



DIPLOMA DE POSTÍTULO

**DISEÑO CONTRA INCENDIOS**

**NOMBRE DEL CURSO**

**Acero Estructural  
Análisis a temperaturas elevadas**

*Nombre Profesor: Marcial Salaverry R.*

*Contacto: [marcial.salaverry@e3ingenieria.cl](mailto:marcial.salaverry@e3ingenieria.cl)*



## Agenda

- **Introducción:** *Importancia de la protección estructural.*  
*Componentes de la ingeniería estructural contra incendios.*
- **Dinámica de incendios:** *Flashover.*
- **Propiedades del Material** - *Ley de Hooke, Módulo elástico y Curvas Tensión v/s Deformación.*
- **Análisis estructural** - *Vigas*
  - *Momento solicitante y resistente.*
  - *Diseño a T° ambiente y bajo condición de incendio.*
- **Análisis estructural** - *Columnas*
  - *Carga Axial solicitante y resistente.*
  - *Pandeo Global.*
  - *Diseño a T° ambiente y bajo condición de incendio.*
- **Propiedades Térmicas** - *Dilatación*
  - *Calor específico, conductividad térmica y Elongación Térmica*
- **Diseño de protección** – *Transferencia de calor*
- **Tipos de protección**
  - *Morteros, encajonamientos, pintura intumescente y rellenos*
- **Conclusiones y Comentarios**

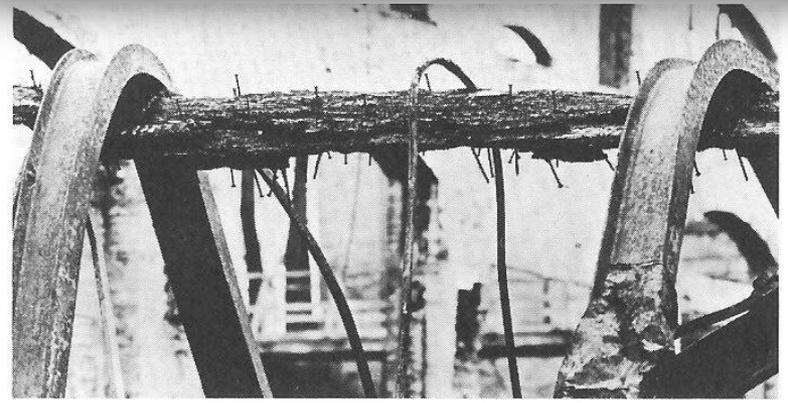


# INTRODUCCIÓN

## *Ingeniería Estructural Contra Incendios*



## Protección contra el fuego en estructuras de acero.





## Es importante proteger el acero? Por que?

- *Si. Su uso es masivo en edificios de gran escala (Estadios, Edificios de altura, etc).*
- *En edificios de gran escala, los procesos de evacuación presentan gran duración. Es importante evitar el colapso del edificio durante la evacuación y eventualmente durante toda la duración del incendio.*
- *Es relevante evitar propagación del incendios al interior del edificio. Esto se logra en base a compartimentación. (Entre pisos, zonas críticas, vías de evacuación, tamaño max de superficies incendiables.)*



*Estadio Nido de Pájaros.*



*CCTV Building 234m de altura.*



## Ingeniería Estructural de Incendios

### ***Dinámica de Incendios.***

*Tiene por objetivo la estimación del incendio probable que puede producirse en un recinto.*

### ***Análisis estructural***

*Tiene por objetivo determinar la temperatura crítica que puede alcanzar una estructura antes de colapsar.*

### ***Diseño del sistema de protección.***

*Proceso de transferencia de calor tendiente a definir un sistema que bien aisle o absorba calor tal de evitar que los elementos alcancen temperaturas cercanas a las de colapso.*



## Esquema Nacional

### Ingeniería Estructural de Incendios

#### ~~Dinámica de Incendios.~~

~~Tiene por objetivo la estimación del incendio probable que puede producirse en un recinto~~

#### ~~Análisis estructural~~

~~Tiene por objetivo la temperatura crítica que puede alcanzar una estructura antes de colapsar.~~

*El incendio es Standard.*

$T^{\circ}_{crit} = 500^{\circ}C.$

#### ~~Diseño del sistema de protección.~~

~~Proceso de transferencia de calor tendiente a definir un sistema que bien aísle o absorba calor tal de evitar que los elementos alcancen temperaturas cercanas a las de colapso.~~

*Las soluciones se ensayan.*

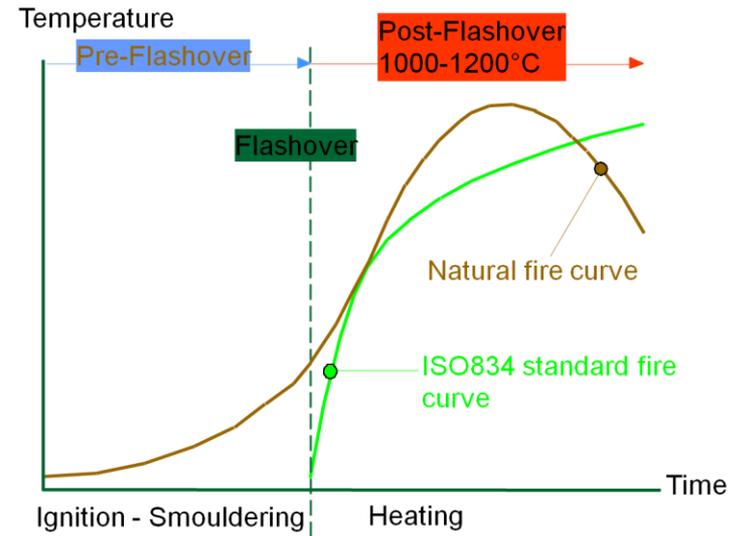
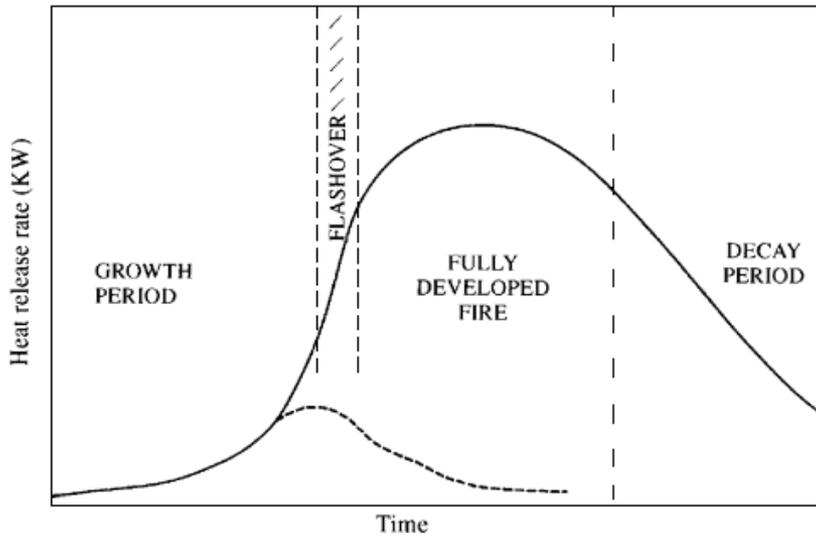


## Dinámica de Incendios

### *Flashover*



# Ingeniería Estructural de Incendios





## ANÁLISIS ESTRUCTURAL

*Ley de Hooke, Módulo elástico y Curva  
Tensión Deformación*



## Propiedades Mecánicas

- *Conceptos*

- *Tensión*

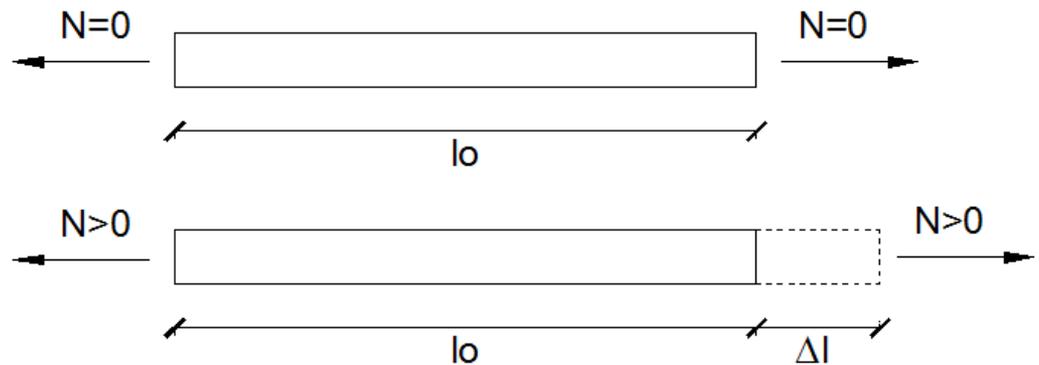
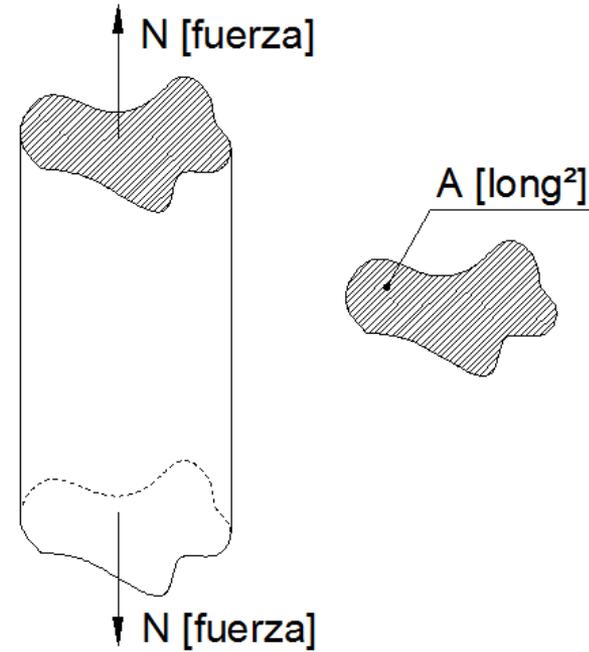
$$\sigma = \frac{N}{A}$$

- *Deformación Unitaria*

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_o}$$

- *Ley de Hooke*

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$





## Propiedades Mecánicas: Temperatura ambiente

- **Acero Estructural**
  - **Relación Tensión-Deformación real**



- 1) *E o Módulo Elástico o Módulo de Young. Corresponde a la pendiente de porción elástica de la curva tensión v/s Deformación.*
- 2) *El límite de proporcionalidad corresponde al punto donde se pierde la linealidad de la curva (Siempre en el rango elástico).*
- 3) *El límite de fluencia corresponde a la tensión a partir de la cual existirán deformaciones remanentes.*

### Tipo: A420-270ES

- Límite de Fluencia:  $f_y=270$ [MPa]
- Límite de Rotura:  $f_u=420$ [MPa]
- Módulo Elástico  $E=200.000$ [MPa]
- Def. de Fluencia a To:  $\epsilon_y \approx 0.1\%$
- Def. de Rotura a To:  $\epsilon_u \approx 15\%-20\%$

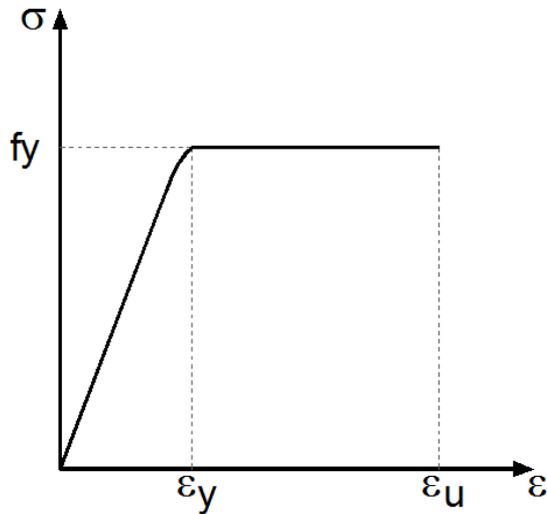
- 4) *El límite de rotura corresponde la tensión máxima que soporta el material antes de efectivamente romperse.*



## Propiedades Mecánicas: Temperatura ambiente

- *Acero Estructural*

*Relación Tensión-Deformación de diseño*



*No existe curva de endurecimiento por deformación. En otras palabras, no se considera el régimen plástico en el diseño usual.*



## Propiedades Mecánicas: Altas Temperaturas

Steel temperature $\theta_a$	Reduction factors at temperature $\theta_a$ relative to the value of $f_y$ or $E_a$ at 20 °C			
	Reduction factor (relative to $f_y$ ) for effective yield strength	Modified factor (relative to $f_y$ ) for satisfying deformation criteria	Reduction factor (relative to $f_y$ ) for proportional limit	Reduction factor (relative to $E_a$ ) for the slope of the linear elastic range
	$k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	$k_{x,\theta} = f_{x,\theta}/f_y$	$k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$	$k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$
20 °C	1,000	1,000	1,000	1,000
100 °C	1,000	1,000	1,000	1,000
200 °C	1,000	0,922	0,807	0,900
300 °C	1,000	0,845	0,613	0,800
400 °C	1,000	0,770	0,420	0,700
500 °C	0,780	0,615	0,360	0,600
600 °C	0,470	0,354	0,180	0,310
700 °C	0,230	0,167	0,075	0,130
800 °C	0,110	0,087	0,050	0,090
900 °C	0,060	0,051	0,0375	0,0675
1000 °C	0,040	0,034	0,0250	0,0450
1100 °C	0,020	0,017	0,0125	0,0225
1200 °C	0,000	0,000	0,0000	0,0000

**NOTE:** For intermediate values of the steel temperature, linear interpolation may be used.

*Ejemplo (EN 1993-1-2 Tabla 3.1) (Eurocódigo 3).*

*Consideremos acero a 500°C*

$$R_{(T)} = k_{(T)} \cdot R_{(20^\circ C)}$$

$$f_{y(500)} = 0.780 \cdot 270 = 210.6 [MPa]$$

$$f_{p(500)} = 0.360 \cdot 270 = 97.2 [MPa]$$

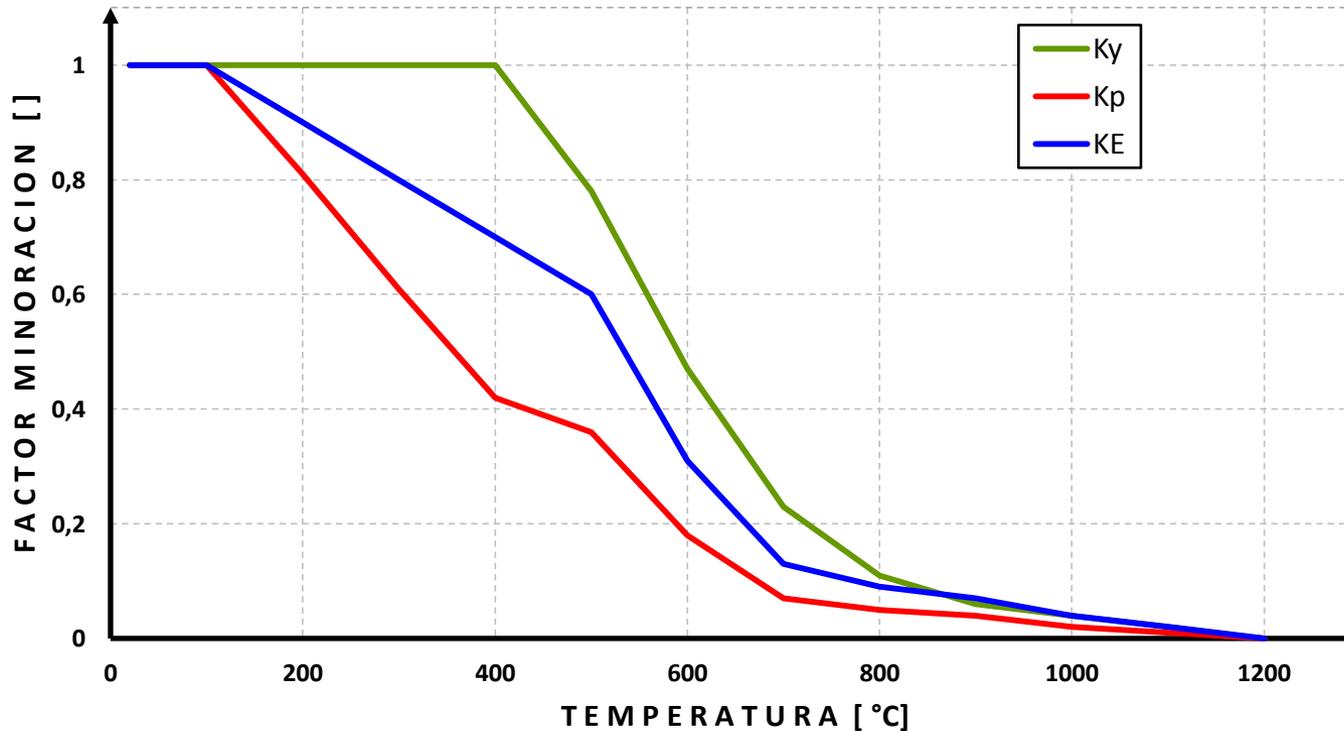
$$E_{(500)} = 0.6 \cdot 200,000 = 120,000 [MPa]$$



## Propiedades Mecánicas: Altas Temperaturas

- *Acero Estructural*

*Factores de modificación: Fluencia, proporcionalidad y módulo elástico*

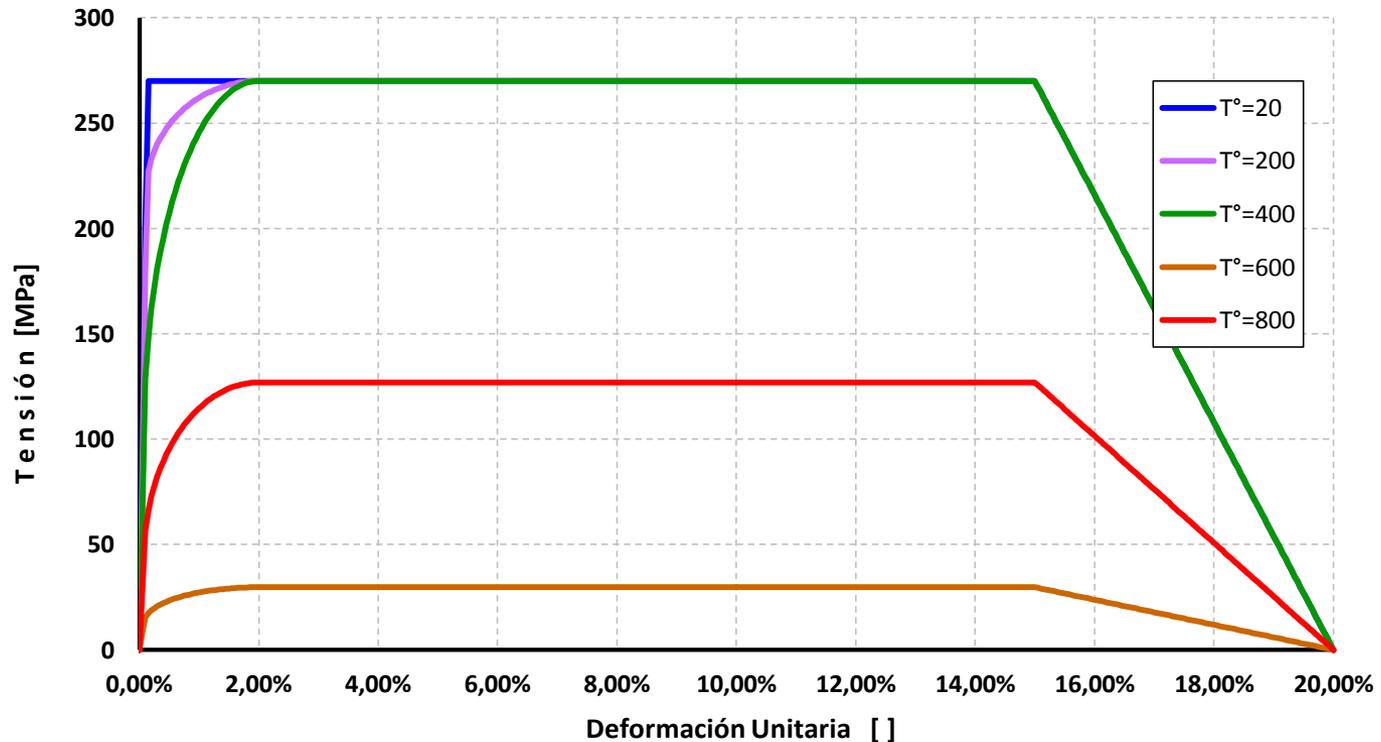




## Propiedades Mecánicas: Altas Temperaturas

- *Acero Estructural*

*Curvas tensión-deformación en función de la temperatura*





## Propiedades Mecánicas: Eurocódigo 3 (Modelo Matemático).

Strain range	Stress $\sigma$	Tangent modulus
$\varepsilon \leq \varepsilon_{p,\theta}$	$\varepsilon E_{a,\theta}$	$E_{a,\theta}$
$\varepsilon_{p,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{y,\theta}$	$f_{p,\theta} - c + (b/a) [a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2]^{0,5}$	$\frac{b(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)}{a [a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2]^{0,5}}$
$\varepsilon_{y,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{t,\theta}$	$f_{y,\theta}$	0
$\varepsilon_{t,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{u,\theta}$	$f_{y,\theta} [1 - (\varepsilon - \varepsilon_{t,\theta}) / (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{t,\theta})]$	-
$\varepsilon = \varepsilon_{u,\theta}$	0,00	-
Parameters	$\varepsilon_{p,\theta} = f_{p,\theta} / E_{a,\theta}$ $\varepsilon_{y,\theta} = 0,02$	$\varepsilon_{t,\theta} = 0,15$ $\varepsilon_{u,\theta} = 0,20$
Functions	$a^2 = (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta} + c / E_{a,\theta})$ $b^2 = c (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) E_{a,\theta} + c^2$ $c = \frac{(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})^2}{(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) E_{a,\theta} - 2(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})}$	

**fy:** Esfuerzo de fluencia

**fp:** Límite de proporcionalidad

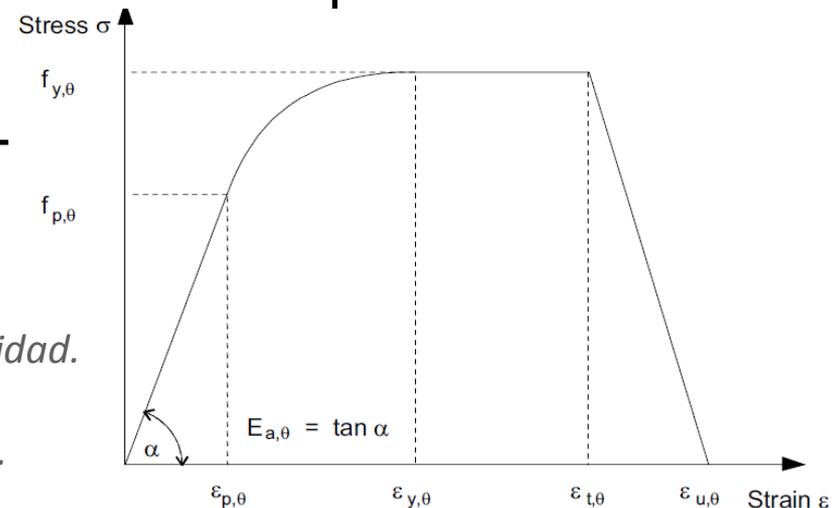
**Ea:** Pendiente del rango elástico.

**ep:** Deformación unitaria en el límite de proporcionalidad.

**ey:** Deformación unitaria en la fluencia.

**et:** Deformación unitaria limite de la zona de fluencia.

**eu:** Deformación unitaria última.





## Propiedades Mecánicas: Altas Temperaturas Eurocódigo 3.

Strain	Effective yield strength at elevated temperature, relative to yield strength at 20 °C.							
	$k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$							
	Steel temperature $\theta_a$ [°C]							
	100	200	300	400	500	600	700	800
0,0000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,0005	0,382	0,344	0,305	0,267	0,229	0,118	0,050	0,034
0,0010	0,764	0,687	0,611	0,482	0,407	0,212	0,091	0,058
0,0015	1,000	0,840	0,691	0,553	0,459	0,247	0,109	0,065
0,0020	1,000	0,861	0,728	0,602	0,494	0,270	0,122	0,070
0,0025	1,000	0,876	0,756	0,640	0,522	0,290	0,132	0,074
0,0030	1,000	0,888	0,779	0,672	0,545	0,306	0,141	0,077
0,0035	1,000	0,898	0,798	0,701	0,565	0,320	0,148	0,080
0,0040	1,000	0,907	0,816	0,726	0,583	0,333	0,155	0,082
0,0045	1,000	0,915	0,831	0,749	0,600	0,344	0,161	0,085
0,0050	1,000	0,922	0,845	0,770	0,615	0,354	0,167	0,087
0,0055	1,000	0,929	0,858	0,789	0,628	0,364	0,172	0,089
0,0060	1,000	0,935	0,870	0,806	0,641	0,373	0,177	0,090
0,0065	1,000	0,941	0,881	0,823	0,653	0,381	0,182	0,092
0,0070	1,000	0,946	0,892	0,838	0,664	0,389	0,186	0,094
0,0075	1,000	0,950	0,901	0,852	0,674	0,396	0,190	0,095
0,0080	1,000	0,955	0,910	0,865	0,683	0,402	0,193	0,096
0,0085	1,000	0,959	0,918	0,878	0,692	0,409	0,197	0,098
0,0090	1,000	0,963	0,926	0,889	0,701	0,414	0,200	0,099
0,0095	1,000	0,967	0,933	0,900	0,708	0,420	0,203	0,102
0,0100	1,000	0,970	0,940	0,910	0,716	0,425	0,205	0,102
0,0110	1,000	0,976	0,952	0,928	0,729	0,434	0,210	0,104
0,0120	1,000	0,981	0,963	0,944	0,740	0,442	0,215	0,105
0,0130	1,000	0,986	0,972	0,958	0,750	0,449	0,218	0,107
0,0140	1,000	0,990	0,980	0,969	0,758	0,455	0,222	0,108
0,0150	1,000	0,993	0,986	0,979	0,765	0,459	0,224	0,108
0,0160	1,000	0,996	0,991	0,985	0,769	0,462	0,226	0,109
0,0170	1,000	0,997	0,995	0,992	0,775	0,466	0,228	0,110
0,0180	1,000	0,999	0,998	0,997	0,778	0,468	0,229	0,110
0,0190	1,000	1,000	0,999	0,999	0,779	0,470	0,230	0,110
0,0200	1,000	1,000	1,000	1,000	0,780	0,470	0,230	0,110



## Propiedades Mecánicas: Altas Temperaturas

• **Ejemplo: Barra en tracción.**

Barra circular de acero de 1cm de diámetro, de largo 1 m.

Calcule la resistencia de ésta y su deformación para una masa colgante de 2000 [kg] a 20 y 400°C.

**Solución**

$$A = 0.79 \text{ cm}^2$$

$$\text{Esfuerzo } (\sigma) = 2,000 / 0.79 = 2531 \text{ [kg/cm}^2\text{]} \text{ (Aprox. 250 MPa)}$$

$$K_y = 250 / 270 = 0.93$$

**A 20°C :**

$$E = 200,000 \text{ Mpa}$$

$$\text{Deformación} = \sigma / E * L = 250 \text{ MPa} / 200,000 * 1000 \text{ mm} = 1.25 \text{ mm}$$

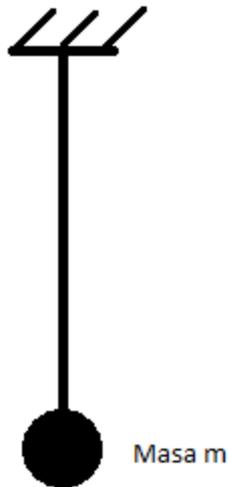
**A 400°C :**

$$E = 0.7 * 200,000 = 140,000 \text{ Mpa} \Rightarrow E \text{ disminuye pero OJO!!!!}$$

El comportamiento es no-lineal y por tanto la ley de hooke no es válida.

$$\text{Deformación} = 1\% \text{ (Aprox. Viendo tabla anterior)} \Rightarrow 0.01 * 1000 = 10 \text{ mm}$$

**Conclusión:** No existen problemas de resistencia, pero la deformaciones aumentan considerablemente. (Hubiésemos resistido a 500°C?????)





## ANÁLISIS ESTRUCTURAL

### *Diseño de vigas*





## Esfuerzo Solicitante

Se considerará a modo de ejemplo una elemento del tipo IN.

Cuando el elemento corresponde a una viga, este elemento sufre flexión y el causante de ello es el momento.

Caso simplemente apoyado:

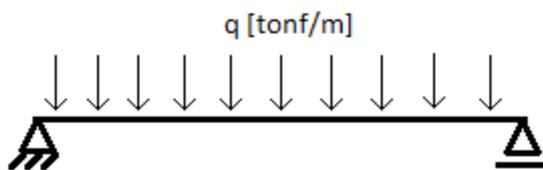
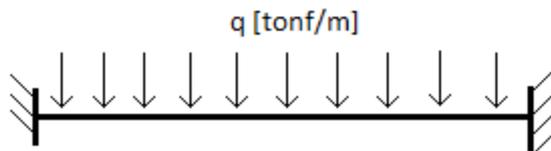


Diagrama de momento (Cuadrático).



$$M_{Max} = \frac{q \cdot l^2}{8}$$

Caso empotrado - empotrado:



$$M^{-}_{Max} = \frac{q \cdot l^2}{12}$$

$$M^{+}_{Max} = \frac{q \cdot l^2}{24}$$

Donde  $q$  es la carga lineal repartida y  $l$  es la luz de la viga.



## Análisis del diseño tradicional: Cargas

### • Condición de diseño

$$\phi \cdot Mn \geq Mu = F(\alpha_i, C_i, \text{otros})$$

- $\phi$ : factor de reducción
- $Mn$ : resistencia nominal del elemento
- $Mu$ : solicitación (combinación mayorada)
- $\alpha_i$ : Factor de mayoración asociado a la carga  $C_i$
- $C_i$ : carga de diseño
- Normas de análisis
  - Cargas: NCh 1537 Of. 2009
  - Resistencia
    - AISC 360
    - EN1993-1-2 (Eurocódigo 3)
  - Combinaciones de cargas
    - NCh3171 Of.2010

$$\alpha_D = 1.2$$

$$\alpha_L = 1.6$$

$$\Rightarrow \text{Carga} = 1.2 \cdot DL + 1.6 \cdot LL$$

Aproximación explicativa	
Ocupación	Carga [kg/m <sup>2</sup> ]
<b>Público</b>	500
<b>Privado</b>	200
<b>Techo</b>	100
<b>Autos</b>	500
<b>Camiones</b>	1200
<b>Bodegas</b>	1200

*Para el caso de incendios estos factores se llevan a 1 para el caso de cargas muertas y algo levemente inferior para cargas vivas, lo que permite el diseño a T° elevadas.*



## Factores de amplificación carga viva para condición de incendios (EN1990:2002 Anexo A1).

Action	$\psi_1$
Imposed loads in buildings, category (see EN 1991-1-1)	
Category A : domestic, residential areas	0,5
Category B : office areas	0,5
Category C : congregation areas	0,7
Category D : shopping areas	0,7
Category E : storage areas	0,9
Category F : traffic area, vehicle weight $\leq 30\text{kN}$	0,7
Category G : traffic area, $30\text{kN} < \text{vehicle weight} \leq 160\text{kN}$	0,5
Category H : roofs	0



## Ejemplo de cálculo

Se tiene una losa de estacionamientos, de espesor 16cm, soportada por una grilla de vigas espaciadas cada 6m. Las vigas se asumen empotradas-empotradas.

$$M = \frac{q \cdot l^2}{12}$$

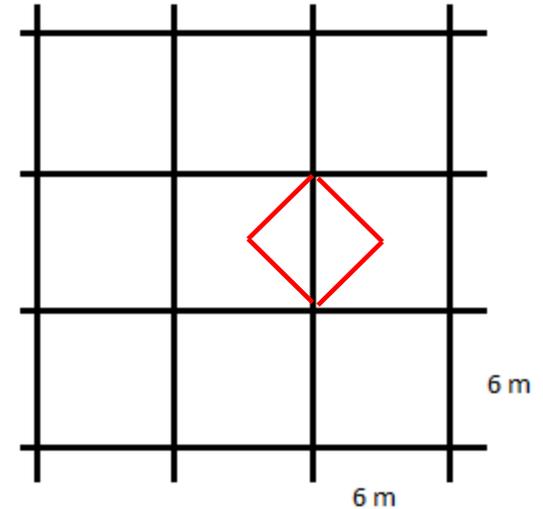
**Solución a 20°C:**

$$L=6m$$

$$\begin{aligned}
 q &= 1.6 * (\text{espaciamiento} * \text{Carga repartida}) + 1.2 * \text{Peso Propio} \\
 &= (36 \text{ m}^2/2) * (1.6 * 0.5 [\text{tonf/m}^2]) + 1.2 * (2.4 [\text{Tonf/m}^3] * 0.16 [\text{m}]) \\
 &= 18 \text{ m}^2 * (0.8 [\text{Tonf/m}^2] + 0.46 [\text{Tonf/m}^2]) / 6m \\
 &= 3.78 [\text{Tonf/m}]
 \end{aligned}$$

$$M_{20^\circ C} = \frac{3.78 \cdot 6^2}{12} = 11.35 [\text{Tonf} \cdot \text{m}]$$

**OJO:** Se despreció el PP de la viga.





## Ejemplo de cálculo

**Solución para incendio:**

$$L=6m$$

$$\begin{aligned} q &= (\text{espaciamiento} * \text{Carga repartida}) + \text{Peso Propio} \\ &= (36 \text{ m}^2/2) * (0.7 * 0.5 [\text{tonf/m}^2]) + 1.0 * (2.4 [\text{Tonf/m}^3] * 0.16 [\text{m}]) \\ &= 18 * (0.35 [\text{Tonf/m}^2] + 0.38 [\text{Tonf/m}^2]) / 6m \\ &= 2.19 [\text{Tonf/m}] \end{aligned}$$

$$M_f = \frac{2.19 \cdot 6^2}{12} = 6.57 [\text{Tonf} \cdot \text{m}]$$



## Resistencia Requerida

El momento resistente que es capaz de desarrollar una viga, sigue la siguiente relación.

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I}$$

Donde

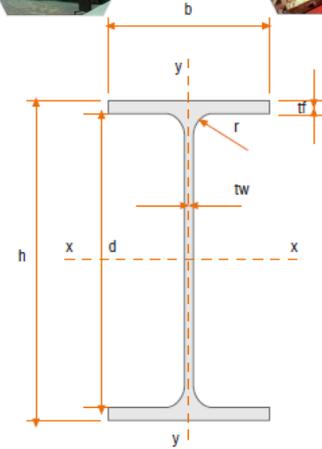
$\sigma$ : corresponde al esfuerzo en el ala, el que se limita al esfuerzo de fluencia.

$Y$ : corresponde a la distancia entre el centro de masas el ala ( $h/2$ )

$I$ : Inercia fuerte  $I_{xx}$

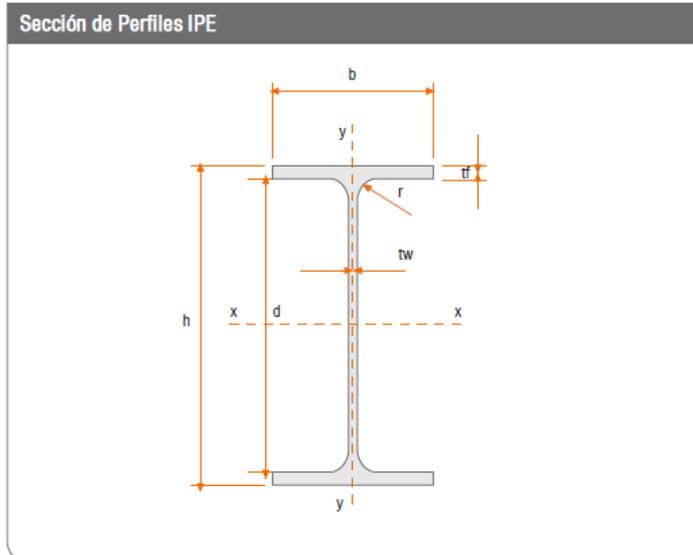
$$W = \frac{I}{y} = \frac{11.35 \cdot 1000 \cdot 100 [\text{kgf} \cdot \text{cm}]}{2700 [\text{kgf} / \text{cm}^2]} = 420 [\text{cm}^3]$$

Reordenando la ecuación de Navier se obtiene  $W$  que recibe el nombre de Módulo resistente. En Este caso, para resistir el momento solicitante se requiere de la colocación de una viga que presente al menos este valor de módulo resistente.





**Información de  
Catálogo**  
(Cintac en este caso)



Nos quedamos con IPE 270.

Perfil	Dimensiones						Peso	Area	Propiedades					
	Nominales						P	A	Eje X-X			Eje Y-Y		
	h	b	tw	tf	r	d	kgf/m	cm <sup>2</sup>	Ix (cm <sup>4</sup> )	Wx (cm <sup>3</sup> )	ix (cm)	Iy (cm <sup>4</sup> )	Wy (cm <sup>3</sup> )	iy (cm)
IPE 80	80	46	3,8	5,2	5,0	69,6	6,00	7,64	80,10	20,00	3,24	8,49	3,69	1,05
IPE 100	100	55	4,1	5,7	7,0	88,6	8,10	10,30	171,00	34,20	4,07	15,90	5,79	1,24
IPE 120	120	64	4,4	6,3	7,0	107,4	10,40	13,20	318,00	53,00	4,90	27,70	8,65	1,45
IPE140	140	73	4,7	6,9	7,0	126,2	12,90	16,40	541,00	77,30	5,74	44,90	12,30	1,65
IPE 160	160	82	5,0	7,4	9,0	145,2	15,80	20,10	869,00	109,00	6,58	68,30	16,70	1,84
IPE 180	180	91	5,3	8,0	9,0	164	18,80	23,90	1320,00	146,00	7,43	101,00	22,20	2,05
IPE 200	200	100	5,6	8,5	12,0	183	22,40	28,50	1940,00	194,00	8,25	142,00	28,50	2,24
IPE 220	220	110	5,9	9,2	12,0	201,6	26,20	33,40	2770,00	252,00	9,11	205,00	37,30	2,48
IPE 240	240	120	6,2	9,8	11,0	220,4	30,70	39,10	3890,00	324,00	9,97	284,00	47,30	2,70
IPE 270	270	135	6,6	10,2	15,0	249,6	36,10	45,90	5790,00	429,00	11,23	420,00	62,20	3,02
IPE 300	300	150	7,1	10,7	15,0	278,6	42,20	53,80	8360,00	557,00	12,47	604,00	80,50	3,35
IPE 330	330	160	7,5	11,5	18,0	307	49,10	62,60	11770,00	713,00	13,70	788,00	98,50	3,55
IPE 360	360	170	8,0	12,7	18,0	334,6	57,10	72,70	16270,00	904,00	14,96	1040,00	123,00	3,78
IPE 400	400	180	8,6	13,5	21,0	373	66,30	84,50	23130,00	1160,00	16,54	1320,00	146,00	3,95
IPE 450	450	190	9,4	14,6	21,0	420,8	77,70	98,80	33740,00	1500,00	18,48	1680,00	176,00	4,12
IPE 500	500	200	10,2	16,0	24,0	468	90,70	115,50	48200,00	1930,00	20,38	2140,00	214,00	4,30
IPE 550	550	210	11,1	17,2	24,0	515,6	106,0	134,00	67120,00	2440,00	22,38	2670,00	254,00	4,77
IPE 600	600	220	12,0	19,0	24,0	562	122,0	156,00	92080,00	3070,00	24,30	3387,00	308,00	4,66



## Caso bajo Incendio

¿Que esfuerzo de fluencia puedo permitir?

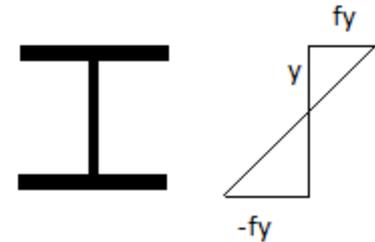
$$\sigma_{\text{lim}} = \frac{M_f \cdot y}{I} = \frac{M_f}{W}$$

**Donde**

$\sigma$ : corresponde al esfuerzo en el ala, el que se limita al esfuerzo de fluencia.

$Y$ : corresponde a la distancia entre el centro de masas el ala ( $h/2$ )

$I$ : Inercia fuerte  $I_{xx}$



$$\sigma_{\text{lim}} = \frac{6.57 \cdot 1000 \cdot 100 [\text{kgf} \cdot \text{cm}]}{429 [\text{cm}^3]} = 1531 [\text{kgf} / \text{cm}^2] = 153 \text{MPa}$$

$$k_y = \frac{153 \text{MPa}}{270 \text{MPa}} = 0.57$$

Factor de reducción de esfuerzo de fluencia.



## Definición de la Temperatura Crítica.

Steel temperature $\theta_a$	Reduction factors at temperature $\theta_a$ relative to the value of $f_y$ or $E_a$ at 20 °C			
	Reduction factor (relative to $f_y$ ) for effective yield strength	Modified factor (relative to $f_y$ ) for satisfying deformation criteria	Reduction factor (relative to $f_y$ ) for proportional limit	Reduction factor (relative to $E_a$ ) for the slope of the linear elastic range
	$k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	$k_{x,\theta} = f_{x,\theta}/f_y$	$k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$	$k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$
20 °C	1,000	1,000	1,000	1,000
100 °C	1,000	1,000	1,000	1,000
200 °C	1,000	0,922	0,807	0,900
300 °C	1,000	0,845	0,613	0,800
400 °C	1,000	0,770	0,420	0,700
500 °C	0,780	0,615	0,360	0,600
600 °C	0,470	0,354	0,180	0,310
700 °C	0,230	0,167	0,075	0,130
800 °C	0,110	0,087	0,050	0,090
900 °C	0,060	0,051	0,0375	0,0675
1000 °C	0,040	0,034	0,0250	0,0450
1100 °C	0,020	0,017	0,0125	0,0225
1200 °C	0,000	0,000	0,0000	0,0000

**NOTE:** For intermediate values of the steel temperature, linear interpolation may be used.

EN 1993-1-2 Tabla 3.1 (Eurocódigo 3).

Haciendo una regresión lineal entre 500 y 600°C se tiene.

$$T_{crit} = 600 - 322.58 * (k_y - 0.47)$$

Para  $k_y=0.57 \Rightarrow T_{crit}=567^\circ\text{C}$

### Caso Extra.

Si debido a la influencia de otros esfuerzos (sísmicos por ejemplo) existiera cierto grado de sobre-dimensionamiento en escoger el perfil.

Si  $W=557$  (El siguiente perfil en el listado)

$$\sigma_{lim} = \frac{6.57 \cdot 1000 \cdot 100}{557} = 118\text{MPa}$$

$k_y=118/270 = 0.44 \Rightarrow T_{crit}=612^\circ\text{C}$

Que dice la norma Chilena????



## Que dice la norma chilena?????

- *La norma chilena no establece ningún procedimiento de cálculo para protección de estructuras. En cambio, ella fija la temperatura media que pueden alcanzar los elementos estructurales en 500°C.*
- *En Europa la  $T^\circ$  crítica es de 550°C y en USA de 590°C*

## Observaciones.

- *La incursión en el rango plástico de la pieza aumenta la resistencia considerada.*
- *La compresión que induce la dilatación restringida puede tener un efecto tanto positivo como negativo.*
- *Es relevante notar que es incidente la proporción de cargas vivas muertas, por cuanto los factores de amplificación son distintos. El factor de cargas muertas se minorará menos por tanto un elemento que resiste fundamentalmente cargas muertas tendrá una  $T^\circ$  crítica más elevada que uno que mayoritariamente resiste cargas vivas.*



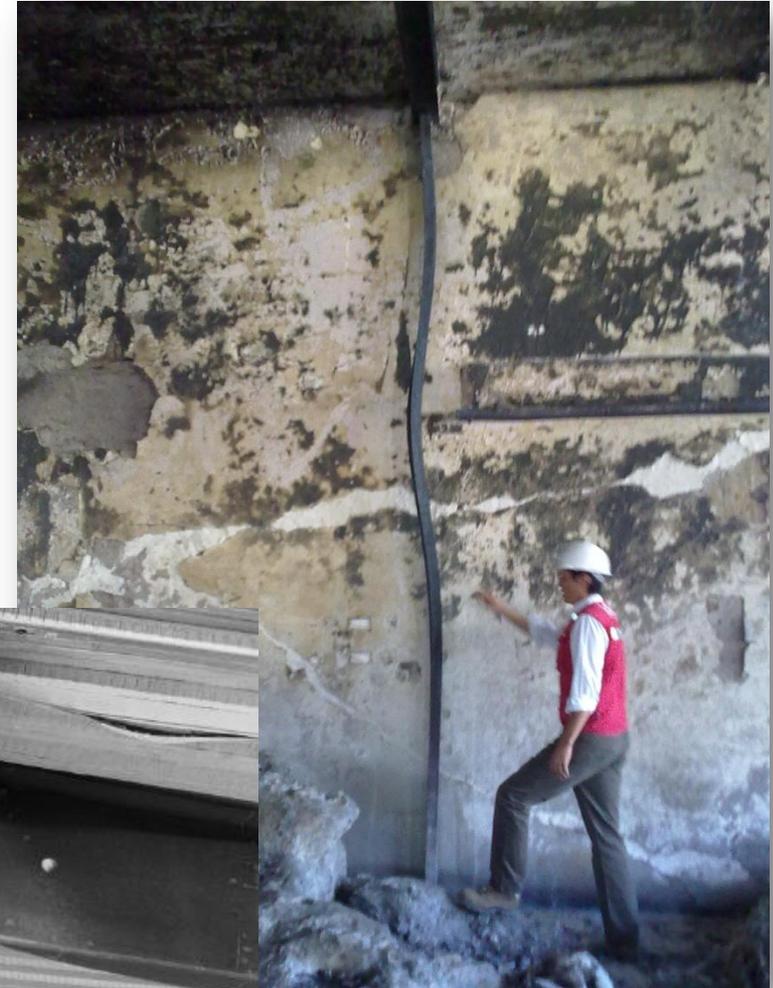
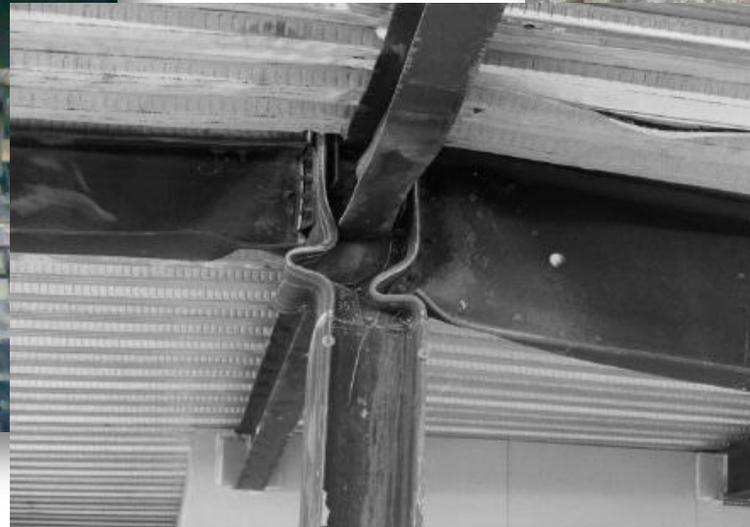
# ANÁLISIS ESTRUCTURAL

## *Diseño de Columnas*



## Diseño tradicional

- *El diseño de columnas está controlado por tres modos de falla principales: Fluencia, Pandeo Local y Pandeo Global.*
- *En la literatura existe muy poca información respecto del pandeo local ante incendios. Esta clase se centra en el análisis de los fenómenos de Pandeo global y Fluencia.*





## Esbeltez como factor controlante

El modo de falla que finalmente se manifiesta tiene relación con un parámetro llamado esbeltez  $\lambda$ .

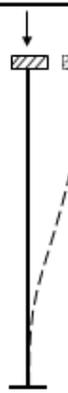
Donde:

$k$ : Es un parámetro que depende de las condiciones de apoyo.

$L$ : Es el largo del elemento

$r$ : es el radio de giro, raíz de la razón entre la inercia y el área transversal de la pieza.

$$\lambda = \frac{k \cdot L}{r} \quad r = \sqrt{\frac{I}{A_s}}$$

Forma en que se pandean las vigas o columnas						
Valor teórico	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
Valor de diseño recomendado	0.65	0.8	1.2	1.0	2.1	2.0

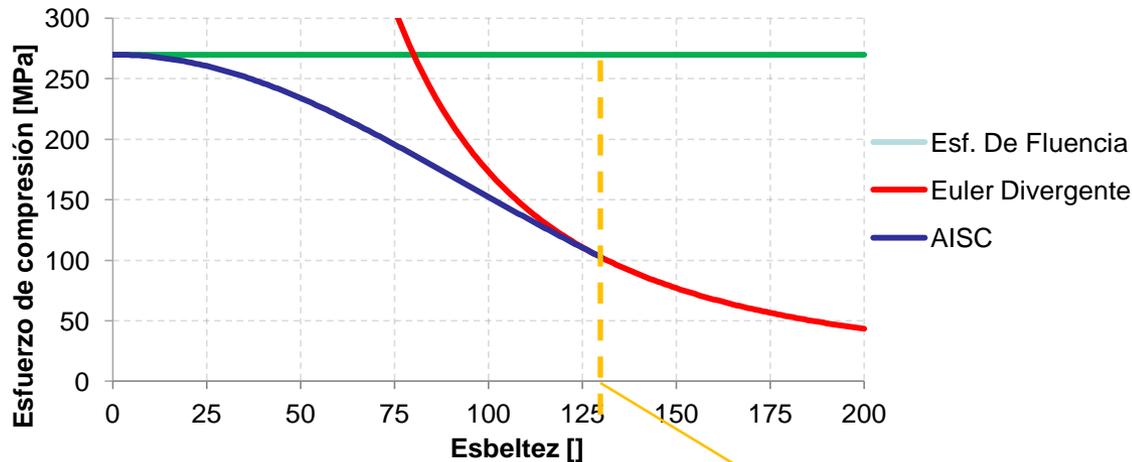


## Resistencia en Compresión v/s Esbeltez

Existen tres zonas:

- 1) Zona de fluencia en compresión.
- 2) Zona de pandeo elasto-plástico.
- 3) Zona de pandeo elástico.

Resistencia en Compresión AISC



$$\sigma_{Elasto-Plastico} = f_y \cdot 0.658^{\frac{f_y}{f_{euler}}}$$

$$f_{Euler} = \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2}$$

$$f_{Elastico} = 0.877 \cdot f_e$$

$$\lambda_{lim} = 4.71 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 128$$



## Ejemplo de cálculo

(Mismo Anterior para el caso de vigas)

Se tiene una losa de estacionamientos, de espesor 16cm, soportada por una grilla de vigas espaciadas cada 6m. Se asumen dos niveles y por tanto las columnas reciben el peso de del nivel superior, la altura entre pisos es de 3.5m.

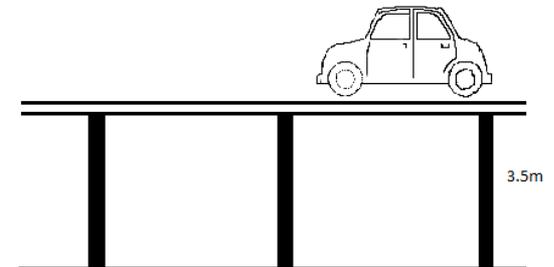
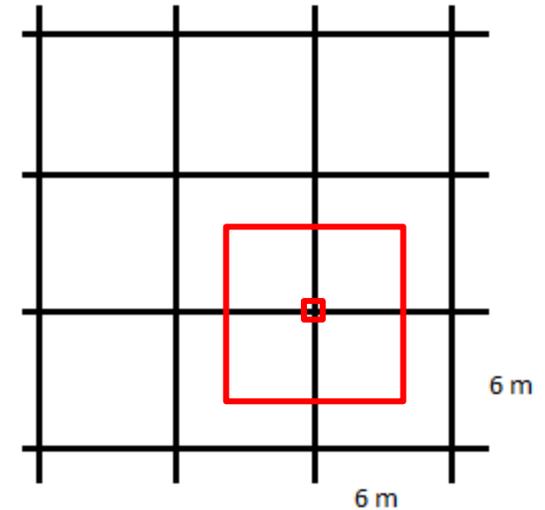
$$\sigma = \frac{P}{A}$$

**Solución a 20°C:**

$$L=3.5m$$

$$\begin{aligned}
 q &= 1.6 * (\text{Area tributaria} * \text{Carga repartida}) + 1.2 * \text{Peso Propio} \\
 &= 36 \text{ m}^2 * (1.6 * (0.5 [\text{tonf/m}^2])) + 1.2 * (2.4 [\text{Tonf/m}^3] * 0.16 [\text{m}]) \\
 &= 45 [\text{Tonf}]
 \end{aligned}$$

$$A_{Min} = \frac{45000[\text{kgf}]}{2700[\text{kgf} / \text{cm}^2]} = 16.7[\text{cm}^2]$$





## Ejemplo de cálculo

*Vamos a utilizar un perfil cajón. Para este procedimiento no existe un parámetro único de selección como lo es  $W$  en flexión, aquí el proceso es iterativo entre el área y la esbeltez.*

### Cuadrados

Dimensión h x b mm.	Espesor mm.	Peso kg/m	Sección cm <sup>2</sup>	Momento de Inercia		Módulo Resistente		Radio de Giro	
				cm <sup>4</sup>		cm <sup>3</sup>		cm.	
				I <sub>x</sub>	I <sub>y</sub>	W <sub>x</sub>	W <sub>y</sub>	i <sub>x</sub>	i <sub>y</sub>
150 x 150	3	13,7	17,4	622	622	83	83	5,98	5,98
150 x 150	4	18,0	22,9	807	807	108	108	5,93	5,93
150 x 150	5	22,3	28,4	981	981	131	131	5,88	5,88
200x200	3	18,4	23,4	1506	1506	151	151	8,02	8,02
200x200	4	24,3	30,9	1970	1970	197	197	7,97	7,97
200x200	5	30,1	38,4	2410	2410	241	241	7,92	7,92
200x200	6	35,8	45,6	2830	2830	283	283	7,88	7,88
250x250	4	30,6	39,0	3906	3906	312	312	10,01	10,01
250x250	5	38,0	48,4	4800	4800	384	384	9,97	9,97
250x250	6	45,2	57,6	5670	5670	453	453	9,92	9,92
300x300	4	36,9	47,0	6824	6824	455	455	12,06	12,06
300x300	5	45,8	58,4	8414	8414	561	561	12,01	12,01
300x300	6	54,7	69,4	9959	9959	664	664	11,96	11,96



## Ejemplo de cálculo

Vamos a utilizar un perfil cajón. Para este procedimiento no existe un parámetro unico de selección como lo es  $W$  en flexión, aquí el proceso es iterativo entre el área y la esbeltez.

$f_y$	270	MPa
P solicitante	45000	kgf
E	200,000	Mpa
L	350	cm
k	0,7	[]
phi	0,9	[]

$$f_{Euler} = \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2}$$

$$FU = \frac{P_{Solicitante}}{P_{Admisible}}$$

En este caso el perfil es simétrico, pero OJO que la esbeltez es direccional. Es distinta en ambos ejes.

	A [cm <sup>2</sup> ]	r [cm]	$\lambda$ []	Euler [Mpa]	S [Mpa]	P adm [kgf]	FU
150x150x3	17,4	5,98	41,0	1176,0	245,3	38,408	1,17
150x150x4	22,9	5,93	41,3	1156,4	244,9	50,466	0,89
150x150x5	28,4	5,88	41,7	1137,0	244,5	62,483	0,72

← Se escoge el pilar 150x150x4.

$$r = \sqrt{\frac{I}{A_s}}$$

$$\lambda = \frac{k \cdot L}{r}$$

$$P = \sigma \cdot A$$

$$\sigma_{Elasto-Plastico} = f_y \cdot 0.658^{\frac{f_y}{f_{euler}}}$$



## Caso bajo incendio

*Solución en Incendio:*

$$L=3.5m$$

$$\begin{aligned} q &= 0.7 * (\text{Area tributaria} * \text{Carga repartida}) + 1.0 * \text{Peso Propio} \\ &= 36 \text{ m}^2 * (0.7 * (0.5 [\text{tonf/m}^2])) + 1.0 * (2.4 [\text{Tonf/m}^3] * 0.16 [\text{m}]) \\ &= 26.4 [\text{Tonf}] \end{aligned}$$

$$\sigma_f = \frac{26400[\text{kgf}]}{22.9[\text{cm}^2]} = 1153[\text{kgf/cm}^2] = 115[\text{MPa}]$$



## Implementación de curvas de Pandeo Global

### Eurocódigo 3

EN 1993-1-1, Punto 5.5.1 y

EN 1993-1-2, Punto 4.2.3.2.

*La esbeltez crítica es la mayor esbeltez a la que una columna fluye en compresión.*

$$\lambda_{crit} = 20$$

$$\sigma_{Buckling} = \frac{\chi_{fi} \cdot k_{y\theta} f_y}{\gamma_{M fi}}$$

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_{\theta} + \sqrt{\varphi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2}}$$

$$\varphi_{\theta} = \frac{1}{2} \cdot \left( 1 + \alpha \cdot \left( \bar{\lambda}_{\theta} - \frac{\lambda_{crit}}{100} \right) + \bar{\lambda}_{\theta}^2 \right)$$

*Alfa es el factor de imperfección*

$$\alpha = 0.65 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

*$k_{y\theta}$ : Es el factor de reducción de  $f_y$  con la  $T^\circ$ .*

*Alfa es el factor de imperfección*

$$\bar{\lambda}_{\theta} = \bar{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{k_{y\theta}}{k_{E\theta}}}$$

$$\bar{\lambda} = \lambda \cdot \frac{\sqrt{\beta A}}{\lambda_1}$$

$$\beta A = \frac{A_{eff}}{A} = 1$$

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

*Limite Euler- $f_y$*

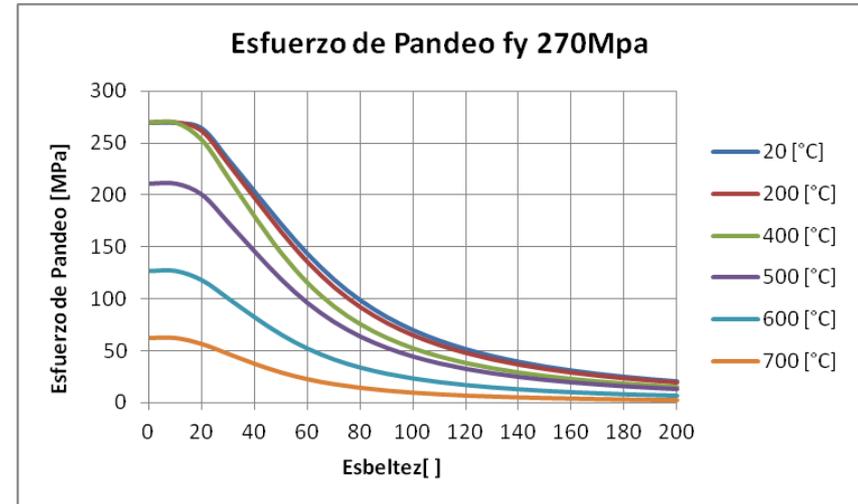
$$\lambda = \frac{k \cdot L}{r}$$

*Esbeltez tradicional*



## Implementación de curvas de Pandeo Global

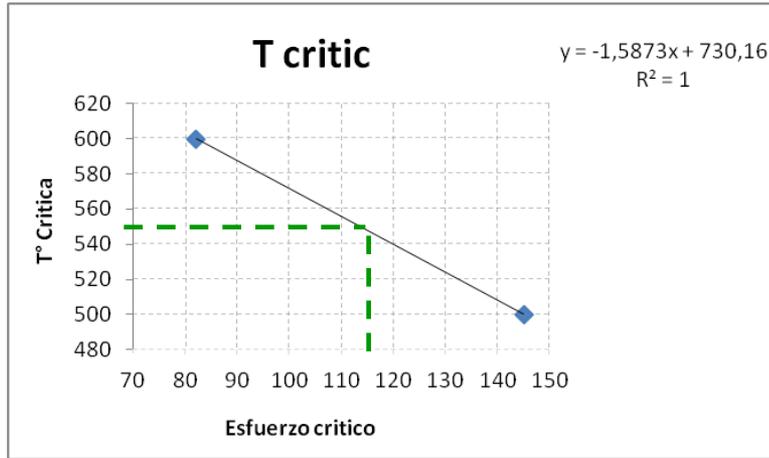
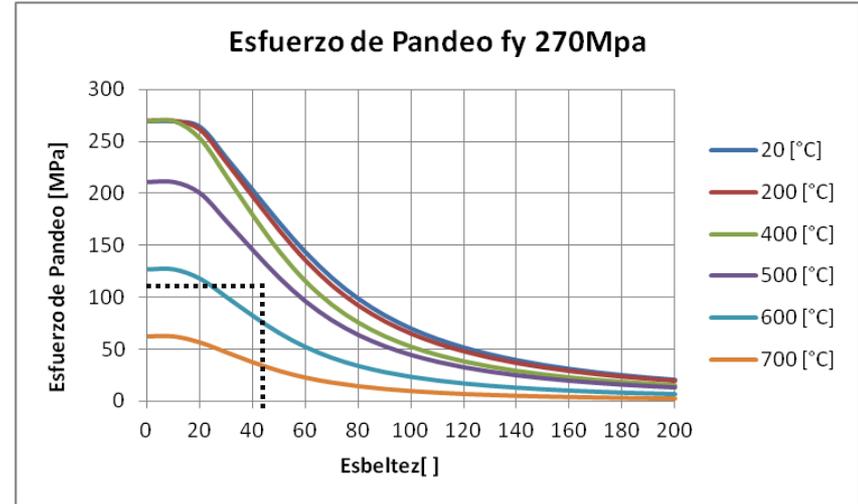
T Acero						
$\lambda$	20 [°C]	200 [°C]	400 [°C]	500 [°C]	600 [°C]	700 [°C]
0	270,0	270,0	270,0	210,6	126,9	62,1
10	270,0	270,0	270,0	210,6	126,9	62,1
20	264,5	261,3	252,9	199,8	117,8	56,3
30	234,5	229,5	216,4	172,8	100,1	46,9
40	203,4	196,6	179,0	145,0	82,0	37,4
50	172,3	164,2	144,2	118,4	65,5	29,2
60	143,5	135,0	115,2	95,6	52,0	22,8
70	118,9	110,8	92,6	77,4	41,6	18,1
80	98,9	91,5	75,4	63,4	33,8	14,6
90	82,9	76,4	62,3	52,5	27,9	12,0
100	70,2	64,4	52,2	44,1	23,3	10,0
110	60,1	55,0	44,3	37,5	19,8	8,5
120	51,9	47,4	38,1	32,3	17,0	7,2
130	45,2	41,3	33,0	28,0	14,7	6,3
140	39,7	36,2	28,9	24,6	12,9	5,5
150	35,2	32,0	25,5	21,7	11,4	4,8
160	31,3	28,5	22,7	19,3	10,1	4,3
170	28,1	25,5	20,3	17,3	9,0	3,8
180	25,3	23,0	18,3	15,5	8,1	3,4
190	23,0	20,8	16,5	14,1	7,3	3,1
200	20,9	19,0	15,0	12,8	6,7	2,8





## Caso bajo incendio

T Acero						
λ	20 [°C]	200 [°C]	400 [°C]	500 [°C]	600 [°C]	700 [°C]
0	270,0	270,0	270,0	210,6	126,9	62,1
10	270,0	270,0	270,0	210,6	126,9	62,1
20	264,5	261,3	252,9	199,8	117,8	56,3
30	234,5	229,5	216,4	172,8	100,1	46,9
40	203,4	196,6	179,0	145,0	82,0	37,4
50	172,3	164,2	144,2	118,4	65,5	29,2
60	143,5	135,0	115,2	95,6	52,0	22,8
70	118,9	110,8	92,6	77,4	41,6	18,1



*T°: Interpolación Lineal entre 500 y 600°C*

$$\begin{aligned}
 T_{crit} &= -1.5873 \cdot f_{adm} + 730.16 \\
 &= -1.5873 \cdot 115 + 730.16 \\
 &= 547^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$



## Análisis: Que hubiese sucedido si H=5m

En este caso las esbelteces aumentan. De todas formas seguimos en el rango elasto-plástico.

fy	270	MPa
P solicitante	45000	kgf
E	200000	Mpa
L	500	cm
k	0,7	[]
phi	0,9	[]

$$f_{Euler} = \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2}$$

$$FU = \frac{P_{Solicitante}}{P_{Admisible}}$$

	A [cm2]	r [cm]	λ []	Euler [Mpa]	S [Mpa]	P adm [kgf]	FU
150x150x3	17,4	5,98	58,5	576,2	221,9	34.752	1,29
150x150x4	22,9	5,93	59,0	566,6	221,2	45.586	0,99
150x150x5	28,4	5,88	59,5	557,1	220,4	56.342	0,80

$$r = \sqrt{\frac{I}{A_s}}$$

$$\lambda = \frac{k \cdot L}{r}$$

$$P = \sigma \cdot A$$

$$\sigma_{Elasto-Plastico} = fy \cdot 0.658 \frac{fy}{f_{euler}}$$

Se escoge el pilar 150x150x5. **OJO!!**  
Este elemento presenta un FU más bajo que el caso original.

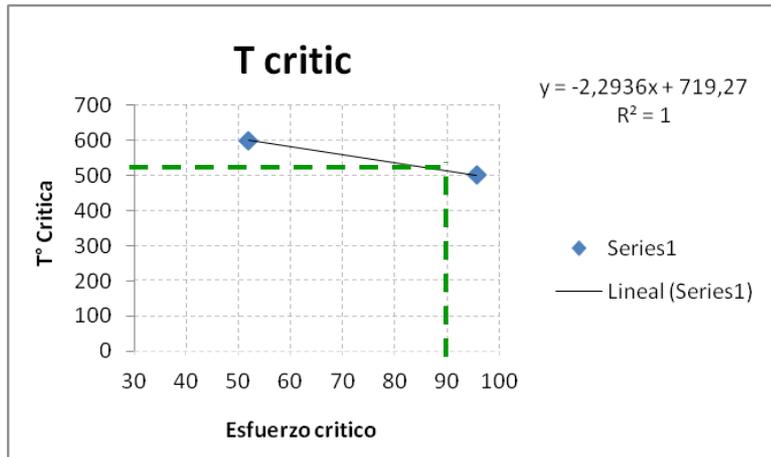
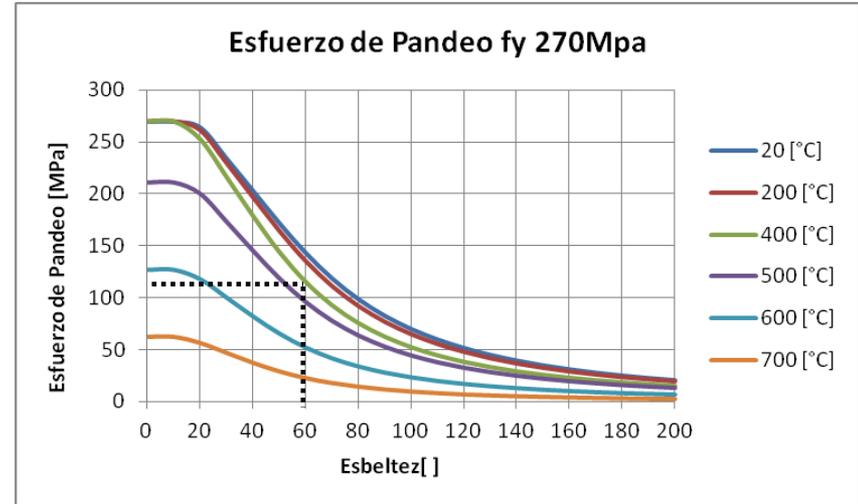
Entonces el esfuerzo que debe resistirse en incendio es:

$$\sigma_f = \frac{26400[kgf]}{28.4[cm^2]} = 930[kgf/cm^2] = 93[MPa]$$



## Análisis: Que hubiese sucedido si H=5m

T Acero						
λ	20 [°C]	200 [°C]	400 [°C]	500 [°C]	600 [°C]	700 [°C]
0	270,0	270,0	270,0	210,6	126,9	62,1
10	270,0	270,0	270,0	210,6	126,9	62,1
20	264,5	261,3	252,9	199,8	117,8	56,3
30	234,5	229,5	216,4	172,8	100,1	46,9
40	203,4	196,6	179,0	145,0	82,0	37,4
50	172,3	164,2	144,2	118,4	65,5	29,2
60	143,5	135,0	115,2	95,6	52,0	22,8
70	118,9	110,8	92,6	77,4	41,6	18,1



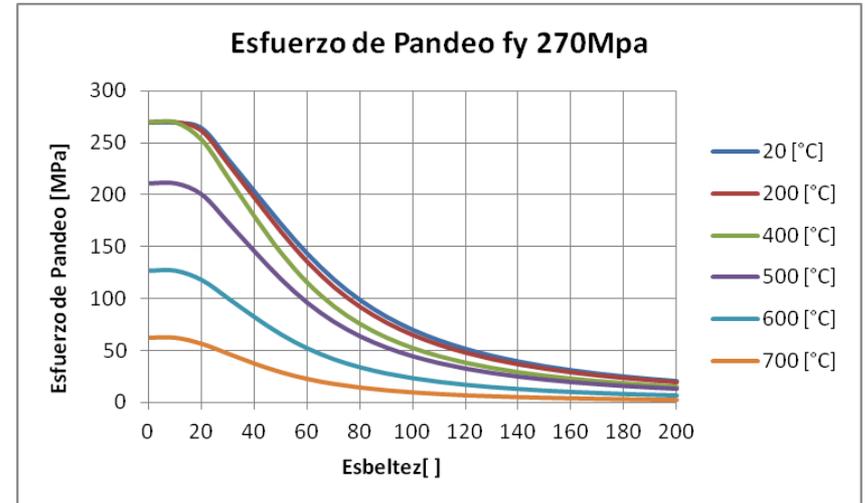
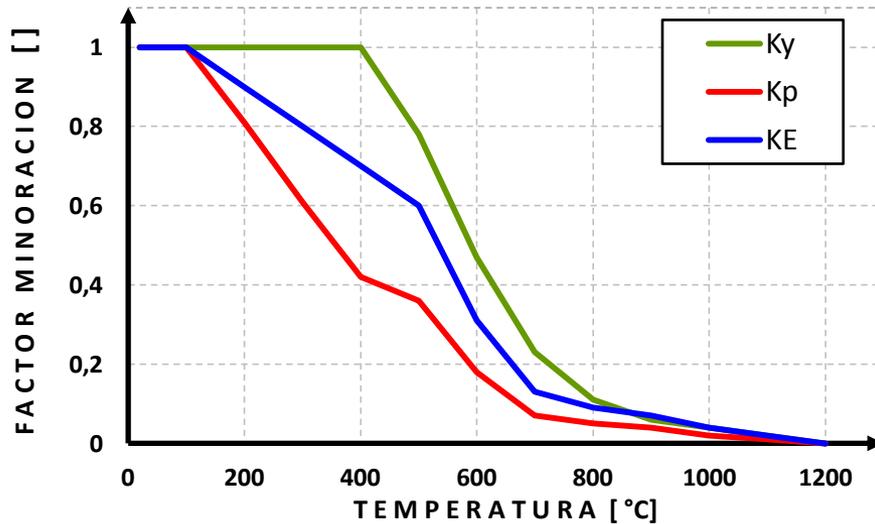
**T°: Interpolación Lineal entre 500 y 600°C**

$$\begin{aligned}
 T_{crit} &= -2.2936 \cdot f_{adm} + 719.27 \\
 &= -2.2936 \cdot 93 + 719.27 \\
 &= 505^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

*Menor al caso original !!!!!!!!  
Por que???????*



## Explicación:



*El segundo caso presentaba un F.U. menor al caso original, lo que hacía suponer que la temperatura crítica debía ser superior.*

*Lo que sucede al considerar diferentes perfiles, es que a mayores esbelteces el comportamiento comienza a estar dominado por la pérdida de rigidez (E) por cuanto entramos en la zona de pandeo elástico, mientras que para esbelteces bajas, el comportamiento está dominado por la pérdida de resistencia ( $f_y$ ). Finalmente la baja en  $T^\circ$  crítica esta asociada a que E decrece con la temperatura de manera más violenta que  $f_y$ , y ello se torna importante para el segundo caso de mayor esbeltez.*



## Caso Particular: Pandeo Global en una porción de pilar





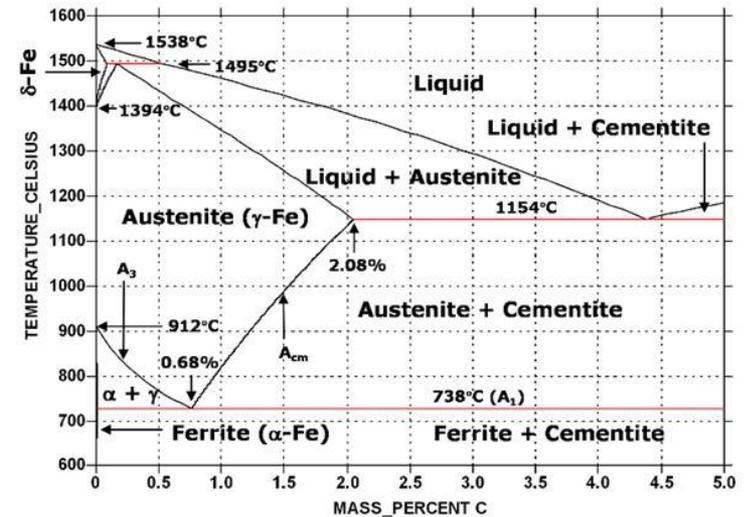
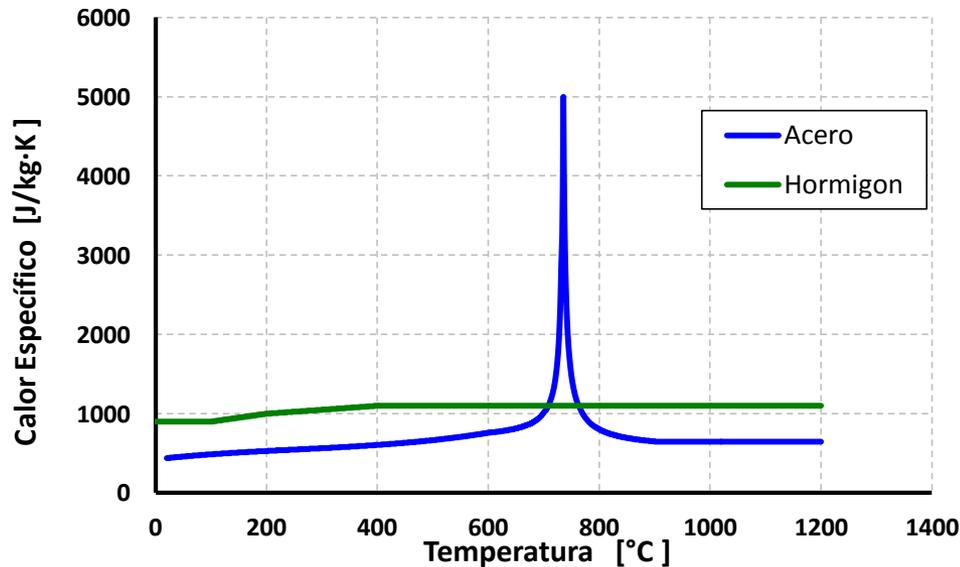
## ANÁLISIS TÉRMICO

*Propiedades térmicas del acero y Dilatación:  
Libre y Restringida*



## Propiedades térmicas – Comparación EN 1993 -1.2

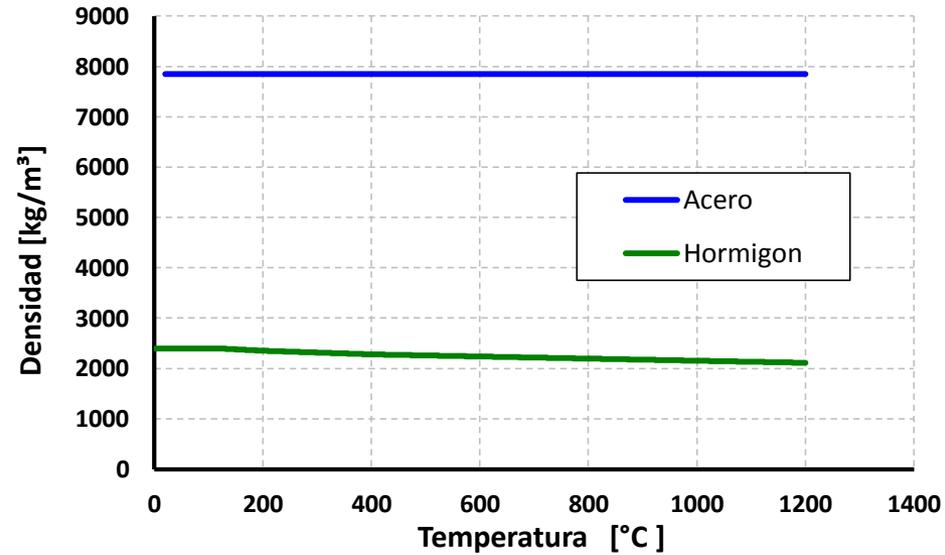
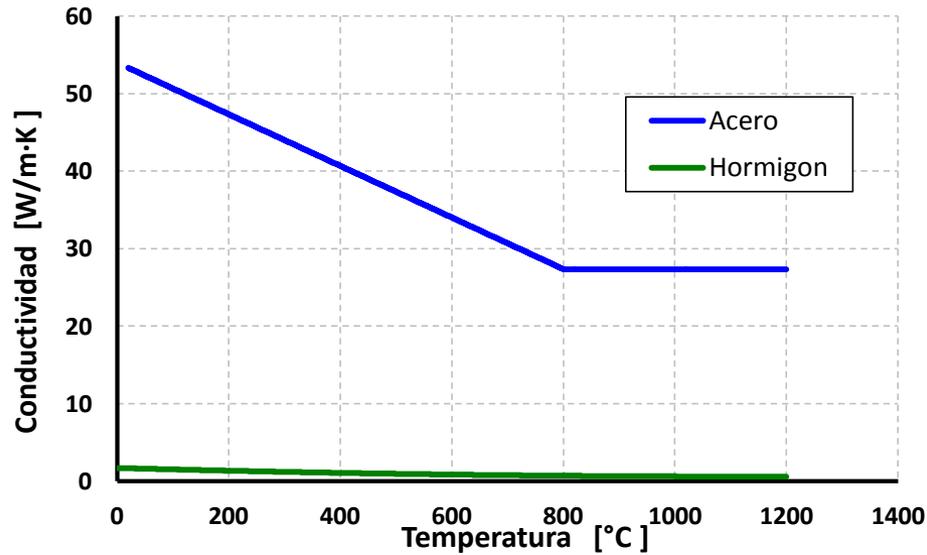
- *Calor específico: Energía necesaria para aumentar la  $T^\circ$  en  $1^\circ\text{C}$ .*
- *El peak de esta curva coincide con el cambio de fase del acero y ellos se traduce en consumo de energía.*





## Propiedades térmicas – Comparación

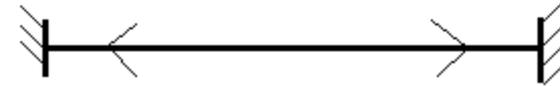
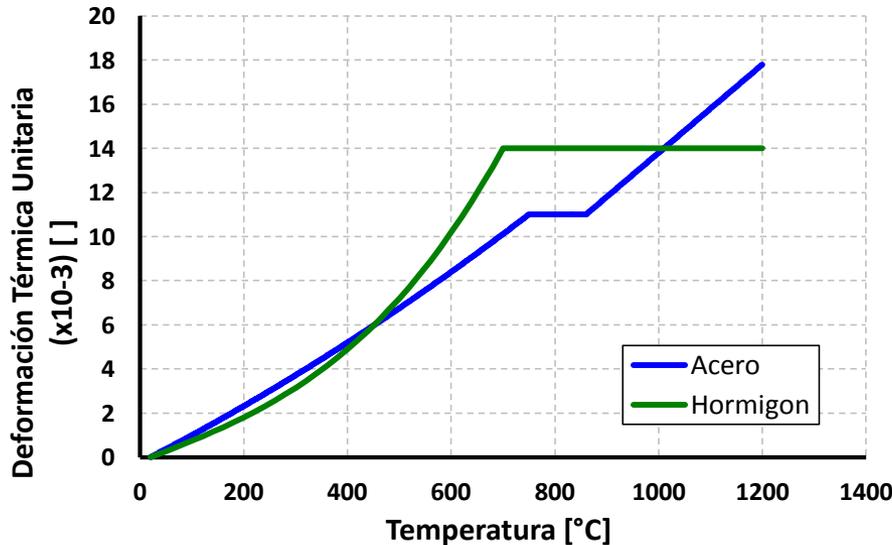
- *Conductividad y Densidad*





## Propiedades térmicas – Dilatación

- *Deformación térmica unitaria*



### *Ejemplo: Expansión restringida*

*Si los apoyos de una viga son infinitamente rígidos, toda la dilatación se transforma en compresión.*

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

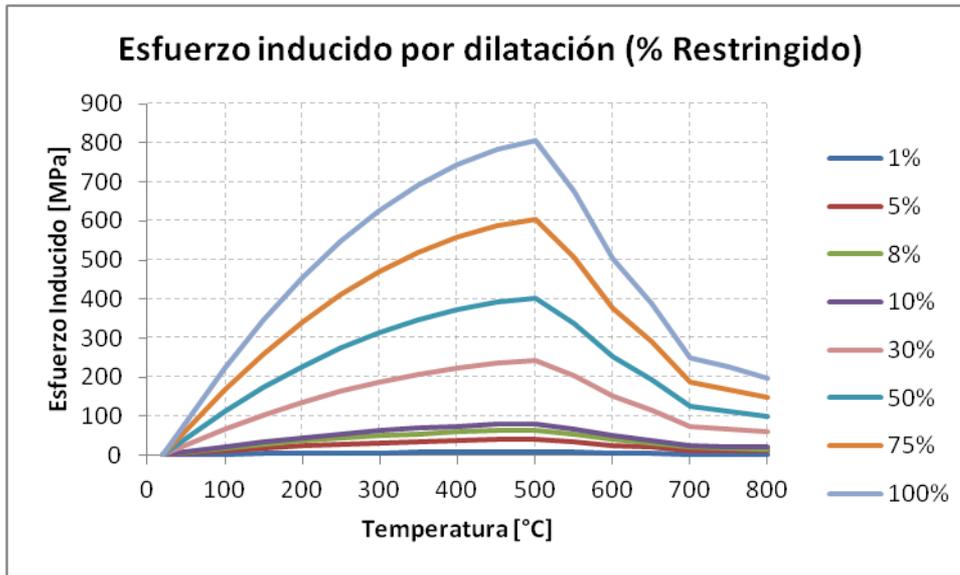
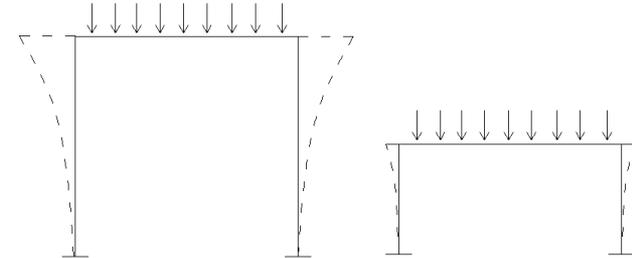
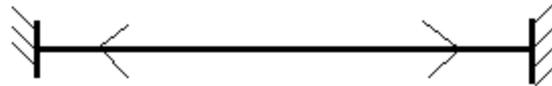
$$\varepsilon = \frac{270MPa}{200.000MPa} = 0.00135 = 1.35 \times 10^{-3}$$

*Sin necesidad de hacer mayores cálculos es posible notar que esto se alcanza en torno a los 100°C. En conclusión, las estructuras siempre se mueven y alivian estos esfuerzos y permiten que diseñemos a temperaturas de entre 500 y 600°C.*



## Propiedades térmicas – Dilatación

- *Compresión inducida por la dilatación*

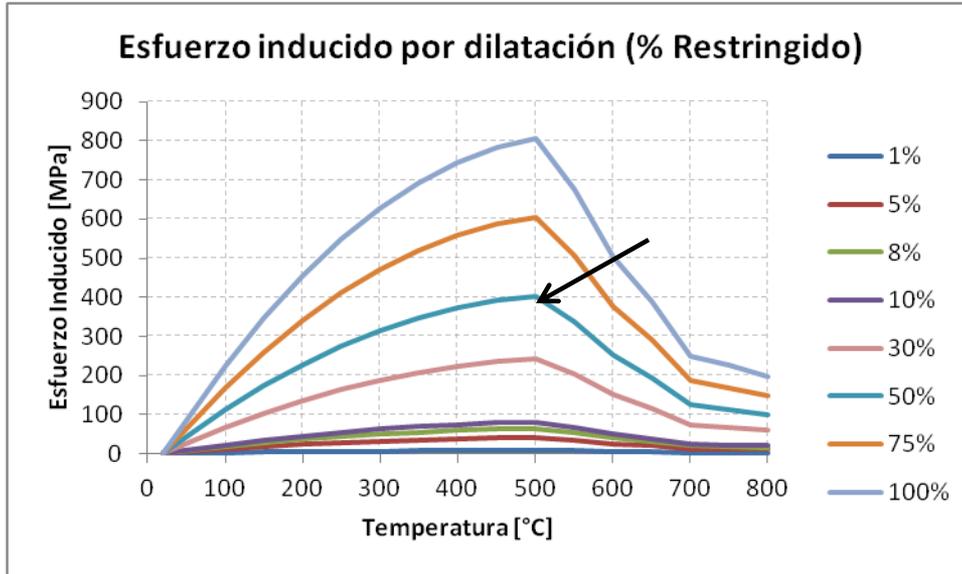


1) Entonces, la compresión inducida depende de las **estructuras circundantes** y de **cuan flexibles o rígidas son**.

2) Por otro lado, **a medida que aumenta la dilatación decrece E**, luego, la compresión inducida corresponde a un **balance entre ambos**.



# Propiedades térmicas – Dilatación restringida



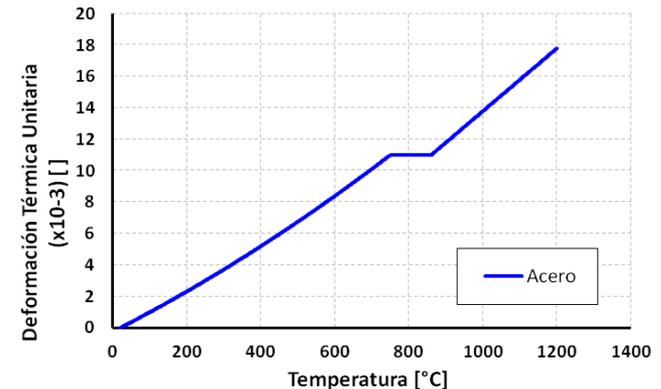
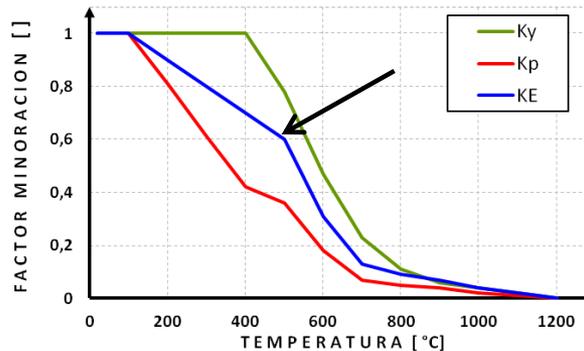
El balance es simple y responde a la ley de Hooke.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

a) 
$$\sigma = [E(T)] [\alpha \cdot \Delta T] \cdot \% \text{ Restr.}$$

b) 
$$\sigma = \frac{E(T) \cdot \alpha \cdot \Delta T}{\left(1 + \frac{EA}{K_r \cdot L}\right)}$$
 *Kr es la rigidez de la estructura circundante.*

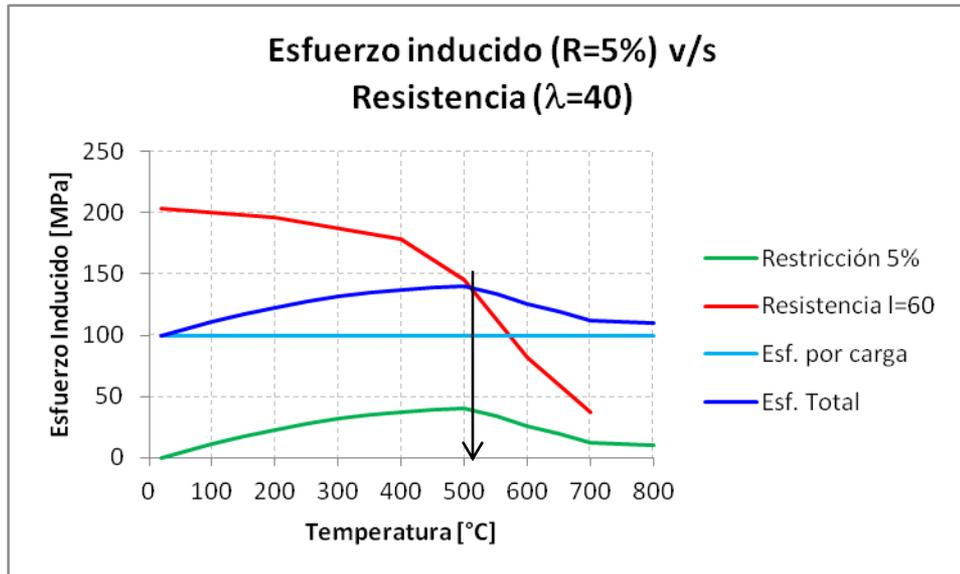
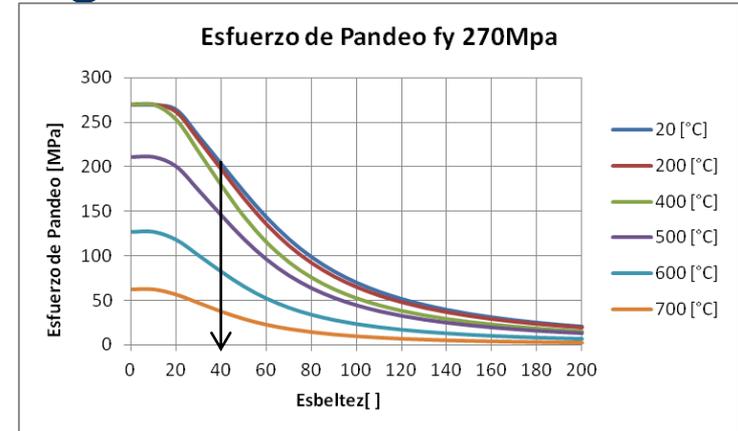
A partir de los 500°C el módulo de Young decrece a una tasa mayor. Es causa que disminuya el esfuerzo inducido.





# Propiedades térmicas – Dilatación restringida

**Problema 1 de columnas: Estacionamientos**  
 Perfil 150x150x4  
 $\lambda=40$   
 Esfuerzo impuesto por las cargas 100 MPa  
 Restricción razonable 5%.



En general, para problemas usuales, la  $T^\circ$  de diseño que uno puede calcular oscila entre 500 y 570°C, muy cercano a los especificado en las normas.

La  $T^\circ$  crítica puede ser mayor en elementos sobredimensionados, elementos sísmicos, o elementos diseñados para otros eventos no simultáneos a un incendio.



## **ANÁLISIS TÉRMICO**

*Incendios de Diseño y Transferencia de calor*



## Diseño de protección estructural





## Análisis Térmico - Masividad

- *¿Qué es la masividad? ¿Por qué es importante?*

*El cambio de energía que experimenta un cuerpo por un aumento de temperatura está dado por:*

$$\Delta U = M \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (1)$$

*Los responsables, en caso de incendio, de este cambio de energía son los flujos de calor que provienen del incendio, los que se definen de la siguiente forma:*

$$\dot{q}''_{Total} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_{incen}^4 - T_{acero}^4) + h \cdot (T_{incen} - T_{acero})$$

$$\Delta U = A_{sup} \cdot (\dot{q}''_{Rad} + \dot{q}''_{Conv}) \cdot \Delta t \quad (2)$$

*Igualando (1) con (2)*

$$M \cdot C_p \cdot \Delta T = A_{sup} \cdot (\dot{q}''_{rad} + \dot{q}''_{conv}) \cdot \Delta t$$



## Análisis Térmico - Masividad

Reemplazando Masa = densidad · volumen, tenemos:

$$V \cdot \rho \cdot Cp \cdot \Delta T = A_{\text{sup}} \cdot (\dot{q}''_{\text{rad}} + \dot{q}''_{\text{conv}}) \cdot \Delta t$$

Despejando:

$$\Delta T = \frac{A_{\text{sup}}}{V \cdot \rho \cdot Cp} \cdot (\dot{q}''_{\text{rad}} + \dot{q}''_{\text{conv}}) \cdot \Delta t \quad (3)$$

Por Geometría:

$$A_{\text{sup}} = P \cdot l$$

$$V = A_s \cdot l$$

$$\Delta T = \frac{P}{A_s \cdot \rho \cdot Cp} \cdot (\dot{q}''_{\text{rad}} + \dot{q}''_{\text{conv}}) \cdot \Delta t$$

**Observaciones:**

- 1) En definitiva la Masividad corresponde a un factor de proporcionalidad entre la energía liberada por el incendio y la absorbida por el perfil.
- 2) Este parámetro por corresponde a la porción geométrica del parámetro completo ( $A/V \cdot \rho \cdot Cp$ ) y es proporcional a velocidad de calentamiento.

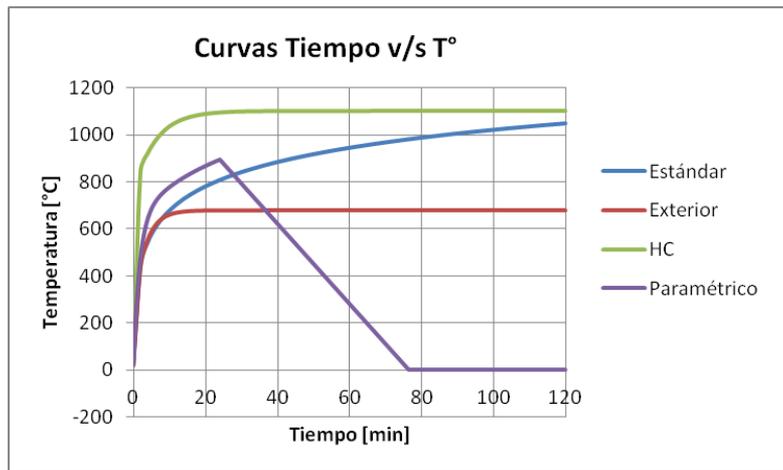
$$m = \frac{P}{A_s} [m^{-1}]$$



## Transferencia de calor

### Curvas de Incendio EN 1991- 1.2:2002 (Eurocódigo 1)

*Curvas Standard y Curvas Paramétricas*



$$T_{Standard} = 20 + 345 \cdot \log(8 \cdot t + 1)$$

$$T_{Exterior} = 20 + 660 \cdot (1 - 0.687 \cdot e^{-0.32t} - 0.313 \cdot e^{-3.8t})$$

$$T_{Exterior} = 20 + 1080 \cdot (1 - 0.325 \cdot e^{-0.167t} - 0.675 \cdot e^{-2.5t})$$

Caso	h [W/m²K]	Emisividad media [ ]
Standard	25	0.8
Exterior	25	
Hidrocarburos	50	

*Las curvas paramétricas consideran las propiedades del recinto, la carga combustible presente y la ventilación asociada. Por esta razón presentan etapa de decaimiento, lo que las hace más realistas. Los parámetros de transferencia de calor utilizados son los mismos que para un incendio estándar.*



## Ecuaciones de transferencia de calor: Perfil Desprotegido

*T° de acero desprotegido:*

$$\Delta T = \frac{P / A_s}{\rho \cdot Cp\_acero} \cdot (\sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_f^4 - T_a^4) + h \cdot (T_f - T_a)) \cdot \Delta t$$

Donde.

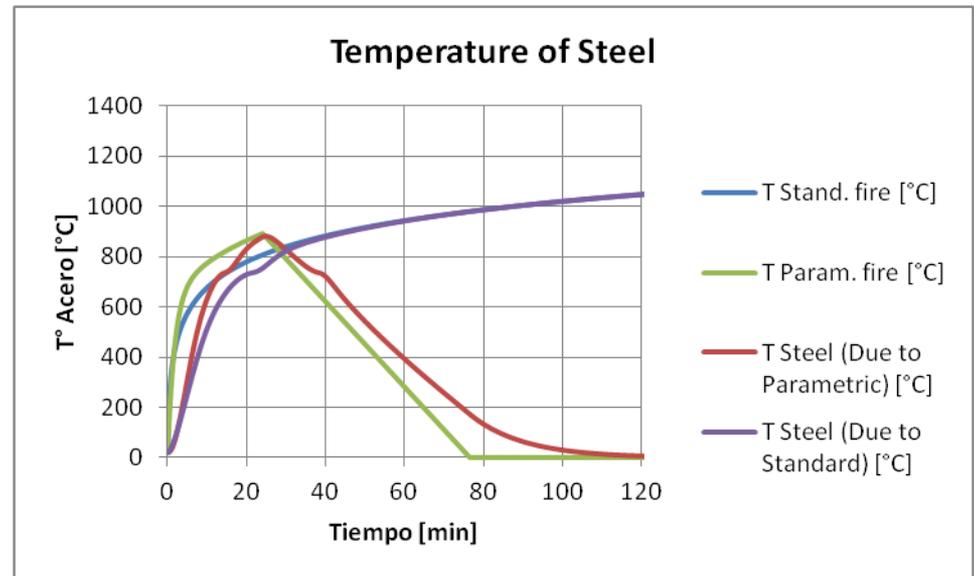
*P/As: Masividad del elemento [m<sup>-1</sup>]*

*Cp\_acero: Calor específico del acero [J/Kg K]*

*ρ: Densidad del acero 7850 [kg/m<sup>3</sup>]*

*Δt: Intervalo de tiempo utilizado, no superior a 30[s]*

*La temperatura del acero desprotegido al cabo de 20 minutos es muy similar a la del incendio.*



*Respuesta de acero protegido bajo curva estándar y bajo curva paramétrica. Perfil de masividad 150 [m<sup>-1</sup>] (Perfil Pesado).*



## Ecuaciones de transferencia de calor: Perfil Protegido (Con Masa)

EN1993-1-2 Punto 4.2.5

*T° de acero protegido con materiales CON masa:*

$$\Delta T_{Acero} = \frac{\lambda_p \cdot A_p / V}{d_p c_a \rho_a} \cdot \frac{(T_f - T_a)}{(1 + \phi / 3)} \cdot \Delta t - (e^{\phi / 10} - 1) \cdot \Delta T_f \quad \phi = \frac{C_p \cdot \rho_p \cdot d_p \cdot A_p / V}{C_a \rho_a}$$

Donde.

$\lambda_p$ : Conductividad de la protección [W/mK]

$d_p$ : Espesor de protección [m]

$C_p$ : Calor específico de la protección [J/Kg K]

$\rho_p$ : Densidad de la protección [kg/m<sup>3</sup>]

$A_p/V$ : Masividad del elemento [m<sup>-1</sup>]

$C_a$ : Calor específico del acero [J/Kg K]

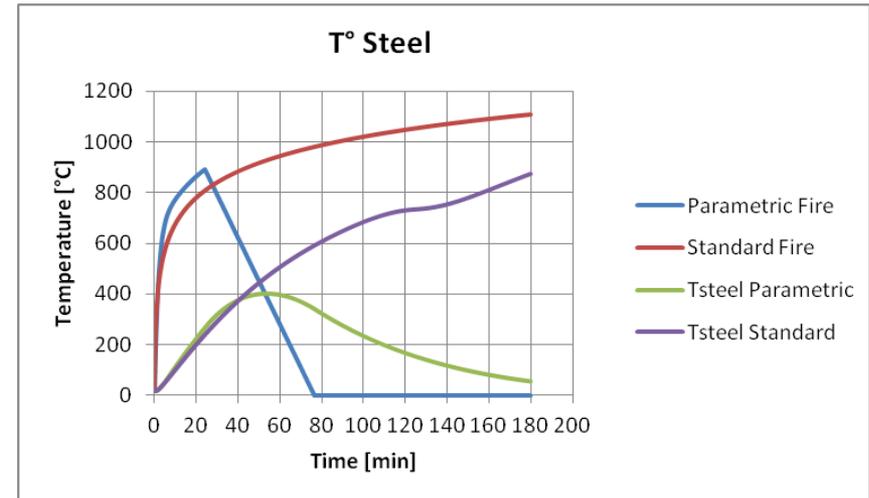
$\rho_a$ : Densidad del acero 7850 [kg/m<sup>3</sup>]

$\Delta t$ : Intervalo de tiempo utilizado, no superior a 30[s]

$T_f$ : Temperatura de incendio [°C]

$T_a$ : Temperatura del acero [°C]

$\Delta T_f$ : Aumento de la temperatura del incendio entre los pasos  $i$  e  $(i-1)$ .



*Respuesta de acero protegido bajo curva estándar y bajo curva paramétrica. Aquí los desfases entre curvas son considerables.*



## Ecuaciones de transferencia de calor: Perfil Protegido (Sin Masa)

*T° de acero protegido  
 con materiales SIN  
 masa:*

$$\Delta T_{Acero} = \frac{A_p / V}{c_a \rho_a} \cdot \frac{\lambda_p}{d_p} (T_f - T_a) \cdot \Delta t$$

Donde.

$\lambda_p$ : Conductividad de la protección [W/mK]

$d_p$ : Espesor de protección [m]

$A_p/V$ : Masividad del elemento [ $m^{-1}$ ]

$c_a$ : Calor específico del acero [J/Kg K]

$\rho_a$ : Densidad del acero 7850 [ $kg/m^3$ ]

$\Delta t$ : Intervalo de tiempo utilizado, no superior a 30[s]

$T_f$ : Temperatura de incendio [°C]

$T_a$ : Temperatura del acero [°C]

### **Observación:**

*Esta expresión es idéntica a la de acero desprotegido, pero en vez de considerar Convección y Radiación, asume como calor incidente, una componente conductiva a través del aislante. Aquí se asume que la T° de la cara expuesta del aislante es igual a la del incendio.*

Acero Desprotegido

Acero Protegido



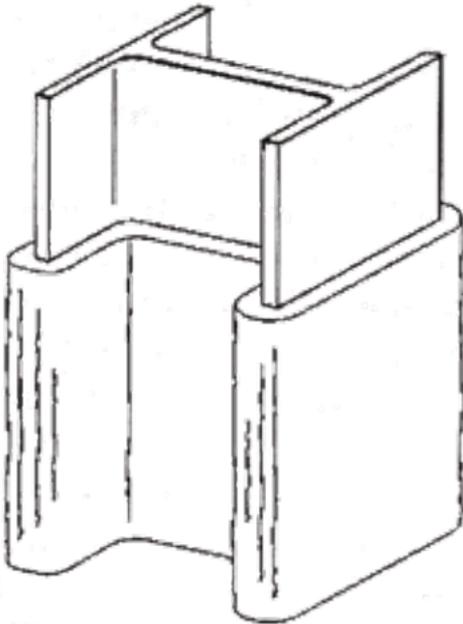
## Sistema de Protección

### *Materiales*



## Tipos de protección

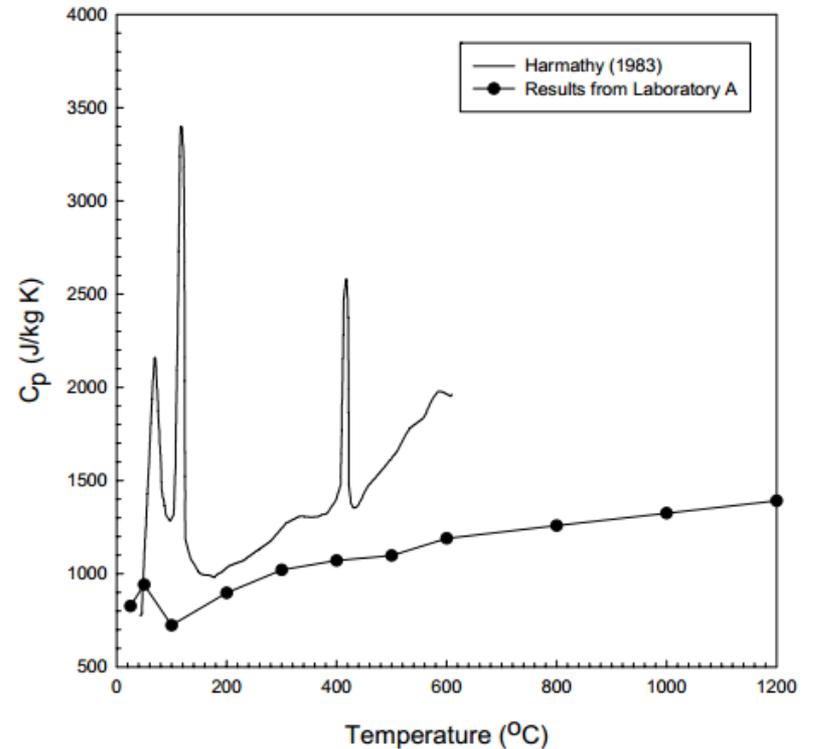
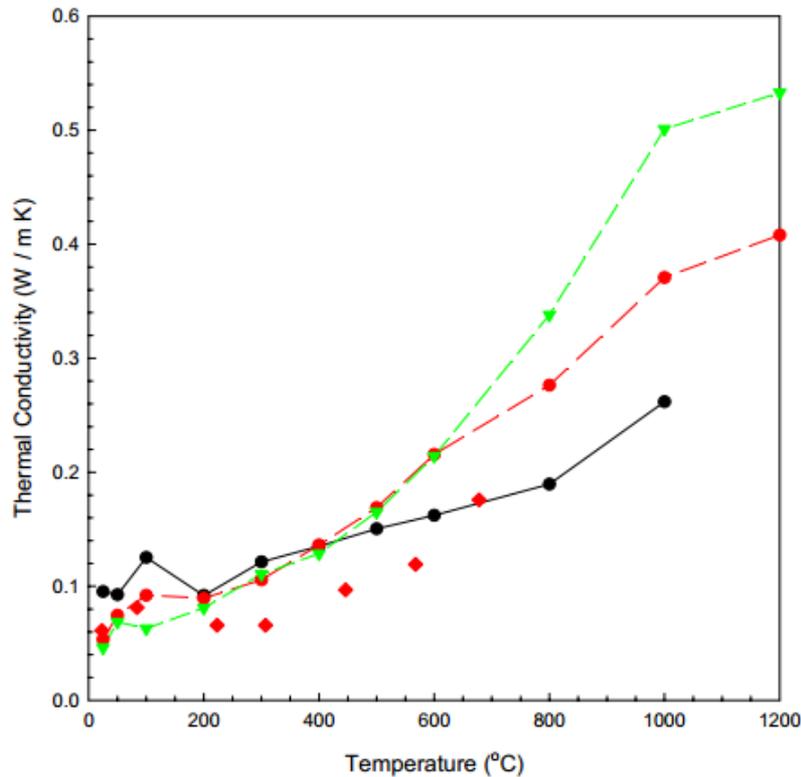
- *Morteros proyectados*
  - *Puede presentar variación en su densidad*
  - *Puede desprenderse por golpes*
  - *Aplicación suele ser sucia*





## Tipos de protección

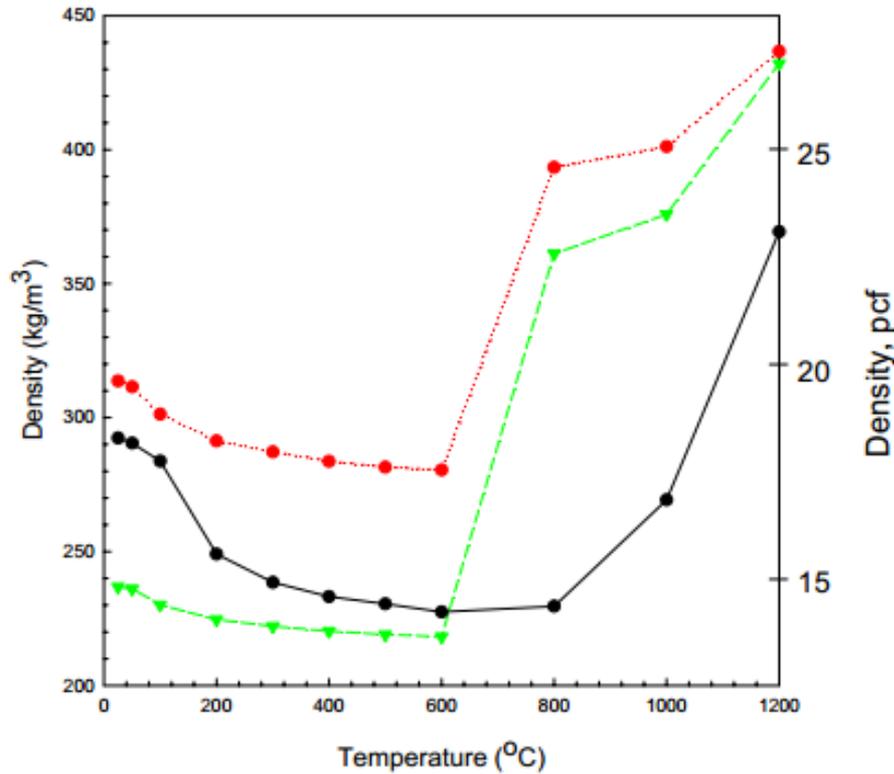
• *Conductividad y Cp según NIST (<http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build05/PDF/b05035.pdf>)*





## Tipos de protección

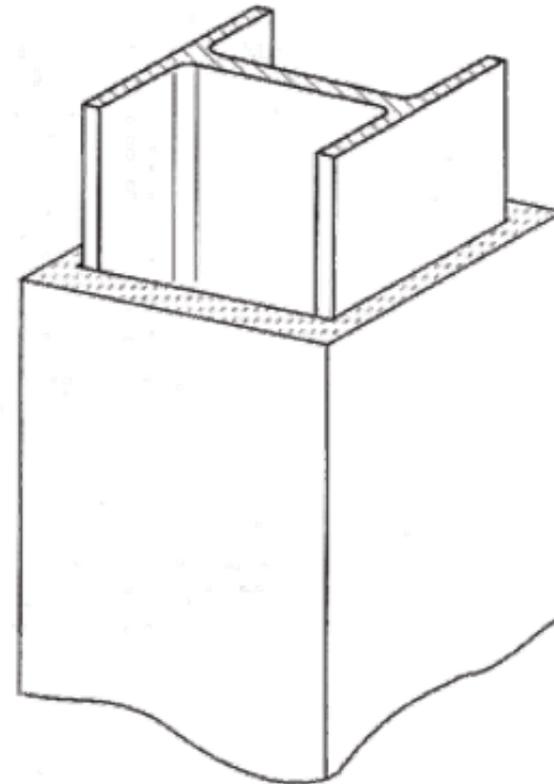
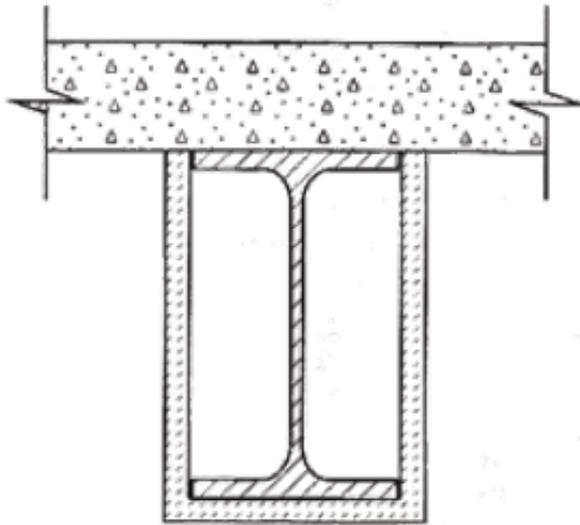
• Densidad según NIST (<http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build05/PDF/b05035.pdf>)





## Tipos de protección

- *Encajonamientos y revestimientos (lanas, mantas)*
  - *Construcción debe ser supervisada*
  - *Las juntas deben ser cuidadosas*
  - *Pueden desprenderse por golpes*





## Tipos de protección

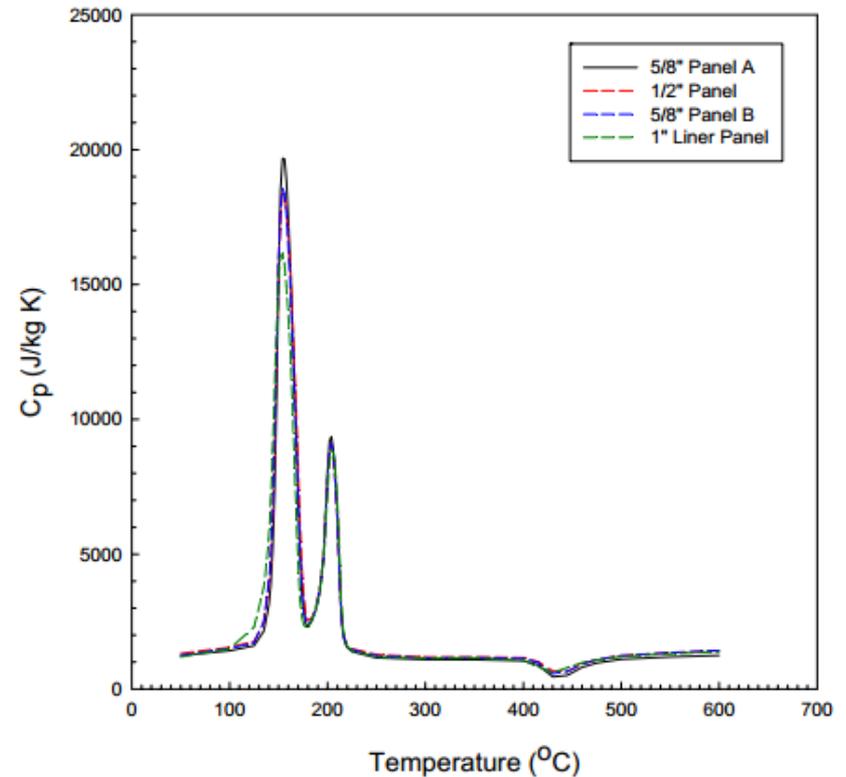
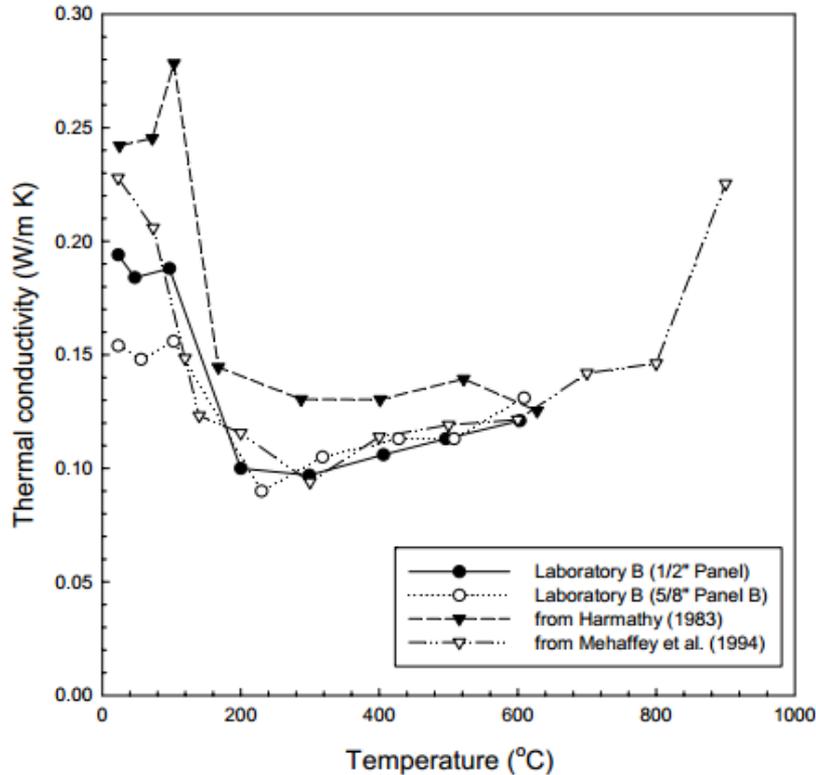
- *Encajonamiento con yeso*





## Tipos de protección

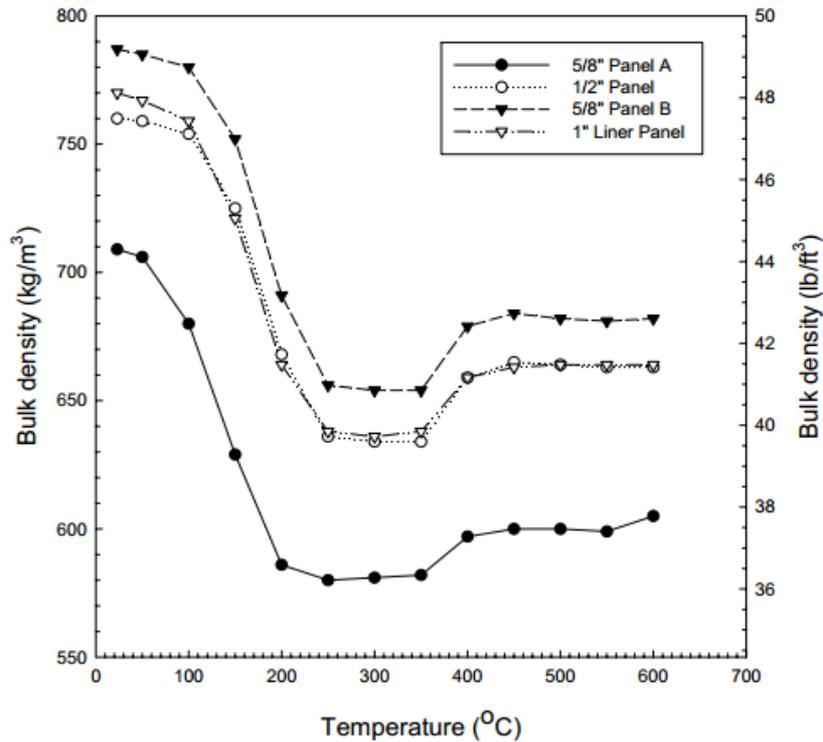
• *Conductividad y Cp para yeso (<http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build05/PDF/b05035.pdf>).*





## Tipos de protección

- Densidad según NIST (<http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build05/PDF/b05035.pdf>).





## Tipos de protección

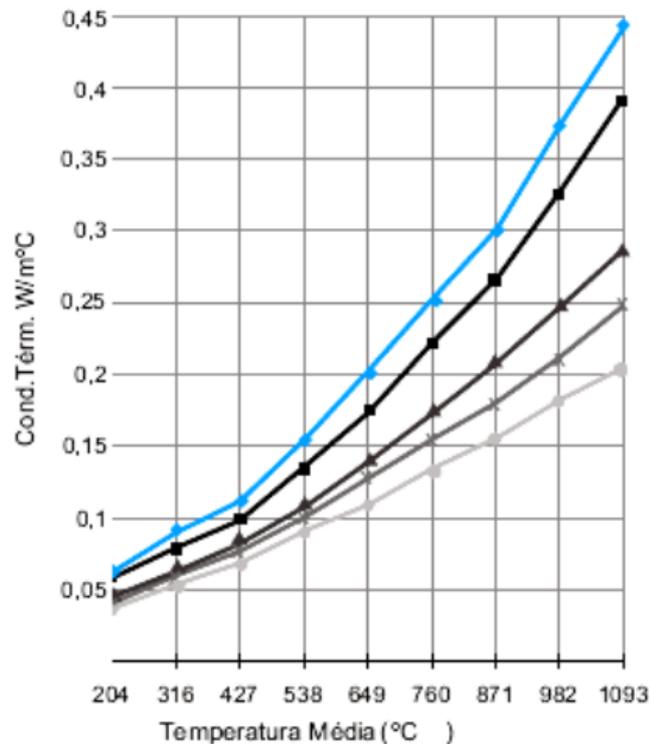
- *Encajonamientos: Ejemplo cercha con manta cerámica*





## Tipos de protección

- *Conductividad para mantas según Unifrax*  
 (<http://www.unifrax.com.br/pdf/Manta%20Durablanket.pdf>).



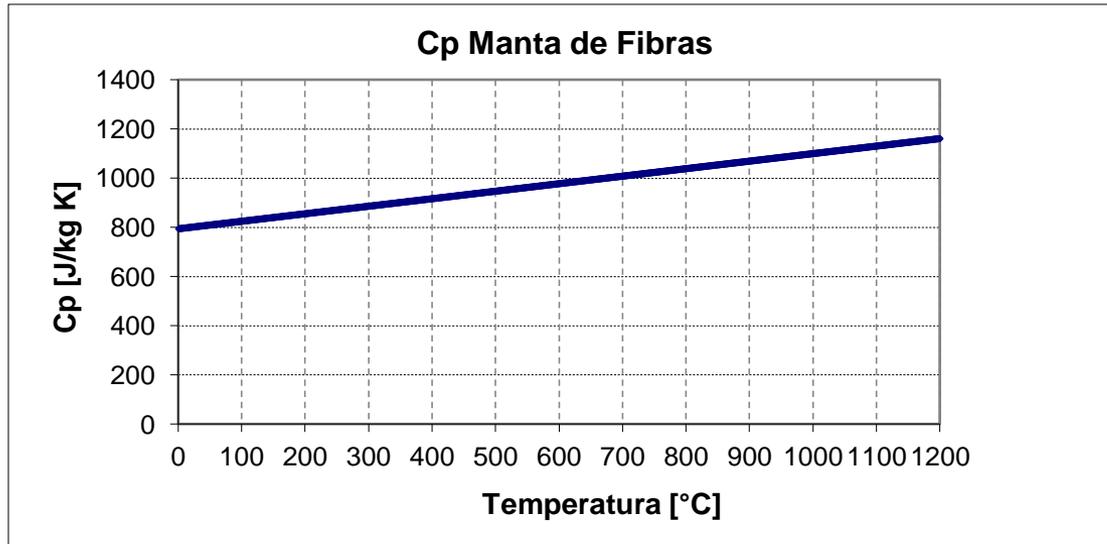
- ◆ Manta B4 - 64 kg/m<sup>3</sup>
- Manta B6 - 96 kg/m<sup>3</sup>
- ▲ Manta B8 - 128 kg/m<sup>3</sup>
- ✕ Manta B10 - 160 kg/m<sup>3</sup>
- Manta B12 - 192 kg/m<sup>3</sup>

\*\* Todos os valores foram calculados baseados em fator de emissividade 0,9, temperatura ambiente de 27 zero de velocidade de vento. Todos os valores condutividade térmica dos materiais Fiberfrax fo medidos de acordo com os procedimentos de teste AS C-177. Variações em qualquer um destes fatores resultar numa significativa diferença em relação aos da acima fomecidos.



## Tipos de protección

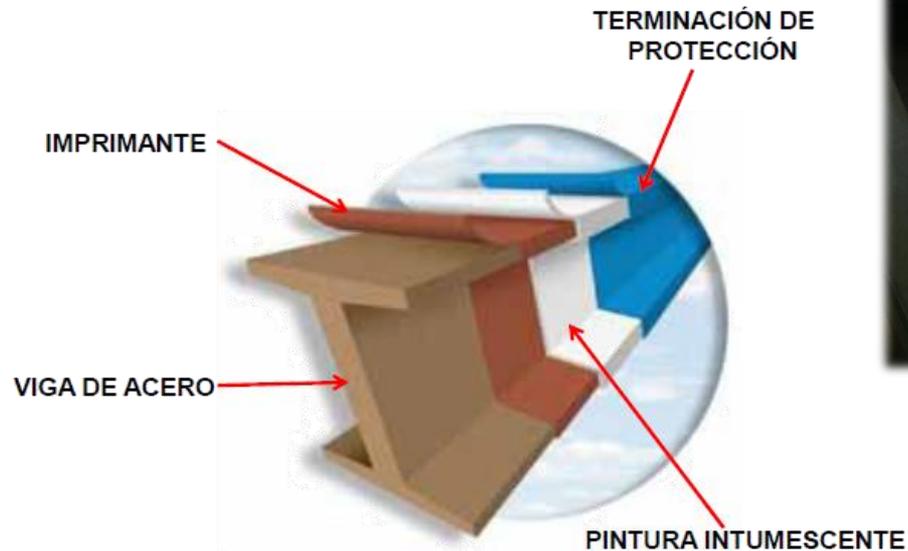
- *Cp aproximado para mantas y lanas.*





## Tipos de protección

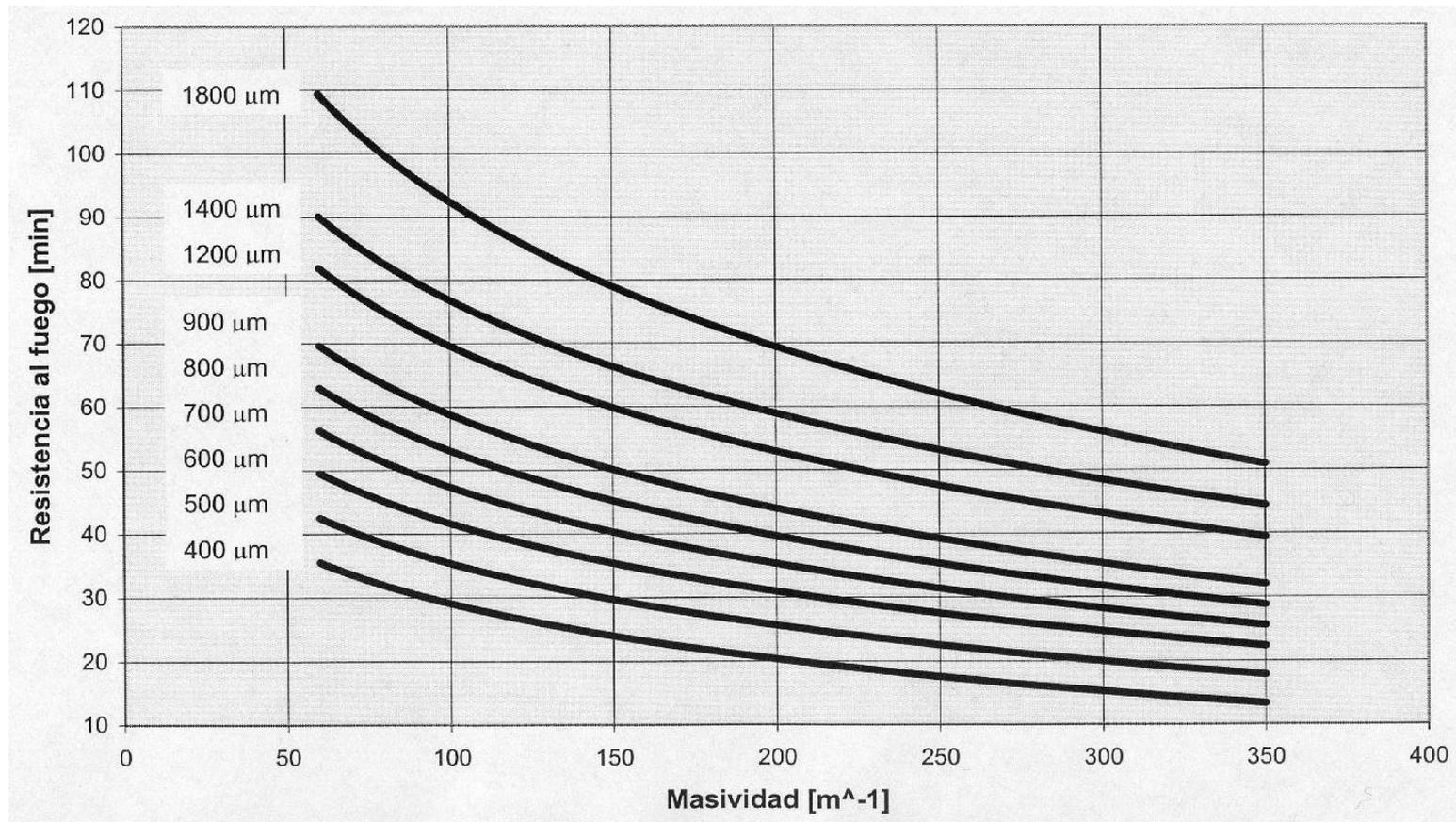
- *Pintura intumescente*
  - *Se debe controlar el ambiente donde se aplica*
  - *Duración limitada*
  - *No utiliza espacio extra*
  - *Terminación arquitectónica*
  - *Cálculo tabulado (listado oficial)*





## Tipos de protección

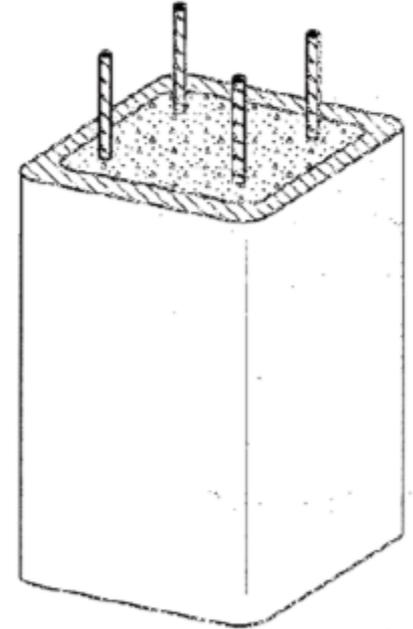
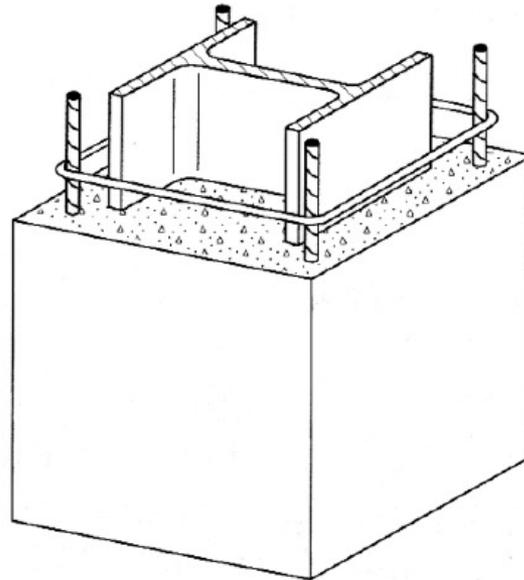
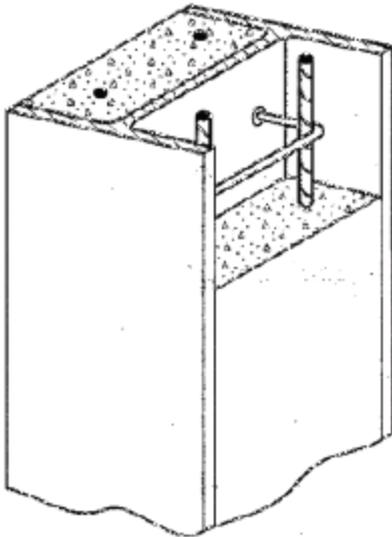
- *Pintura intumescente (Una Marca X en particular)*





## Tipos de protección

- *Hormigón: relleno y envolvente*
  - *Previene pandeo local*
  - *Sumidero de calor*
  - *Faena húmeda*
  - *Puede necesitar armadura*





**NOMBRE CURSO:**                    **Acero estructural**  
**Análisis a temperaturas elevadas**

*Nombre Profesor: Marcial Salaverry R.*

*Contacto:*

*marcial.salaverry@e3ingenieria.cl*

*(+569) 9962 3596*