Reclusión	
I-2	Salud o incapacidad	
I-3	Educación	
I-4	Seguridad pública	
I-5	Servicio público	
L	LUGARES DE REUNIÓN	K.2.7
L-1	Deportivos	
L-2	Culturales y teatros	
L-3	Sociales y recreativos	
L-4	Religiosos	
L-5	De transporte	
M	MIXTO Y OTROS	K.2.8
P	ALTA PELIGROSIDAD	K.2.9
		K.2.10
		K.2.11

Tabla J.3.3-2

Categorización de las edificaciones para efectos de resistencia contra el fuego de acuerdo con su uso, densidad de carga combustible y el número de pisos

Grupos de ocupación de las edificaciones	Potencial combustible C_c (MJ / m ²)	Requieren protección				
		Número de pisos				
		1	2	3	4	≥ 5
(A-1), (A-2)	$C_c > 8\ 000$	II	II	I	I	I
	$4\ 000 < C_c < 8\ 000$	III	II	II	I	I
	$C_c < 4\ 000$	III	III	III	II	I
(F-1), (F-2)	$C_c > 8\ 000$	I	I	I	I	I
	$4\ 000 < C_c < 8\ 000$	II	II	I	I	I
	$2\ 000 < C_c < 4\ 000$	III	II	II	I	I
	$C_c < 2\ 000$	III	III	II	II	I
(P)	$C_c > 8\ 000$	I	I	I	I	I
	$4\ 000 < C_c < 8\ 000$	II	I	I	I	I
	$C_c < 4\ 000$	III	II	II	I	I

Tabla J.3.4-3

Resistencia requerida al fuego normalizado NTC 1480 (ISO 834), en horas, de elementos de una edificación.

Elementos de la construcción	Categoría según la clasificación dada en J.3.3.1		
	I	II	III
Muros Cortafuego	3	2 ½	2
Muros de cerramiento de escaleras, ascensores, buitrones, ductos para basuras y corredores de evacuación	2	2	1 ½
Muros divisorios entre unidades	2	1 ½	1
Muros interiores no portantes	½	¼	-
Columnas, vigas, viguetas, losas, y muros portantes de cualquier material, y estructuras metálicas en celosía	2	1 ½	1
Cubiertas	1	1	½
Escaleras interiores no encerradas con muros	2	1 ½	1



NO REQUIEREN PROTECCIÓN

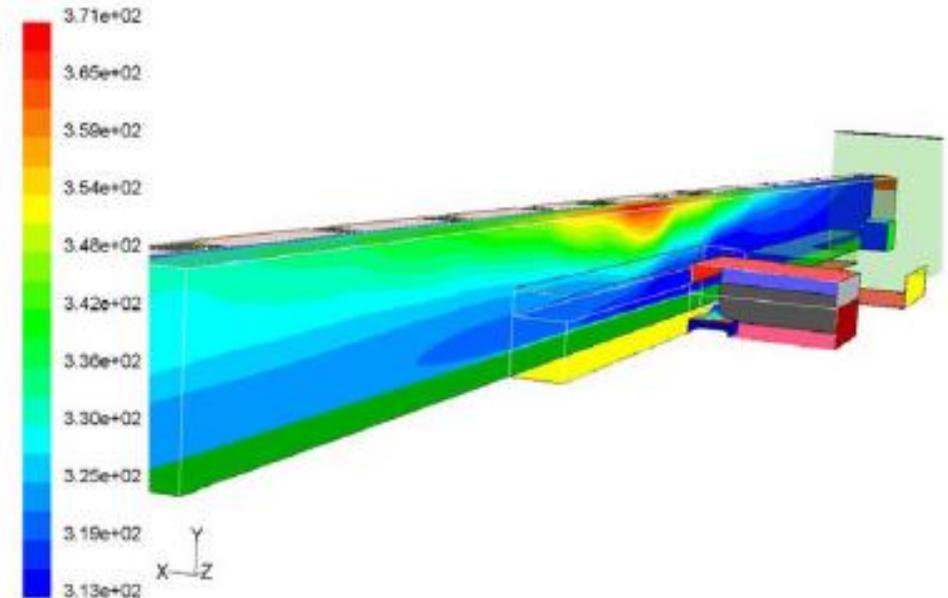
- Edificaciones clasificadas en el grupo de ocupación C (Comercial), que no tengan más de dos (2) pisos y cuya área construida no exceda 500 m² por piso.
- Edificaciones clasificadas en el grupo de ocupación F (Fabril e industrial), que no contengan materiales explosivos o inflamables, que no tengan más de dos (2) pisos y cuya área construida no exceda 1.000 m² por piso.
- Edificaciones clasificadas en el grupo de ocupación F (Fabril e industrial), que tengan un solo piso y con espacios vacíos de más de 10 metros a todo su alrededor.
- Las estructuras de cubierta de material incombustible que estén a una altura sobre el piso de 7,5 m o más.
- Los recintos de edificios con aberturas en por lo menos dos de sus muros, que representen más del 50% del área total de dichos muros no requieren protección especial contra el fuego.



EVALUACIÓN ENFOQUE PRESTACIONAL

La evaluación estructural frente a la acción del fuego está gobernada por dos análisis

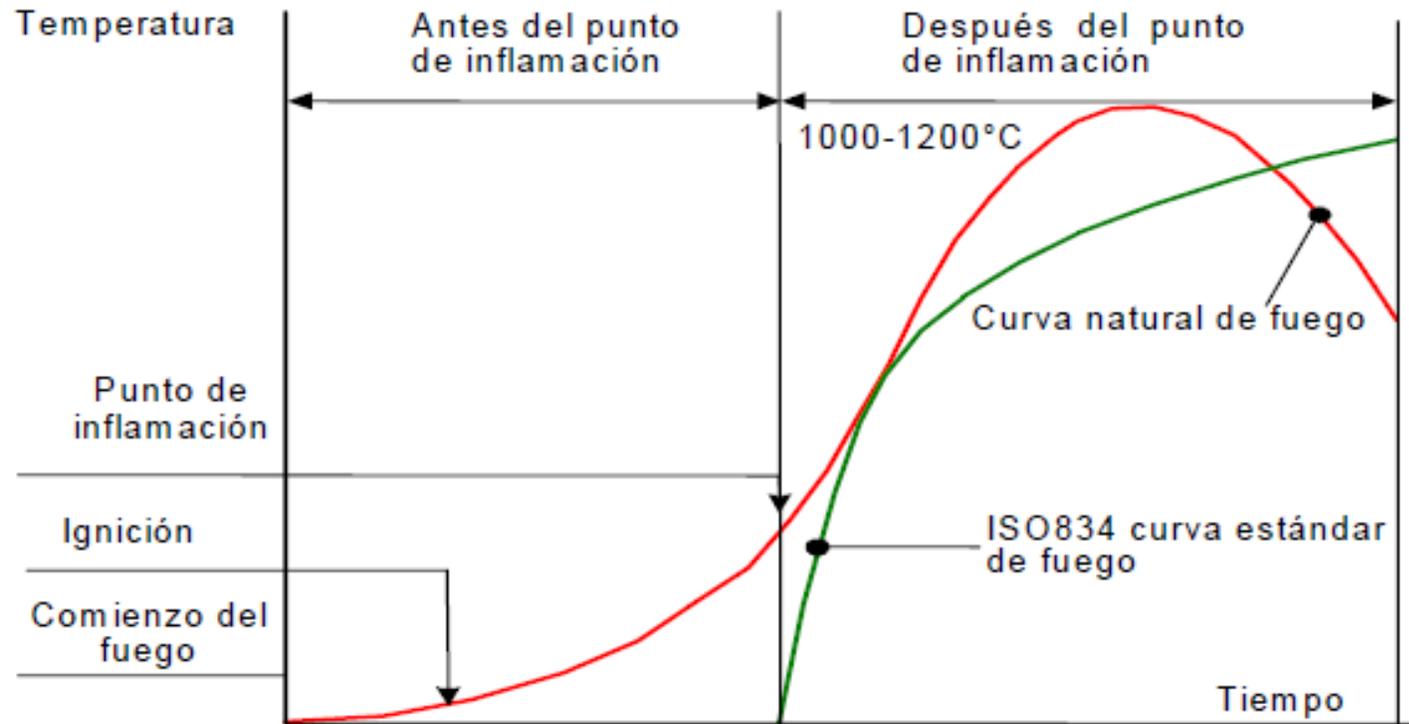
- Análisis térmico
 - Modelación del incendio. Desarrollo y predecir las acciones térmicas (temperatura del gas, flujo de calor)
 - Transferencia de calor
- Estructural. (Acciones térmicas y mecánicas)





INCENDIO DE DISEÑO

Es el aspecto mas importante de la estrategia de seguridad ante incendio

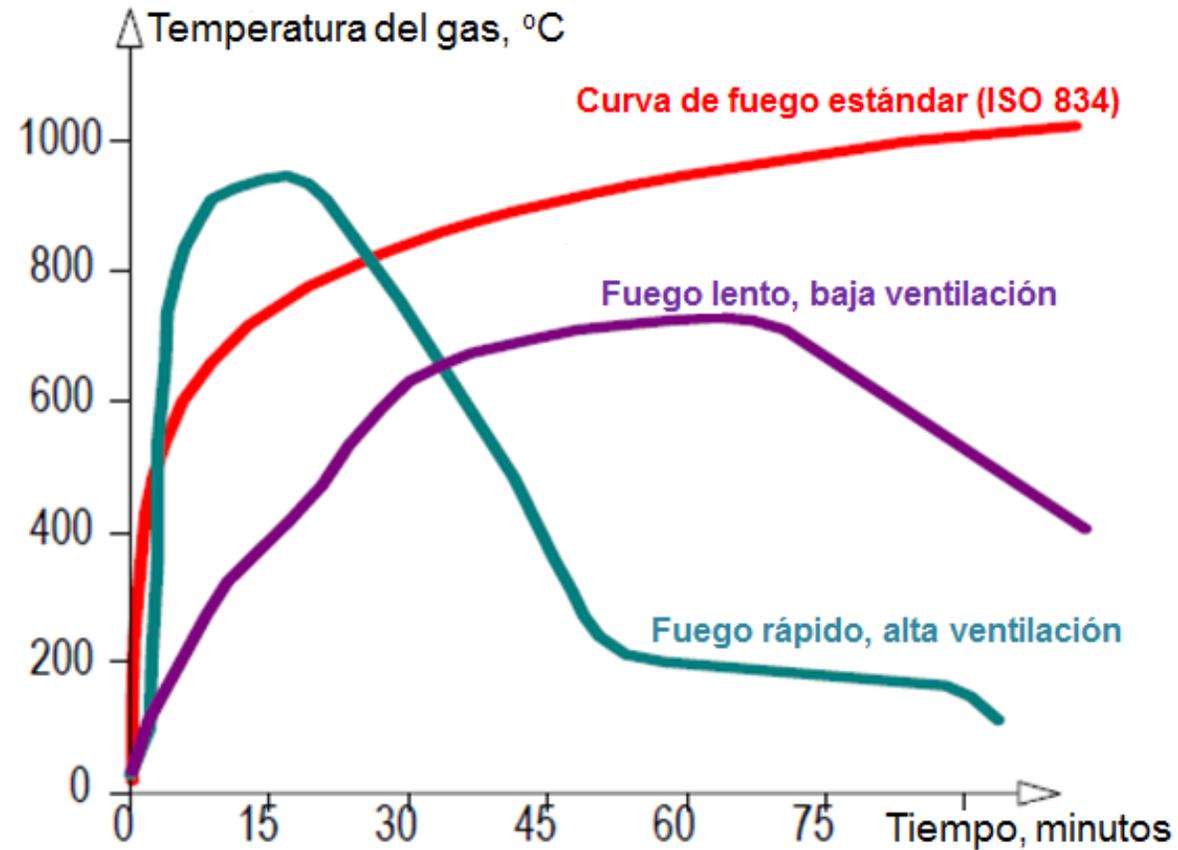


Palabras clave:	Ignición	Fuego latente	Calentamiento	Enfriamiento
Control:	Inflamabilidad	Temp./ desarrollo del humo	Carga de fuego densidad	Ventilación

Fuego normalizado (ISO 834) Vs fuego natural



INCENDIO DE DISEÑO





INCENDIO NATURAL DE DISEÑO

F.2.18.2 — DISEÑO ESTRUCTURAL PARA CONDICIONES DE INCENDIO POR METODOS ANALITICOS — Se permite diseñar los miembros, componentes y estructuras de edificios en general para temperaturas elevadas de acuerdo con los requisitos de esta sección.

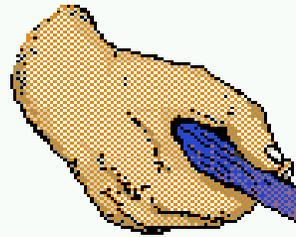
F.2.18.2.1 — *Incendio de diseño* — Se debe definir un incendio de diseño que represente las condiciones de calentamiento para la estructura. Estas condiciones de calentamiento deberán derivarse de los materiales combustibles y de las características del recinto donde se presenta el incendio supuesto. La carga de fuego debe estar basada en el uso definido en el título J de este Reglamento. Las condiciones de calentamiento se especificarán ya sea en términos de un flujo de calor o de temperatura en la capa superior de gas generada por el incendio. Deberá determinarse la variación de las condiciones de calentamiento con el tiempo a lo largo del incendio.

F.2.18.2.1.2 — *Incendios posteriores a la ignición* — Cuando la velocidad de transferencia de calor de un incendio es suficiente para causar la ignición, se debe suponer un incendio posterior a la ignición en el recinto considerado. La determinación de la curva temperatura-tiempo del incendio debe incluir la carga de fuego, las características de ventilación naturales o mecánicas en el espacio, las dimensiones del recinto y las características térmicas de los límites del recinto.

F.2.18.2.1.1 — *Incendio concentrado* — Cuando la velocidad de transferencia de calor de un incendio es insuficiente para causar la ignición, se debe suponer una exposición a un incendio concentrado. En tales casos, se deben utilizar la composición del combustible, la distribución del mismo, y el área de piso ocupado, para determinar el flujo de calor irradiado a la estructura a partir de la llama y la columna de humo generada.



TRANSMISIÓN DEL CALOR

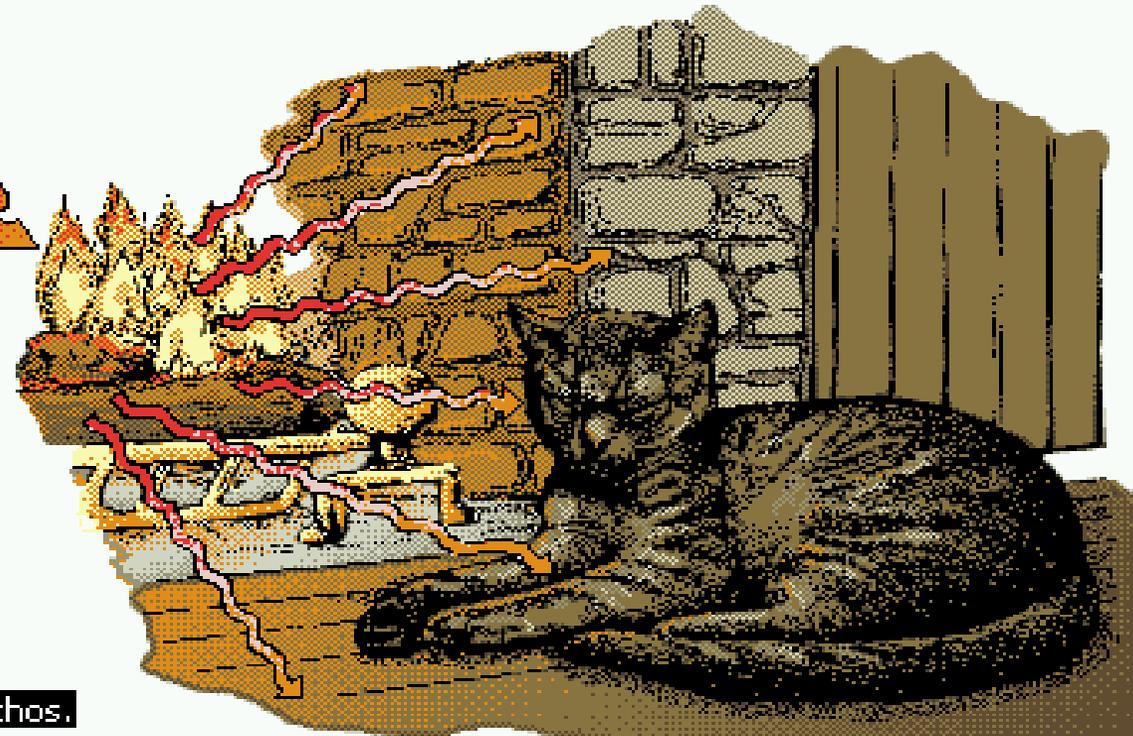


Conducción: el calor se desplaza desde el extremo caliente del atizador hacia el extremo frío.

Convección: el agua calentada por la placa asciende mientras el agua más fría desciende.



Radiación: el calor atraviesa el espacio en forma de rayos infrarrojos.





CALOR ESPECÍFICO

(c) es la cantidad de calor que hay que suministrar a la unidad de masa de una sustancia o sistema termodinámico para elevar su temperatura en una unidad (kelvin o grado Celsius). (J/kg/°k)

Indica la mayor o menor dificultad que presenta dicho cuerpo para experimentar cambios de temperatura bajo el suministro de calor.

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T}$$

Material	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/kg/°K)
Acero	7.850	600
Hormigón	2.300	1.000
Hormigón ligero	1.660-2.000	840
Proyectado		
Fibras minerales	300	1.200
Mortero de vermiculita	350	1.200
Proyectado de alta densidad		
Mortero de vermiculita	550	1.100
Vermiculita con cemento	650	1.100
Placas		
Vermiculita/perlita con cemento	800	1.200
Fibrosilicato o silialicálcico	600	1.200
Fibras con mortero	800	1.200
Placas de yeso	800	1.200
Bloques de hormigón	2.200	1.000
Ladrillo hueco	1.000	1.200
Ladrillo macizo	2.000	1.200



CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

La **conductividad térmica** mide la capacidad de conducción de calor. (W/(K·m))

$$\lambda = \frac{q}{|\nabla T|}$$

Coefficientes de conductividad térmica λ altos (metales) indican materiales que propagan fácilmente el calor (tienden a igualar rápidamente la temperatura en todos sus puntos)

Material	Densidad (kg/m ³)	Conductividad térmica (W/m ^o K)
Acero	7.850	45,00
Hormigón	2.300	1,60
Hormigón ligero	1.660-2.000	1,00
Proyectado		
Fibras minerales	300	0,12
Mortero de vermiculita	350	0,12
Proyectado de alta densidad		
Mortero de vermiculita	550	0,12
Vermiculita con cemento	650	0,12
Placas		
Vermiculita/perlita con cemento	800	0,20
Fibrosilicato o silialcálcico	600	0,15
Fibras con mortero	800	0,15
Placas de yeso	800	0,20
Bloques de hormigón	2.200	1,00
Ladrillo hueco	1.000	0,40
Ladrillo macizo	2.000	1,20



ACERO SIN PROTECCIÓN

F.2.18.2.4.3.2.2 — Miembros a compresión — Se permite modelar la respuesta térmica de un elemento a compresión usando una ecuación de transferencia de calor unidimensional, con la entrada de calor correspondiente al incendio de diseño de acuerdo a la sección F.2.18.2.1.

Ecuación diferencial de Fourier

$$\Delta\theta_{at} = \frac{A_m/V}{C_a \cdot \gamma_a} h \cdot \Delta t$$

Diagram illustrating the Fourier equation with labels for its components:

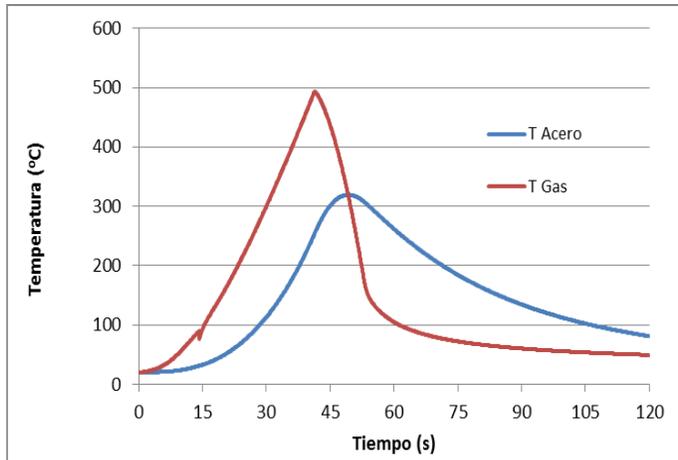
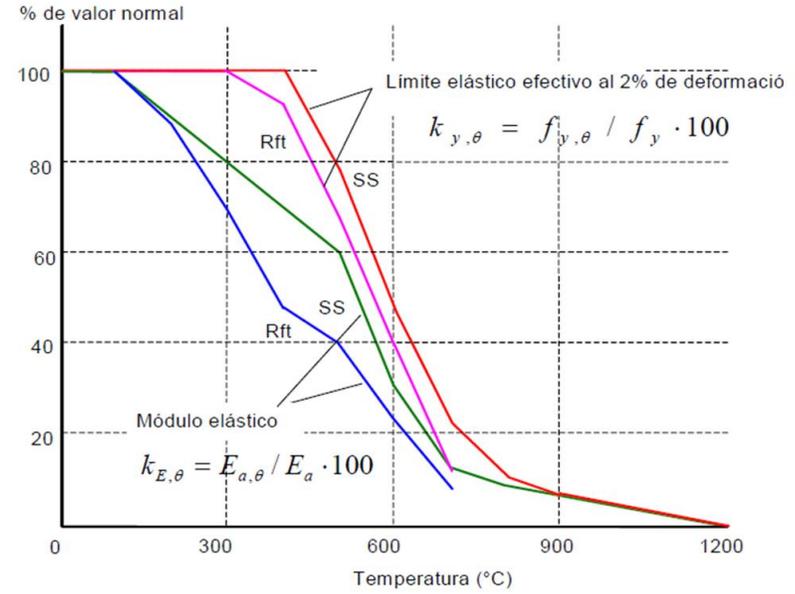
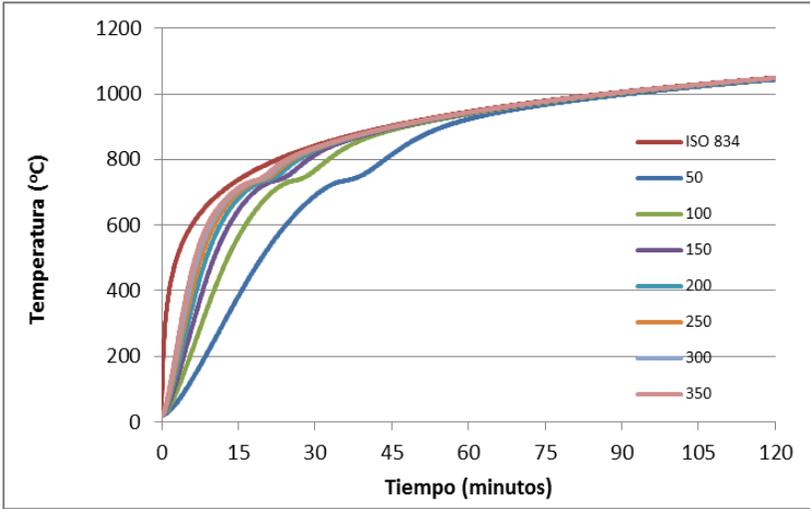
- A_m/V : "masividad"
- C_a : Calor específico
- γ_a : Densidad
- $h \cdot \Delta t$: Flujo de calor

El calentamiento de una pieza sin proteger depende solamente de parámetro geométrico denominado masividad.

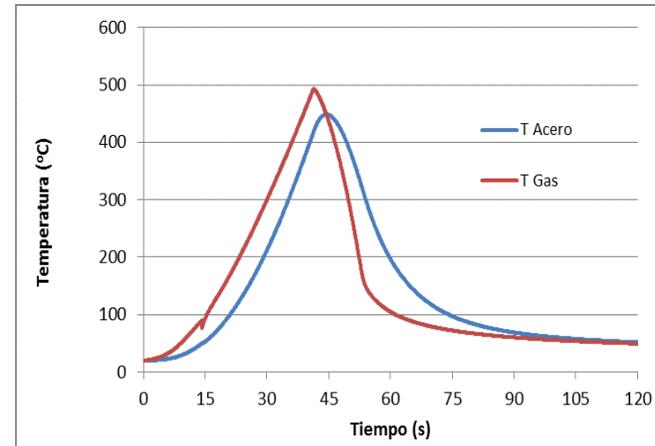
- Las secciones abiertas y delgadas tienen un valor muy desfavorable (muy alto)
- Las huecas o macizas un valor favorable (muy bajo). Perfiles tubulares en cerchas.



ACERO SIN PROTECCIÓN



HEA-600
104 m⁻¹



150x150x4
250 m⁻¹

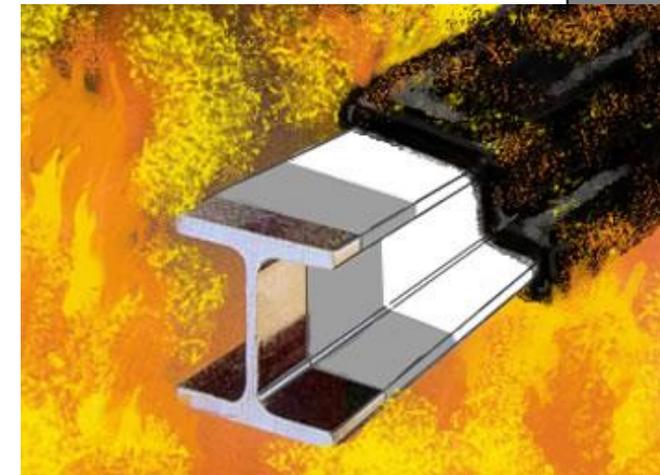
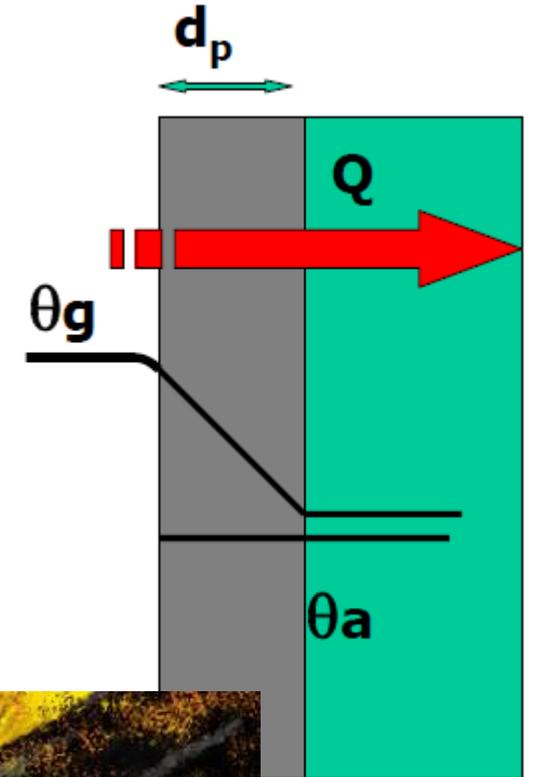


ACERO CON PROTECCIÓN

Sea ahora una sección de acero protegida caracterizada por $A_p, \gamma_p, c_p, \lambda_p$

Como en general la conductividad térmica del material de protección es muy baja se puede asumir que la temperatura de la cara exterior es prácticamente la del gas

$$\Delta\theta_{at} = \frac{\lambda_p A_p / V (\overset{\text{aire}}{\phi_{gt}} - \overset{\text{acero}}{\phi_{at}})}{d_p C_a P_a (1 + \phi/3)} \Delta t - \left(\frac{\phi}{10} - 1 \right) \overset{\text{aire}}{\Delta_{gt}}$$

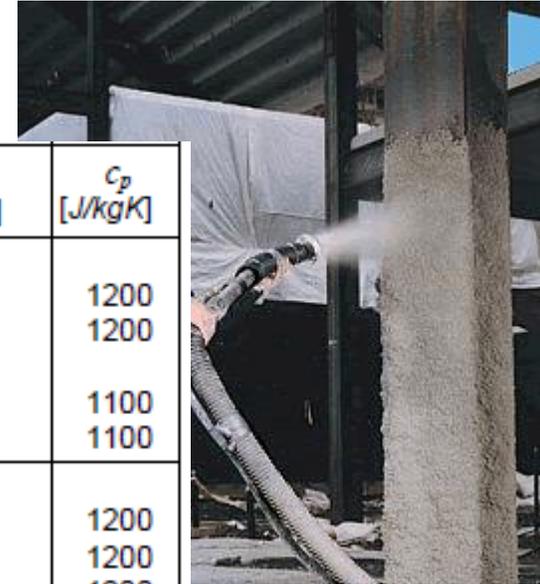




MATERIALES DE PROTECCIÓN

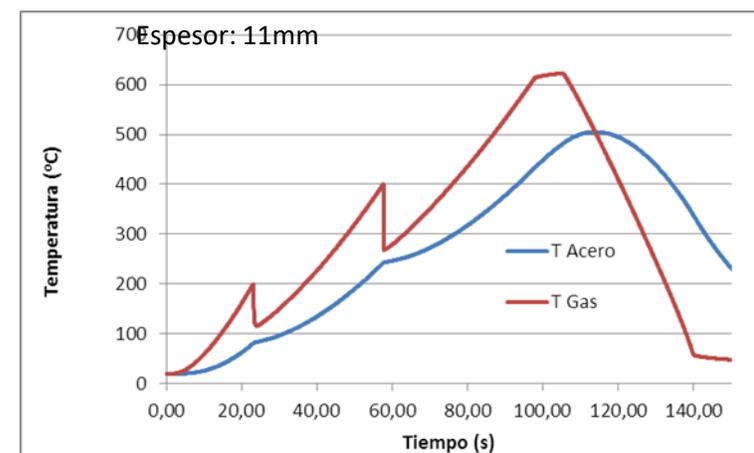
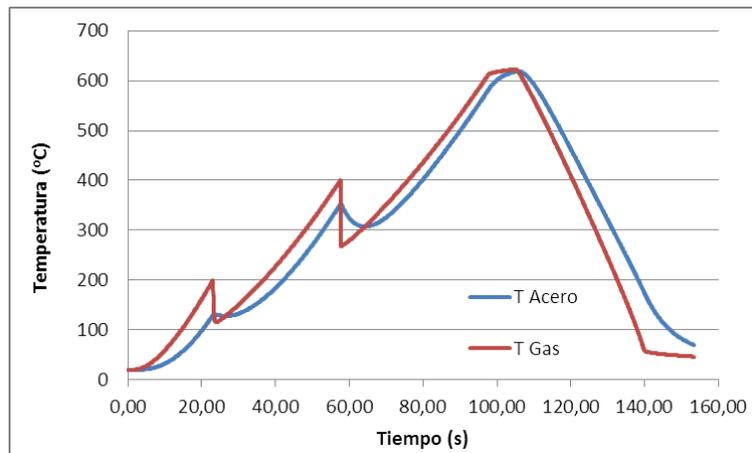
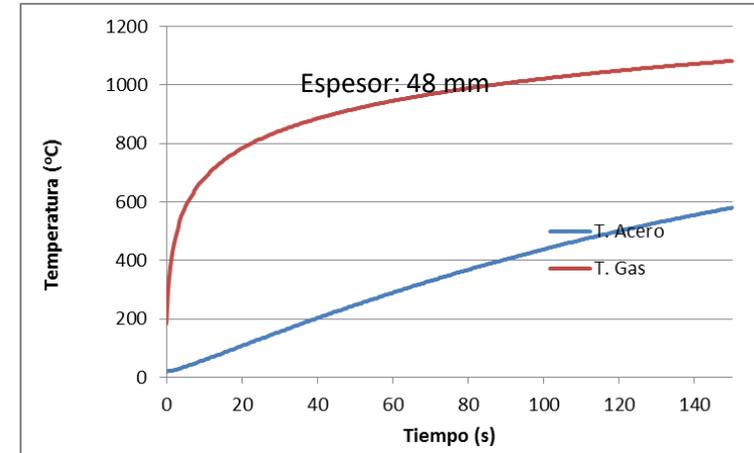
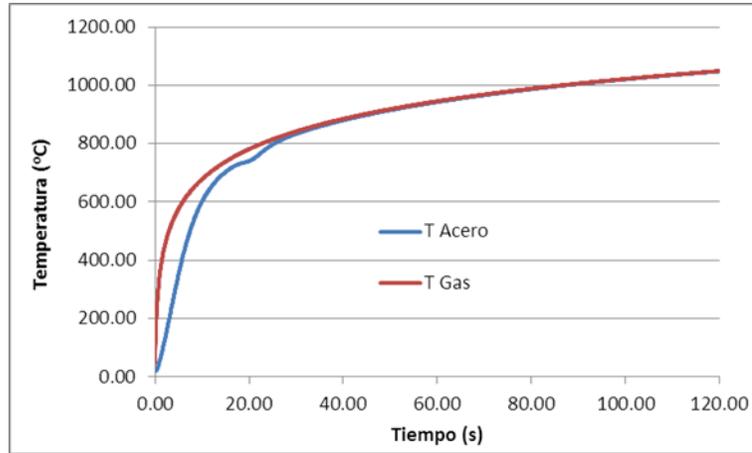


Material de protección	ρ_p [kg/m ³]	λ_p [W/mK]	C_p [J/kgK]
Proyectado, baja densidad:			
- fibras minerales	300	0,12	1200
- cemento y vermiculita o perlita	350	0,12	1200
Proyectado, alta densidad:			
- vermiculita o perlita con cemento	550	0,12	1100
- vermiculita o perlita con yeso	650	0,12	1100
Paneles o placas:			
- vermiculita o perlita con cemento	800	0,20	1200
- fibras de silicato (de calcio)	600	0,15	1200
- fibro-cemento	800	0,15	1200
- yeso	800	0,20	1700
Lana mineral, lana de roca	150	0,20	1200
Pintura intumescente	0	0,005 -0,012	0





ACERO PROTEGIDO





CRITERIO DE RESISTENCIA

$$\phi R_{nf} \geq R_{uf}$$

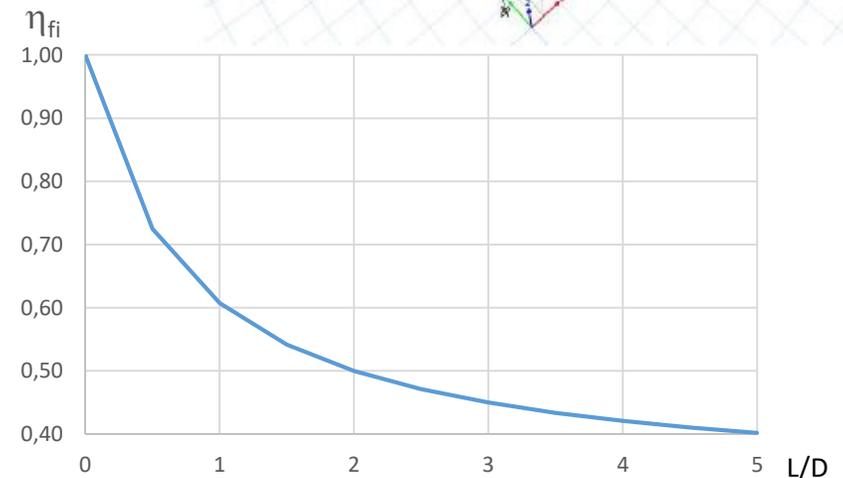
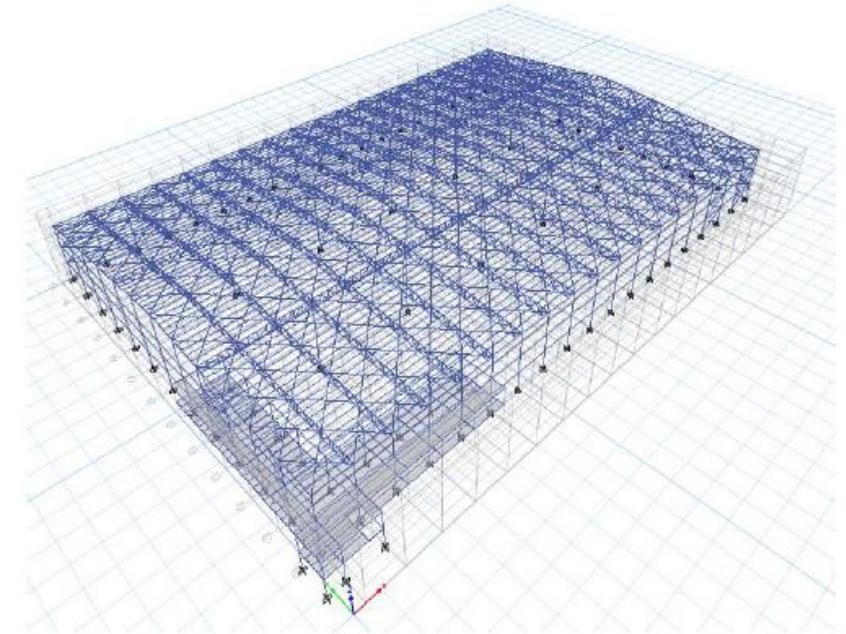
Combinación ELU bajo temperatura ambiente

$$1.2D + 1.2T + 1.6L + 0.5G \quad (\text{B.2.4-2})$$

F.2.18.1.4 — Combinaciones de carga y resistencia requerida — La resistencia requerida de una estructura y sus elementos se determinará a partir de la siguiente combinación de cargas gravitacionales:

$$1.2D + T + 0.5L + 0.2G \quad (\text{F.2.18-1})$$

**Estos eventos son de una baja probabilidad de ocurrencia y por lo general una corta duración.
Accidental**





TEMPERATURA CRÍTICA

Una vez establecidas las cargas en caso de incendio se determina el límite elástico que supondría la igualdad a la capacidad resistente.

Este valor del límite elástico es inferior al nominal (acero a temperatura ordinaria) y determina hasta donde se puede bajar la resistencia o lo que es igual hasta donde puede subir la temperatura del acero. (θ_{cr})

Miembros a tracción: (F.2.18.2.4.3.2.1)

Provisiones sección F.2.4 y propiedades del acero a temperatura elevada

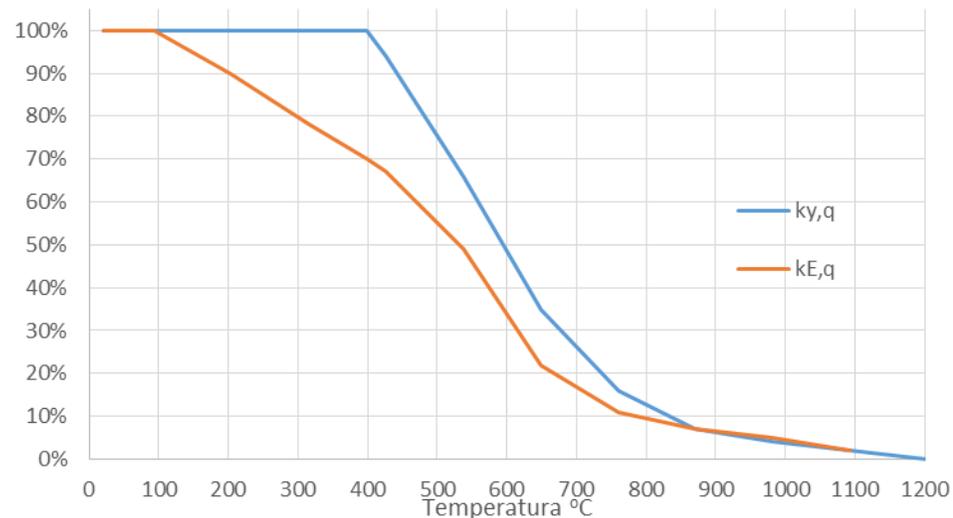
Miembros a compresión: (F.2.18.2.4.3.2.3)

Provisiones sección F.2.5 usando $E_{(T)}$ y $F_{y(T)}$

$$F_{cr(T)} = \left[0.42 \sqrt{F_{y(T)} / F_e(T)} \right] F_{y(T)}$$

Miembros a flexión: (F.2.18.2.4.3.2.2)

Provisiones sección F.2.6 y propiedades del acero a temperatura elevada





CONFIGURACIÓN

Configuración de la nave

- Edificio aislado



- Edificios adosados de distintos propietarios que forman una nave

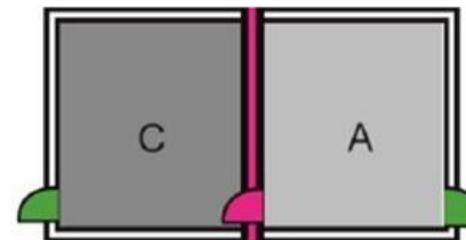
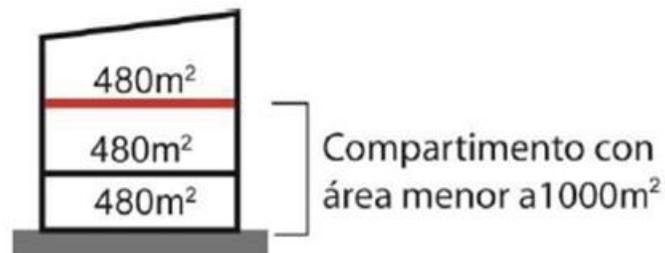
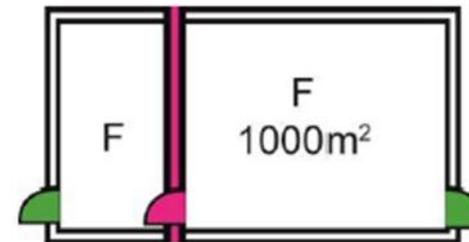
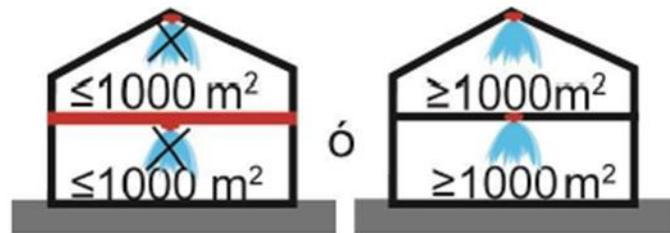




COMPARTIMENTACIÓN

Se debe definir en las primeras fases la sectorización y el esquema resistente teniendo en cuenta la defensa pasiva

- Sistema de arriostrado que se mantenga en condiciones durante el incendio
- Secciones compactas tienen coeficientes de masividad bajos
- Columnas y vigas con margen de seguridad ante acciones gravitacionales tienen ventajas al analizar en caso de incendio



ESCENARIOS TÍPICOS

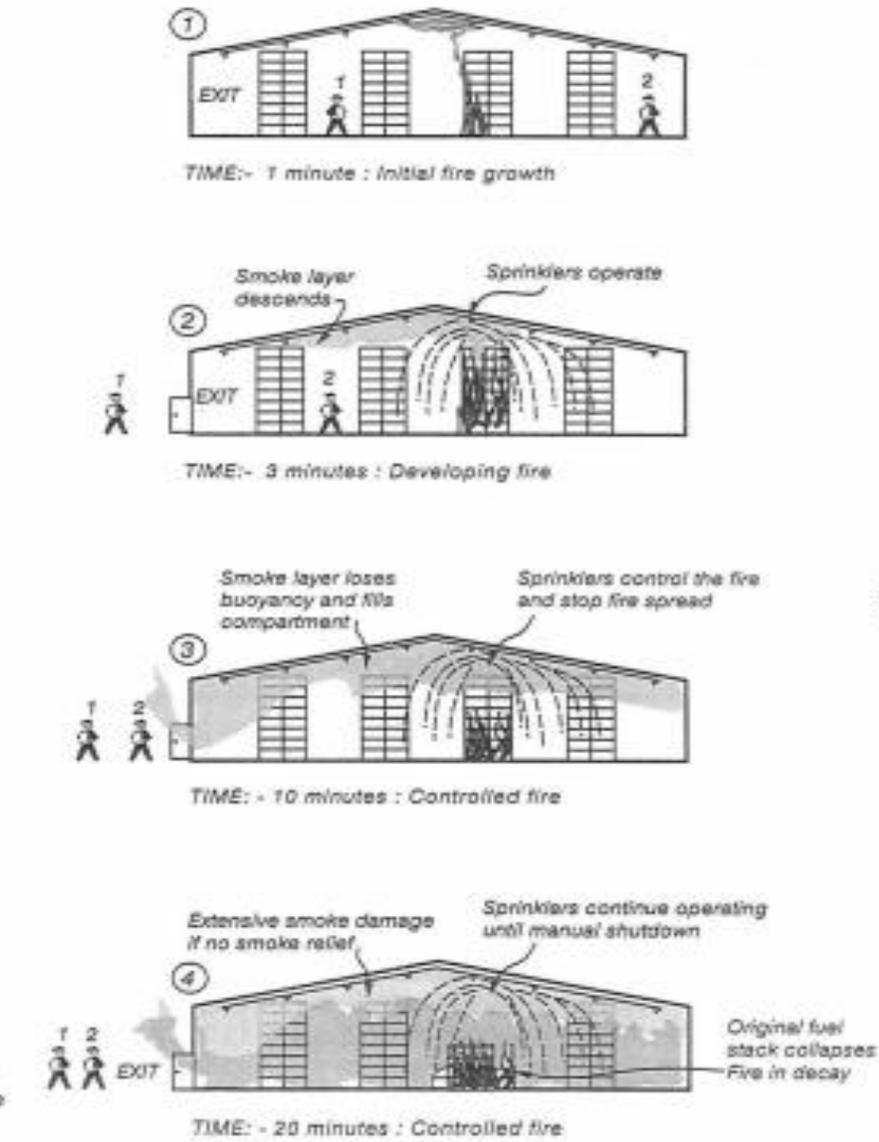
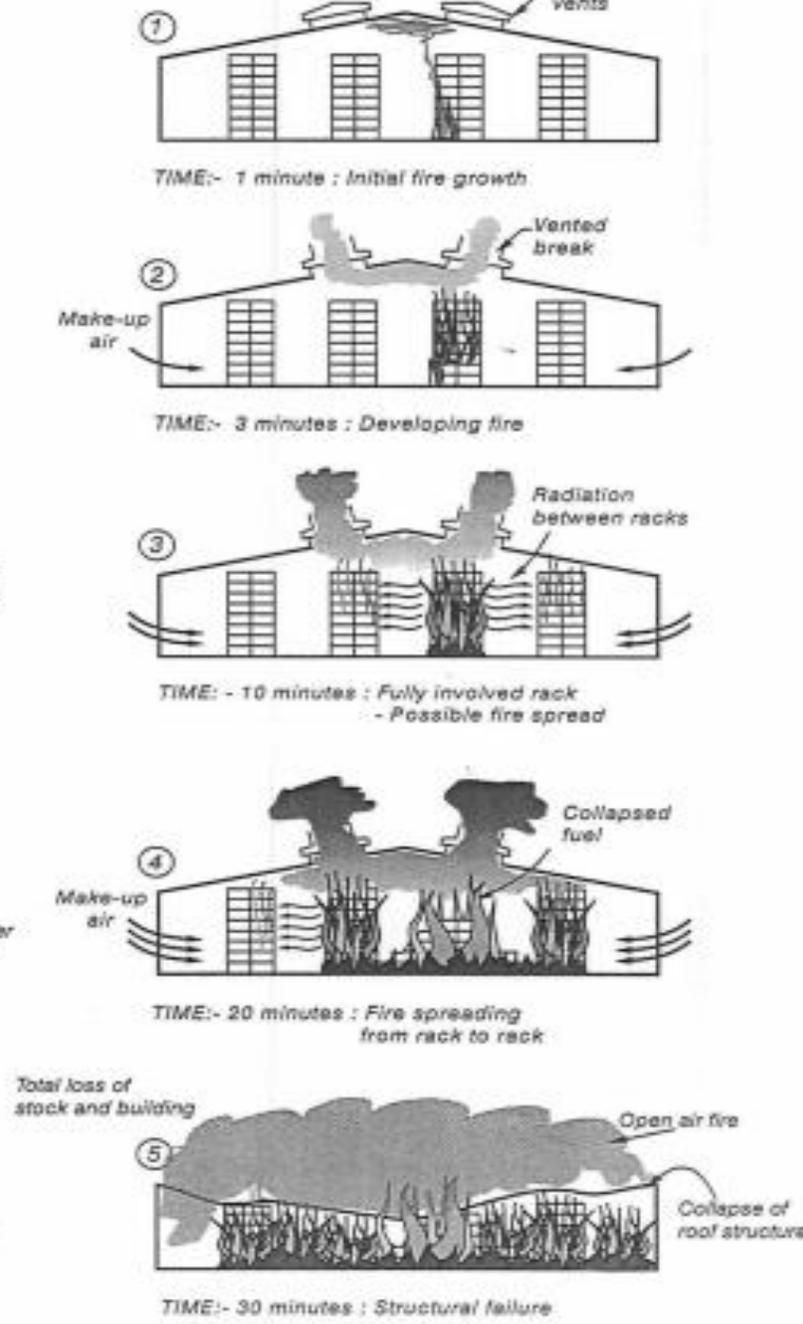
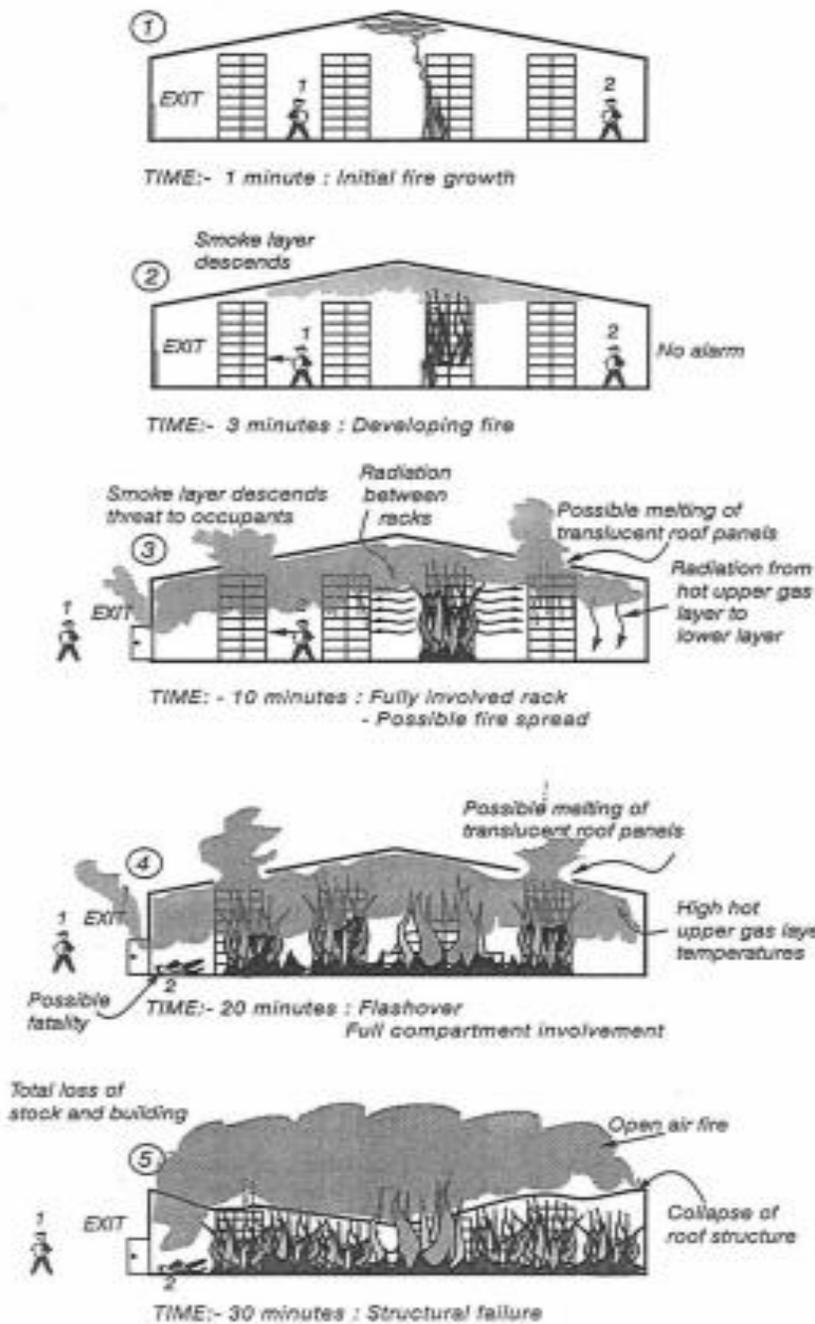


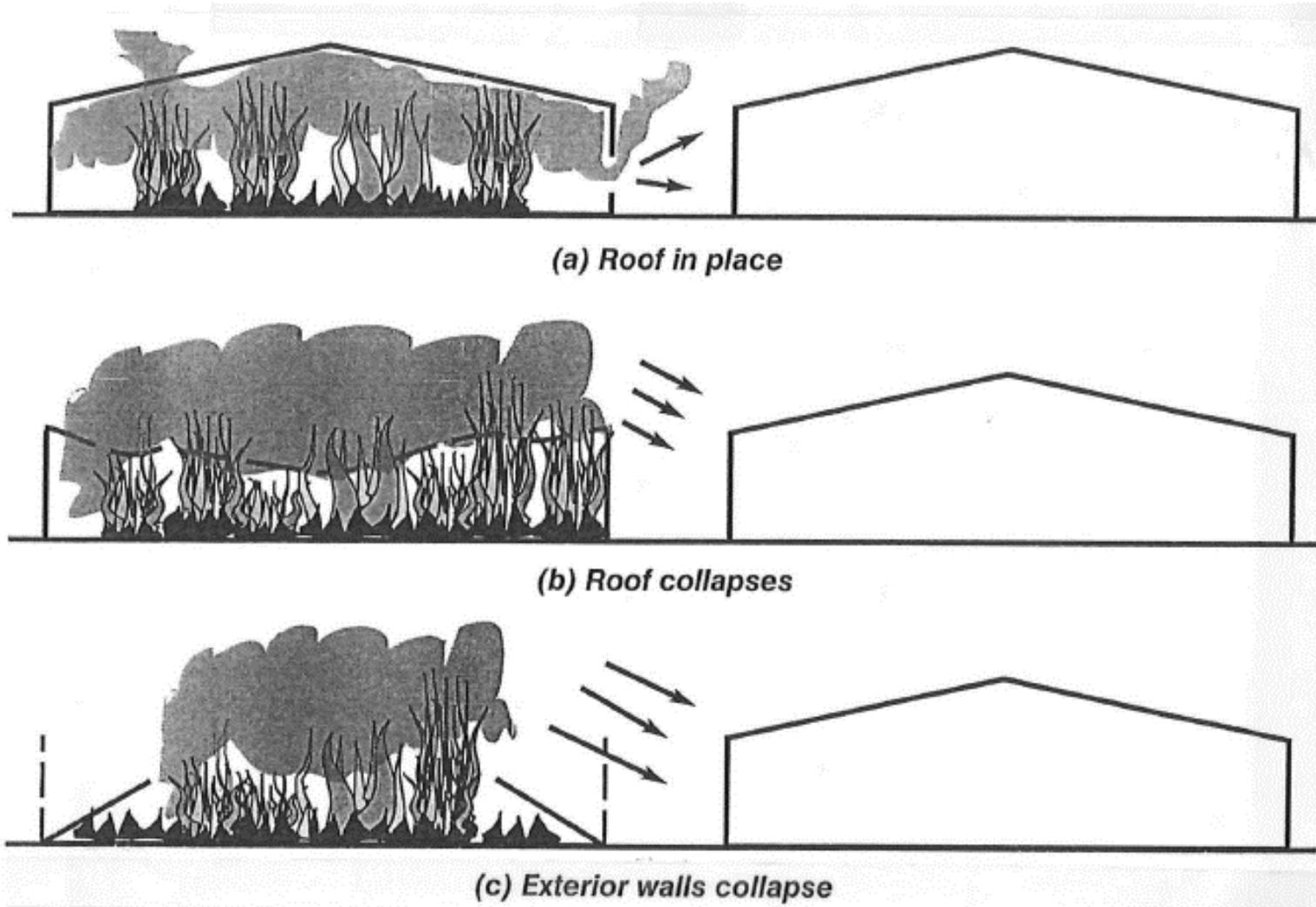
Figure 5.2 Fire development with no protection system

Figure 5.3 Fire development with automatic roof vents

Figure 5.4 Fire development with sprinkler system



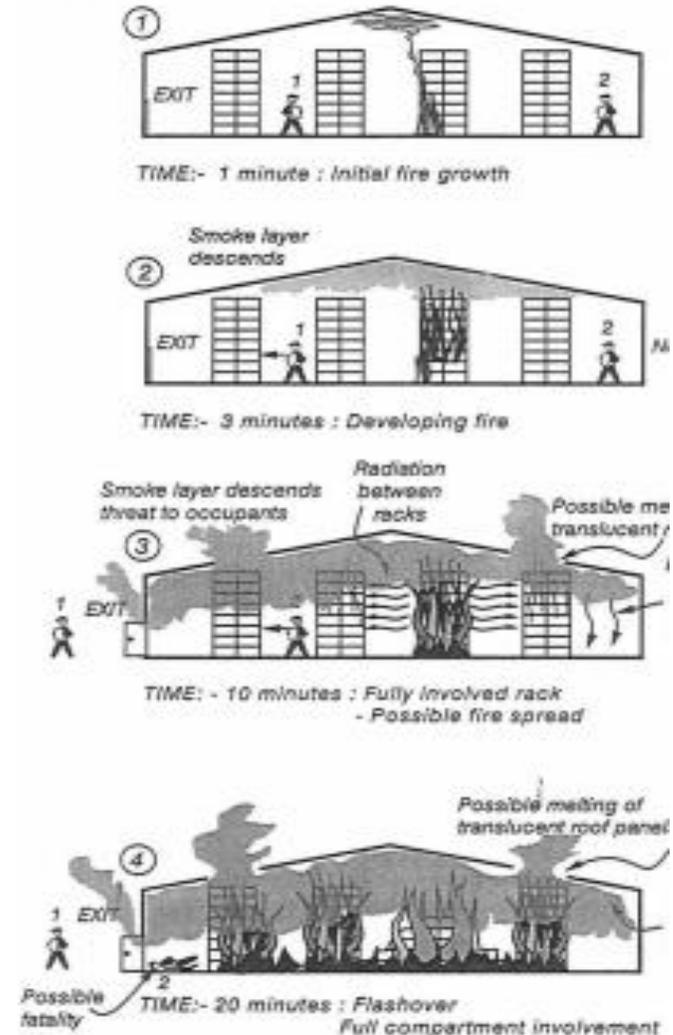
EDIFICIOS VECINOS





VENTILACIÓN

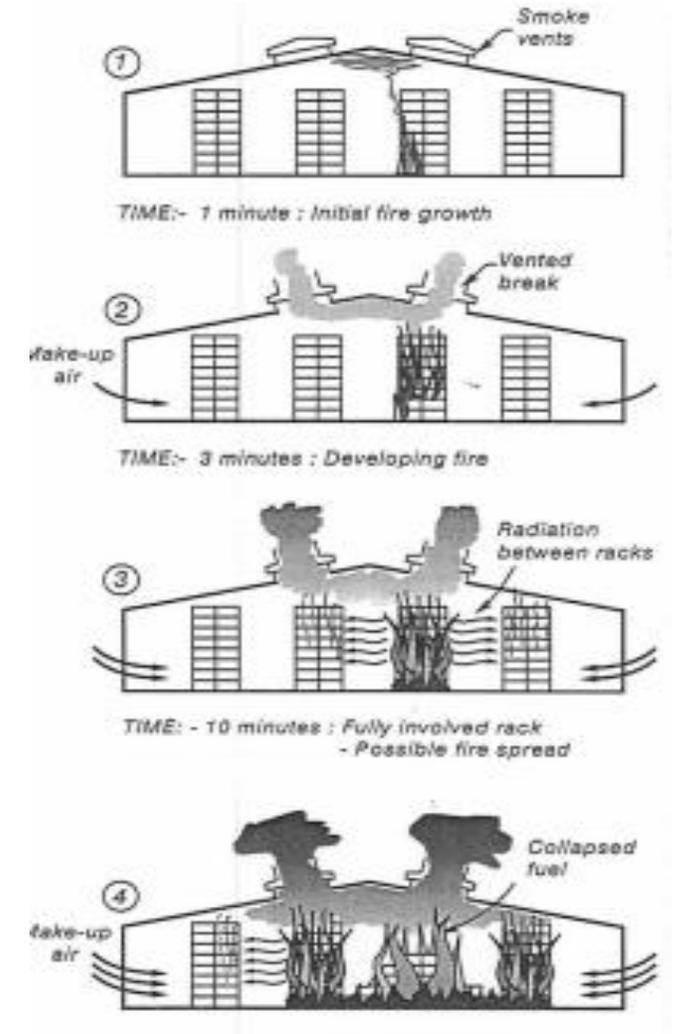
- Retrasa el flashover
- Permite liberación de calor convectivo
- Proporciona medios de escape
- Permite a bomberos acceder a la base del fuego
- Reduce pérdida de contenido por humo y gases
- Disminuye el riesgo de colapso de la cubierta
- Disminuye el riesgo de explosión
- Disminuye el número de rociadores que se activan
- Permite la evacuación de humo después del control





VENTILACIÓN- CRITERIOS DE DISEÑO

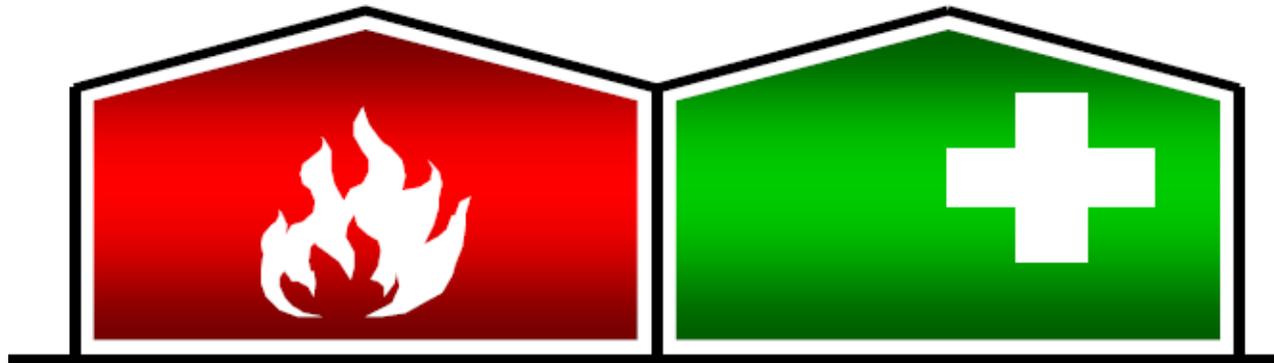
- Liberar humo a la misma tasa que se produce
- Mantener el humo a 2,5 m mínimo del piso
- Mantener el humo a 0,5 m mínimo de los racks
- Verificar fuerza de tiro
- Verificar ventilación máxima
- Natural o mecánica
- Cubierta traslúcida (alta temperatura)
- Se recomienda un espaciamiento máximo de 20m
- Estudiar el uso de cortinas de humo





EL COLAPSO

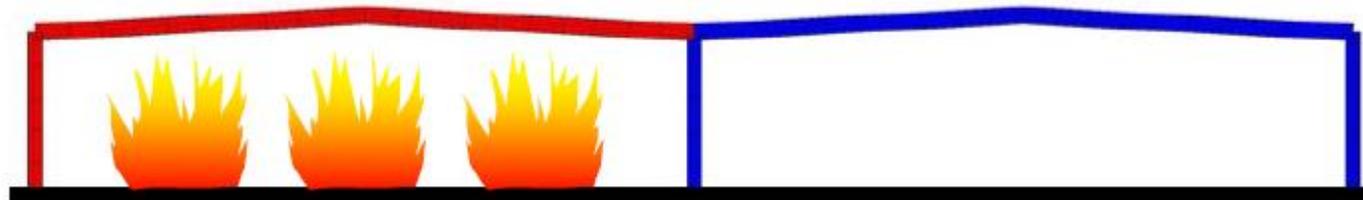
- En caso de incendio en uno de los compartimientos de un edificio este no debe colapsar hacia el exterior.
- En caso de incendio en un compartimiento de un edificio la falla localizada de este no debe llevar al colapso de compartimientos adyacentes.



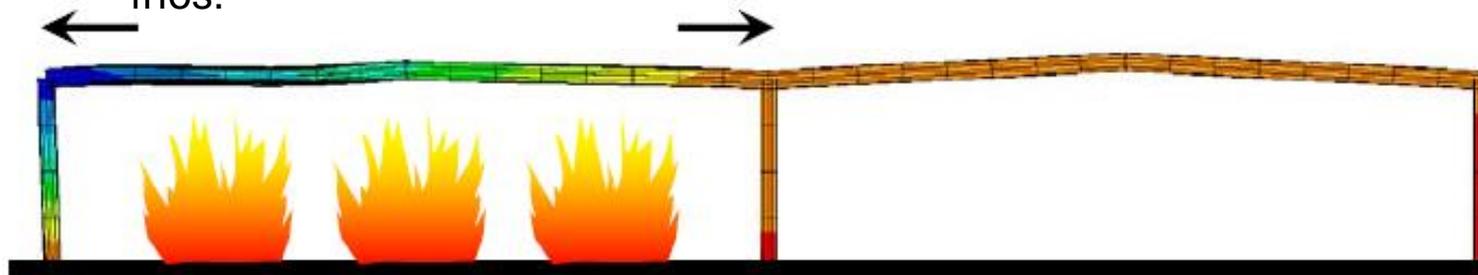


COMPORTAMIENTO

- Etapa 1. Calentamiento
 - Dilatación térmica de los miembros calentados



- Desplazamientos laterales en la zona de cubierta hacia el exterior de la nave
- Incremento de fuerza axial en las vigas debido a la restricción de los elementos fríos.



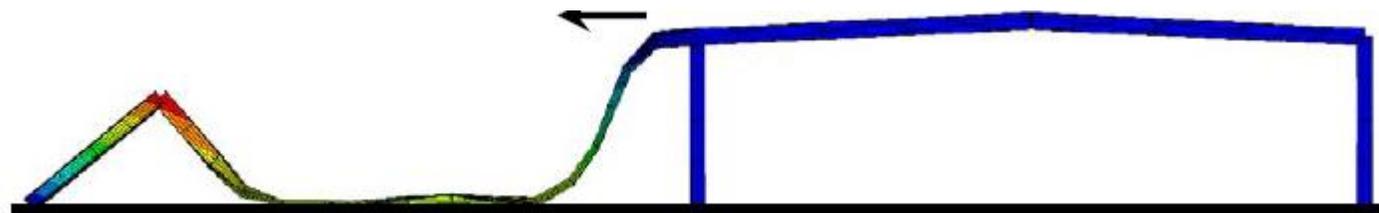


COMPORTAMIENTO

- Etapa 2. Colapso de la parte calentada
 - Las vigas actúan como un cable tomando esfuerzos de tracción
 - El desplazamiento y las tracción en la parte alta de las columnas de compartimiento no calentado alcance su máximo valor y luego decrecen lentamente debido al colapso de la parte calentada



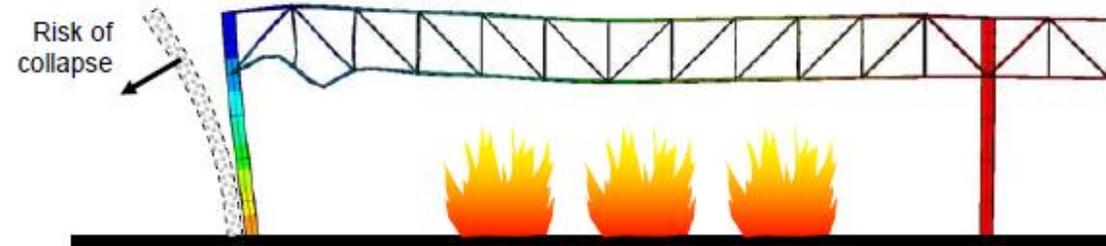
- Si la rigidez de la parte fría es lo suficientemente alta el compartimiento bajo incendio colapsa hacia el interior.
- Si la resistencia de la parte fría es lo suficientemente alta esta zona permanece en pie, sin colapsar.



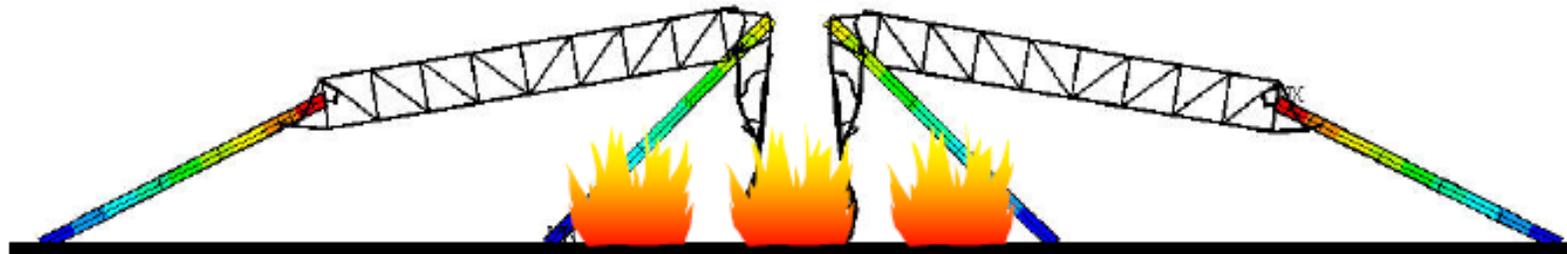


MODOS DE FALLO A EVITAR

- Hacia afuera, incluyendo fachadas y muros cortafuego



- Colapso de estructuras adyacentes. Colapso progresivo





RECOMENDACIONES

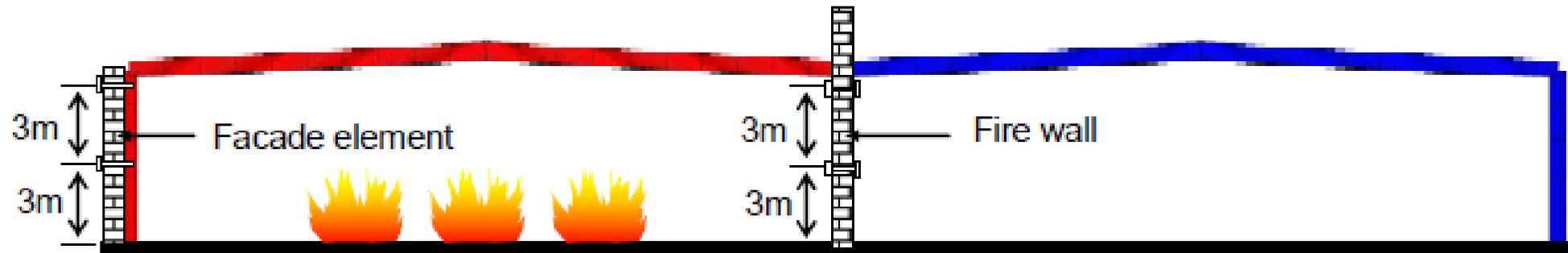
- Se deben establecer los requisitos de protección al inicio del diseño.
- En naves de almacenamiento donde pueden variar el tipo de mercancías se debe ser conservador y prevenir un riesgo alto.
- En naves con puente grúa o altas cargas esta precaución no suele implicar grandes costos.
- Naves alejadas de otras en mas de 10 m no se requiere protección al fuego.
- Disponer columnas más resistentes que las vigas.
- El disponer las columnas fuera de la fachada es una posición ventajosa en el diseño ante incendio al quedar protegidas contra el fuego por un cerramiento adecuado.





RECOMENDACIONES

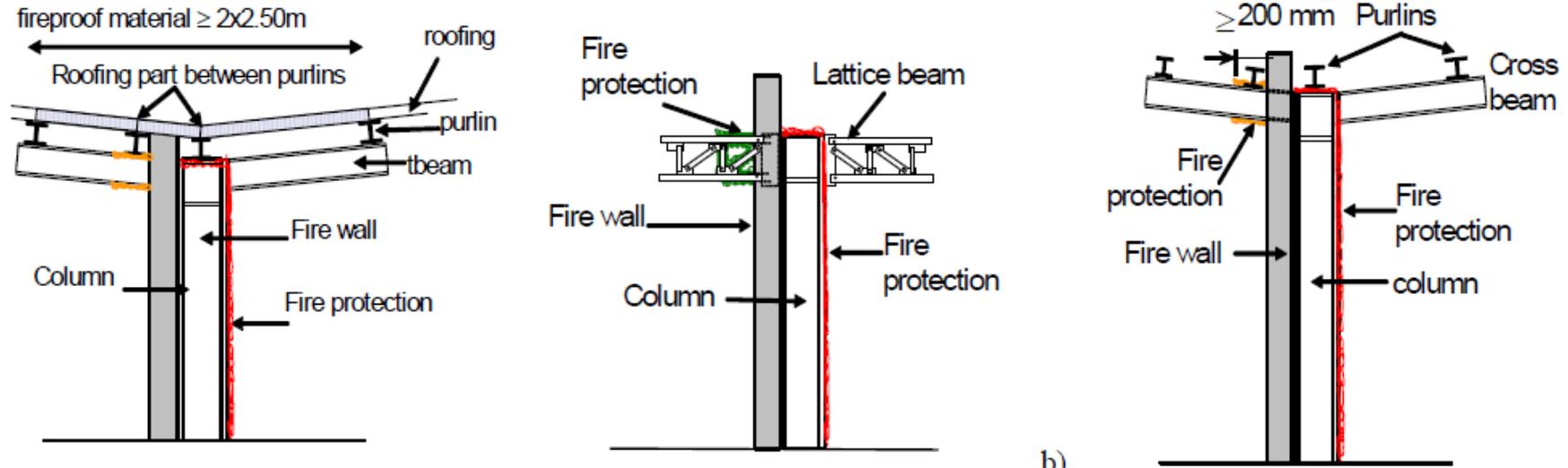
Muros cortafuego y fachadas



- Deben sujetarse de las columnas
- Los elementos que puedan dañar los muros deben tener la misma estabilidad al fuego
- Conservadoramente se pueden suponer expuestos al fuego por 1h y que no superen los 500°C



RECOMENDACIONES



- Cubiertas independientes entre compartimientos
- Correas a ambos lados del muro cortafuego
- Cubierta protegida ante fuego a 2,5m a cada lado del muro
- Levantar el muro sobre la cubierta
- Cubierta protegida ante fuego a 2,5m a cada lado del muro
- Las correas nunca deben cruzar los muros o deben protegerse
- En celosía proteger mínimo la distancia al primer elemento vertical



RECOMENDACIONES

En vigas y columnas con posibilidades de inestabilidad la determinación de la temperatura crítica es iterativa al depender del límite elástico y el módulo de elasticidad.

Las correas de cubiertas ligeras que contribuyan a la estabilidad de los pórticos o las que sirvan de apoyo a una protección de sectores requieren protección al fuego.

Es recomendable al igual que en diseño sísmico, diseñar las columnas con una margen mayor que las vigas de manera que la falla sobrevenga por la plastificación de las vigas antes que por el pandeo a flexocompresión de las columnas. Falla dúctil.

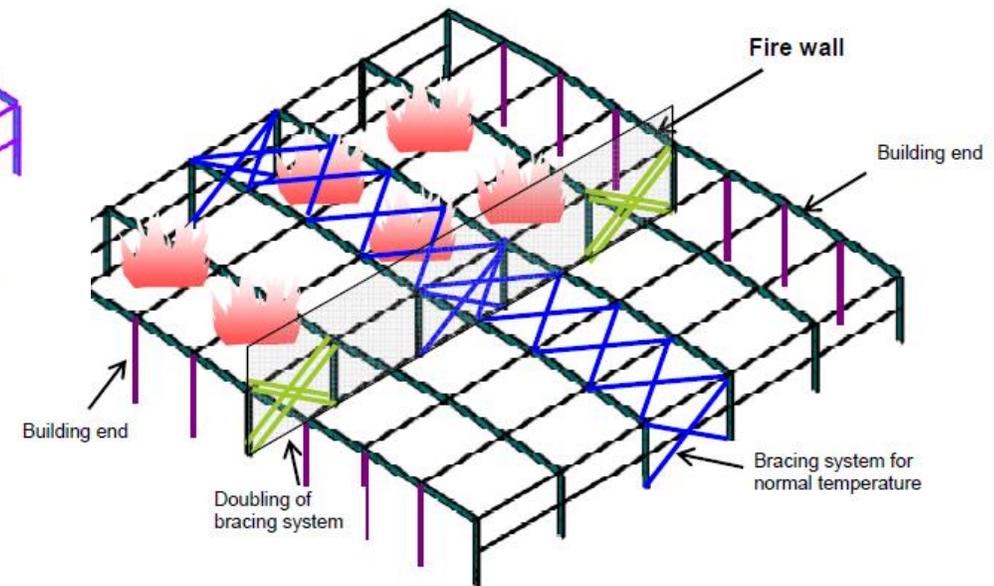
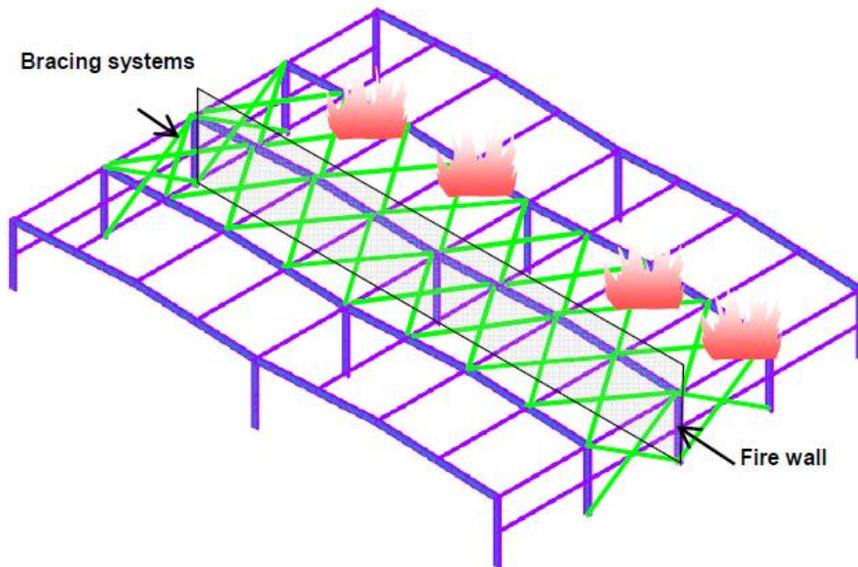




RECOMENDACIONES

Arriostrados

- Cada compartimiento debe tener su propio sistema de arriostado
 - Utilizar un sistema de arriostado vertical adicional a cada lado del muro cortafuego
 - Doblar el sistema de arriostado





CONCLUSIONES

- Evitar el uso de perfiles en lámina con espesores menores a 3,0 mm para elementos estructurales. Se excluyen elementos de cubiertas ligeras
- Procurar dar un margen de protección mayor a las columnas
- El enfoque prestacional (diseño) permite en la mayoría de los casos determinar espesores de protección optimizados
- La pintura intumescente no es el único método de protección.
- Se deben revisar las consideraciones de edificios exentos de protección
- La temperatura crítica no es, por regla general 500°C



GRACIAS

