

NTP 200: Estructuras metálicas: comportamiento frente al fuego (I)



Structures métalliques: conduite devant le feu
Steel structures: fire behavior

Las NTP son guías de buenas prácticas. Sus indicaciones no son obligatorias salvo que estén recogidas en una disposición normativa vigente. A efectos de valorar la pertinencia de las recomendaciones contenidas en una NTP concreta es conveniente tener en cuenta su fecha de edición.

Redactor:

Santiago González García
Arquitecto Técnico

GABINETE TÉCNICO PROVINCIAL DE TOLEDO

Por motivos editoriales las tablas a las que se hace referencia a NTP-201.

Introducción

Si bien es cierto que la principal amenaza para los ocupantes de un edificio en el que se ha declarado un incendio viene representada por el humo y los gases desprendidos (que son los que ocasionan el 90% de las muertes entre los ocupantes), también es cierto que el colapso de los elementos estructurales y el consiguiente derrumbe del edificio representa un peligro gravísimo para el personal de extinción. Todos los años y en todo el mundo se producen muertes de bomberos por esta causa. De aquí la importancia del tema.

Es necesario aclarar primero algunos conceptos relacionados con el tema.

Incendio normalizado

Las normas ISO 834 y UNE 23093 fijan los criterios para determinar la resistencia al fuego de los diferentes tipos de estructuras y elementos de la construcción. En el incendio tipo o incendio normalizado que consideran, la variación de la temperatura dentro del horno o sector de incendio responde a la ecuación:

$$T_h^L - T_h^0 = 345 \log_{10} (8t + 1)$$

siendo t el tiempo en minutos transcurridos.

Incendio real

Un incendio real difiere notablemente en su desarrollo (curva tiempos-temperatura) del llamado incendio normalizado.

Intervienen dos parámetros fundamentales:

- Carga de fuego.
- Superficie abierta de ventilación o factor de aberturas.

También es importante la naturaleza de las paredes que delimitan el sector de incendio.

Carga de fuego

La carga de fuego debida al mobiliario o a otros elementos almacenados es, según la NBE-CP1/82:

$$Q = \frac{\sum R_i H_i}{A} \cdot R_a \text{ (Mcal/m}^2\text{)}$$

Para una rápida valoración de Q en función del tipo de local o utilización del mismo pueden emplearse las tablas dadas en las NTP-36

y NTP-37.

Téngase en cuenta que en este caso A corresponde a la superficie (m²) en planta del sector considerado. Habría que tener en cuenta además la carga de fuego representada por revestimientos de suelo y paredes en el caso de ser combustibles.

Lo correcto es definir la carga de fuego Q de un sector de incendio como la energía por unidad de superficie interior S, y no por la unidad de superficie en planta (considerando además que vamos a tener en cuenta el factor de aberturas o de ventilación).

Las tablas que acompañan esta NTP consideran la superficie total interior (paredes, suelo y techo).

Factor de aberturas

La magnitud de un incendio es función de la cantidad de combustible disponible, pero la temperatura máxima alcanzada no es sólo proporcional a la carga de fuego inicial, pues intervienen dos factores más: el oxígeno disponible y la pérdida de calorías por las aberturas.

El factor de aberturas es definido por la expresión:

$$\frac{S_a \sqrt{h_a}}{S}$$

Siendo:

S_a = Superficie de aberturas (m²).

S = Superficie interior (m²).

$$h_a = \frac{\sum S_{ai} \cdot h_{ai}}{\sum S_{ai}}$$

Para alcanzar la máxima temperatura debe producirse un equilibrio entre la aportación de oxígeno y la salida de calorías. Para los diferentes incendios ensayados, la temperatura máxima se obtiene con un factor de aberturas de 0,055 m^{1/2}.

Por encima y por debajo se produce una bajada de temperatura, si bien es cierto que por debajo el incendio se prolonga más en el tiempo, pudiendo tener peores efectos en la estructura.

El acero de los incendios

El acero estructural tiene muy buenas cualidades, como son su alta resistencia, homogeneidad en la calidad y fiabilidad de la misma, soldabilidad, etc., necesitando poca inspección y pudiéndose hacer ésta a posteriori (al contrario que el hormigón armado), resultando en definitiva fácil y rápido el montaje de las estructuras.

El acero da una falsa sensación de seguridad al ser incombustible, pero sus propiedades mecánicas fundamentales se ven gravemente afectadas por las altas temperaturas que pueden alcanzar los perfiles en el transcurso de un incendio.

Temperatura en los elementos de acero

La temperatura que alcanza un perfil o elemento estructural de acero sin protección es función de:

La carga de fuego Q.

El factor de aberturas $\frac{S_a \sqrt{h_a}}{S}$

El factor de forma f.

El coeficiente de emisividad e_r .

La carga de fuego y el factor de aberturas ya han sido definidos; el factor de forma de un perfil es la relación entre el perímetro (m) expuesto al fuego y la sección (m²) del perfil (tablas T-2 y T-3).

El coeficiente de emisividad es un factor que depende de la posición del perfil con respecto a las llamadas (tabla T-1).

En función de estos factores se ha tabulado la temperatura máxima aproximada alcanzada por un perfil, según sean los casos, en las tablas T-4 y T-5.

En el caso práctico resuelto al final se aclara la forma de proceder.

Densidad del acero

La densidad del acero es prácticamente independiente de la temperatura. Su valor permanece en 7.850 kg/m³.

Diagrama tensión-deformación

La correspondencia entre tensión aplicada y deformación obtenida se ve alterada con el aumento de temperatura interna del perfil. En los gráficos de la figura 1 puede comprobarse que, por ejemplo, en un acero A-42-b a 600° de temperatura interna, aplicándole una tensión de 400 kg/cm², se obtiene la misma deformación que aplicándole 2.600 kg/cm² a 20° de temperatura.

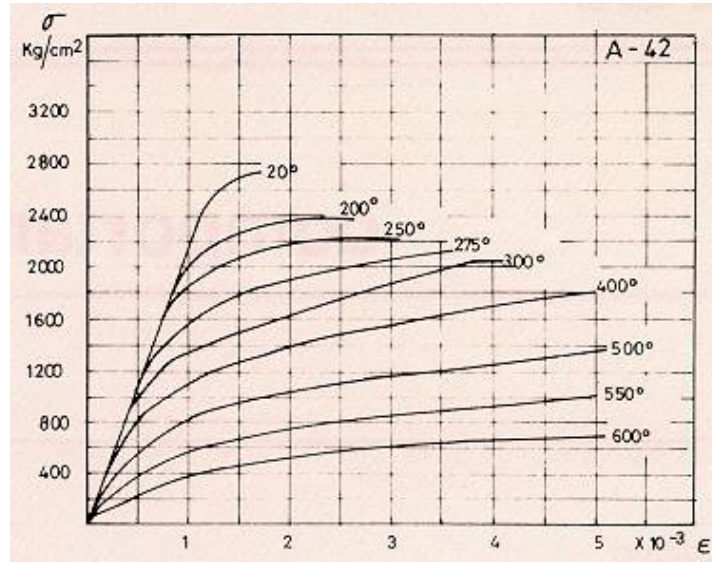


Fig. 1: Diagrama de tensión del acero

Variación del límite elástico

Con el límite elástico (valor de las tensiones de trabajo a partir del cual las deformaciones que sufre la pieza son permanentes y no recuperables una vez cesada la actuación de la carga) ocurre algo parecido: al incrementarse la temperatura del perfil, el límite elástico desciende notablemente.

Puede evaluarse mediante las fórmulas siguientes:

$$\sigma_e^t = \sigma_e \left[1 + \frac{T_p^t}{767 \lg_e \frac{T_p^t}{1750}} \right] \text{ para } 0^\circ \leq T_p^t \leq 600^\circ$$

$$\sigma_e^t = \sigma_e \left[\frac{108 \left(1 - \frac{T_p^t}{1000} \right)}{T_p^t - 440} \right] \text{ para } 600^\circ \leq T_p^t \leq 1000^\circ$$

Siendo:

σ_e = Límite elástico (kg/cm²) a 20°.

σ_e^t = Límite elástico (kg/cm²) a la temperatura T_p^t .

T_p^t = Temperatura del perfil (°C).

A partir de 1.000°C de temperatura interna el acero pierde totalmente sus propiedades mecánicas.

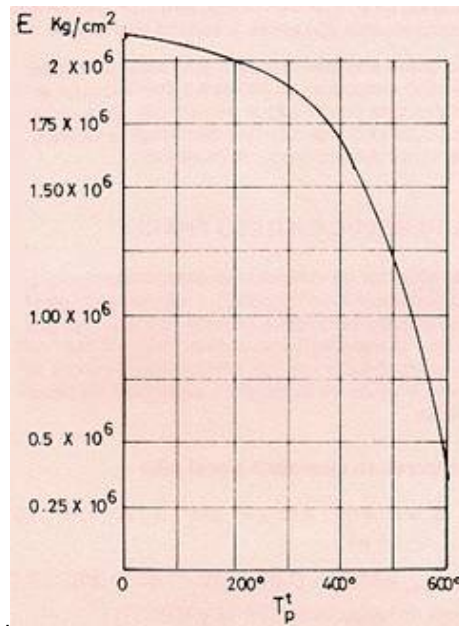
Variación del módulo de elasticidad

La variación del módulo de elasticidad con la temperatura se expresa con la siguiente ecuación:

$$E = 2,1 \times 10^6 [-17,2 \cdot 10^{-12} (T_p^t)^4 + 11,8 \cdot 10^{-9} (T_p^t)^3 - 34,5 \cdot 10^{-7} (T_p^t)^2 + 15,9 \cdot 10^{-5} (T_p^t) + 1] \text{ kg/cm}^2.$$

Esta ecuación es válida para temperaturas del perfil $0^\circ \leq T_p^t \leq 600^\circ \text{ C}$.

En la figura se ha representado gráficamente la evolución del módulo de elasticidad



Variación de la conductividad térmica

La conductividad térmica del acero disminuye con la temperatura hasta los 750°C, permaneciendo prácticamente constante por encima.

Dilatación térmica

Como es bien sabido, un aumento de la temperatura en un elemento de acero provoca un aumento en la longitud del mismo. Este aumento en la longitud puede valorarse por la expresión: $\delta L = \alpha \delta t^\circ L$, siendo α el coeficiente de dilatación, que para el acero vale aproximadamente $1,2 \cdot 10^{-5}$ (es decir $\alpha = 0,000012$).

Si existe libertad de dilatación no se plantean grandes problemas subsidiarios, pero si esta dilatación está impedida en mayor o menor grado por el resto de los componentes de la estructura, aparecen esfuerzos complementarios que hay que tener en cuenta.

Así por ejemplo, en el pórtico representado en la figura 3, el dintel ha experimentado un incremento de temperatura δt° que le ocasiona un incremento total de longitud δL .

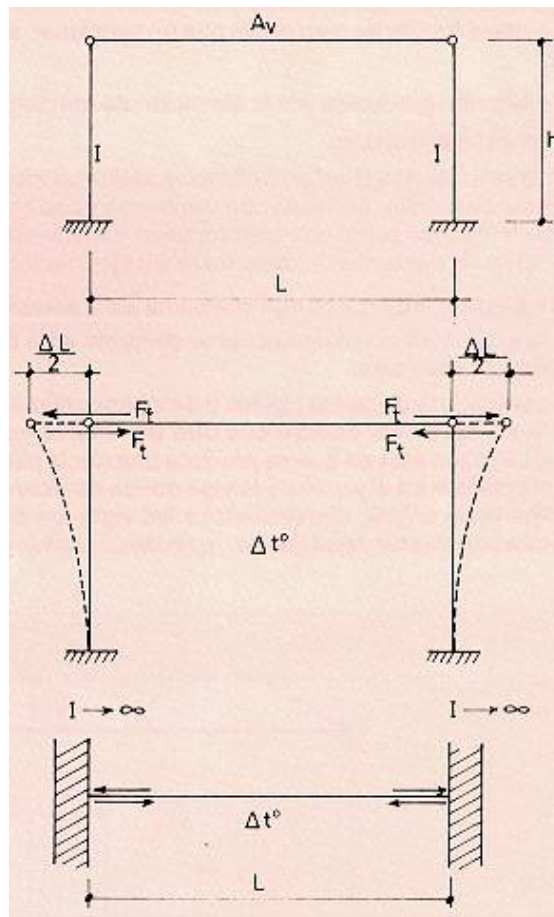


Fig. 3: Esfuerzos provocados en un pórtico por la dilatación térmica del dintel

Los pilares se resisten a este aumento de longitud, lo que provoca un empuje en su cabeza F_t que crea en su base un momento flector $F_t \cdot h$. A su vez la viga sufre un esfuerzo axial de compresión F_t .

El valor de F_t es el siguiente:

$$F_t = \frac{E \frac{\Delta L}{2}}{\frac{L}{2A_v} + \frac{h^3}{3I}}$$

siendo E el módulo de elasticidad del acero, A_v la sección de la viga e I el momento de inercia de los pilares.

Si los pilares son muy rígidos ($I \rightarrow \infty$), o lo que es lo mismo, la dilatación de la viga se ve imposibilitada, la expresión anterior se transforma en:

$$F_t = \frac{E \frac{\Delta L}{2}}{\frac{L}{2A_v}} = \frac{E \Delta L A_v}{L}$$

Sustituyendo δL por su otra expresión $\alpha \delta t^\circ L$, obtenemos

$$F_t = \alpha E \cdot \delta t^\circ \cdot A_v \cdot L$$

Dando valores reales a esta última expresión obtenemos resultados enormemente grandes para F_t , que lógicamente nunca serán alcanzados porque antes cederán los apoyos o la propia viga se doblará.

Conclusiones

Las conclusiones que se derivan de lo expuesto son las siguientes:

- El acero es incombustible, pero el aumento de su temperatura supone importantísimas pérdidas en su capacidad mecánica.
- Suele denominarse **temperatura crítica** aquella en la que la capacidad mecánica del elemento estructural desciende por debajo de la necesaria para soportar las cargas que actúan sobre él.

- En contraposición, **carga crítica** es la que puede soportar un elemento estructural a una determinada temperatura y de acuerdo con el cuadro de capacidades mecánicas que presenta a esa temperatura.
- Que un elemento estructural de acero alcance la temperatura crítica en un tiempo determinado depende, además de factores que consideraremos fijos (carga de fuego, aberturas, etc.), de la superficie que expone al fuego y de la sección o espesor del perfil, denominándose factor de forma a la interrelación entre ambos.
- Por este motivo, piezas de gran sección se muestran más estables (permanecen más tiempo en "pie") que piezas de poca sección, como suelen ser las cerchas, vigas de celosía, etc.
- A igualdad de sección, la absorción de calores más lenta en perfiles tubulares o en cajón que en secciones abiertas.
- La dilatación producida por la elevación de temperatura en elementos lineales puede contribuir al derrumbe o colapso de la estructura.
- Ya se ha visto el caso de un pórtico metálico. Otro caso típico es el de la viga de gran luz apoyada en un muro de fábrica de ladrillo. La dilatación de la viga ocasiona un empuje que se suma a la deformación experimentada por el muro curvándose hacia fuera (fuego interior).
- Otro aspecto importante que interviene en la estabilidad de la estructura considerada como conjunto es la continuidad de la misma.
- Una estructura de nudos rígidos o de vigas continuas resulta siempre más estable que otra puramente isostática. La razón está en que se produce una rótula plástica o articulación en el punto de la viga donde se alcanza la temperatura crítica, convirtiéndose las vigas continuas en una especie de vigas Gerber, quedando posiblemente inutilizadas a efectos de uso posterior, pero permaneciendo en su sitio más tiempo que si se tratasen de vigas simplemente apoyadas, y esto es de lo que se trata.
- El acero enfriado recupera gran parte de su resistencia inicial, aunque es un problema delicado dictaminar si la estructura puede seguir en servicio, siendo en muchas ocasiones la imposibilidad de corregir las deformaciones el factor determinante de desecho.

Resolución caso práctico

Sea el sector de incendio representado en la figura 4, correspondiente a un hospital. La estructura es la representada esquemáticamente en la figura 5. Existen tres plantas de iguales características por encima, siendo la estructura de acero A-42-b con los perfiles supuestamente sin revestir, forjado de hormigón y cerramientos de fábrica de ladrillo.

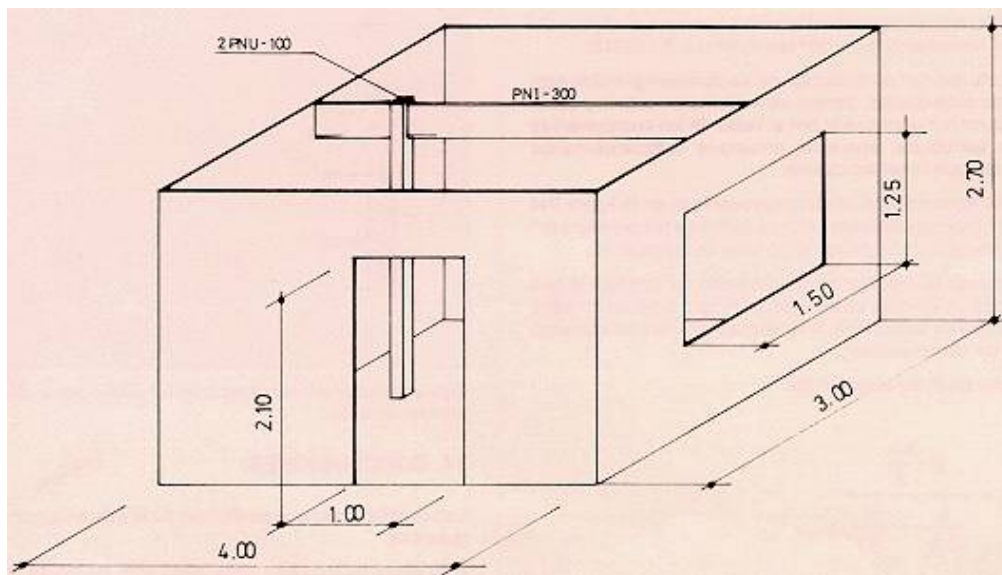


Fig. 4: Sector de incendio en un hospital

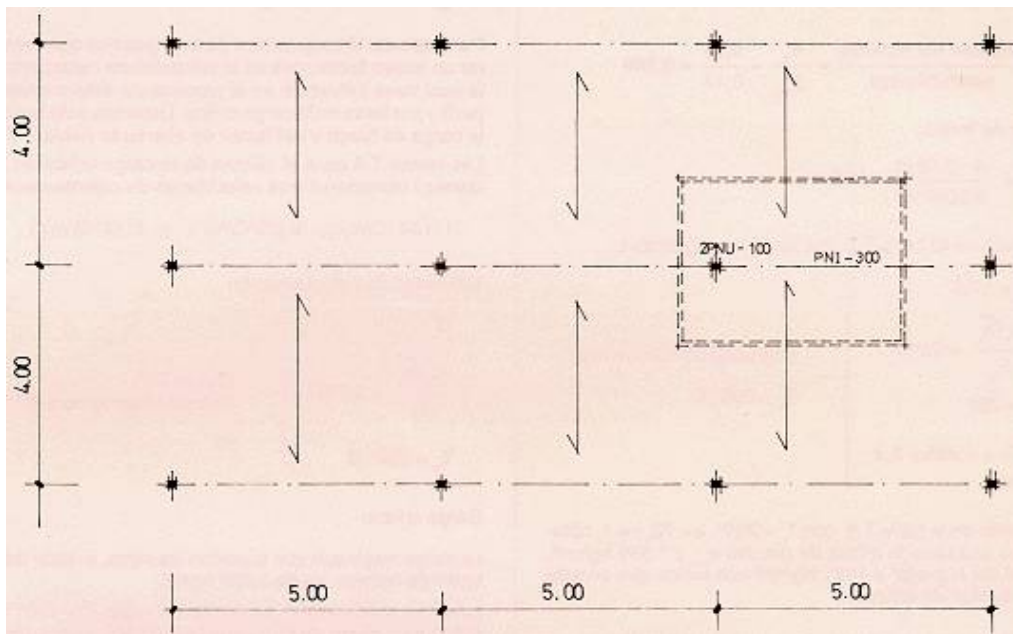


Fig. 5: Esquema de la estructura

Temperatura alcanzada por el pilar

$$S_T = 2 \cdot 4,00 \cdot 2,70 + 2 \cdot 3,00 \cdot 2,70 + 2 \cdot 4,00 \cdot 3,00 = 61,80 \text{ m}^2$$

$$S_{\text{REAL}} = 61,80 - (1,00 \cdot 2,20 + 1,50 \cdot 1,25) = 57,7 \text{ m}^2$$

Carga de fuego (NTP-36 y NTP-37):

$$q_m = 80 \text{ Mcal/m}^2 \cdot c \cdot a$$

$$c \rightarrow \text{III} \rightarrow \text{B} \rightarrow 1$$

$$a \rightarrow 2 \rightarrow \text{B} \rightarrow 1$$

$$q_m = 80 \text{ Mcal/m}^2$$

Considerando el suelo revestido de linóleo:

$$q_{rs} = 1,25 \text{ kg/m}^2 \cdot 5 \text{ Mcal/kg} = 6,25 \text{ Mcal/m}^2$$

$$Q = q_m + q_{rs} = 80 + 6,25 = 86,25 \text{ Mcal/m}^2$$

$$Q_d = \frac{86,25 \text{ Mcal/m}^2 \cdot 4,00\text{m} \cdot 3,00\text{m}}{57,7 \text{ m}^2} = 17,9 \text{ Mcal/m}^2$$

Factor de aberturas:

$$\frac{S_a \sqrt{h_a}}{S_T}$$

$$S_a = 1,00 \cdot 2,20 + 1,50 \cdot 1,25 = 4,07 \text{ m}^2$$

$$S_T = 61,8 \text{ m}^2$$

$$h_a = \frac{2,20 \cdot 2,20 + 1,875 \cdot 1,25}{4,07} = 1,76 \text{ m}$$

$$\frac{4,07 \sqrt{1,76}}{61,8} = 0,087 \text{ m}^{1/2}$$

Factor de forma (2 PNU - 100 en cajón):

$$f = \frac{0,40 \text{ m}}{0,0027 \text{ m}^2} = 148 \text{ m}^{-1}$$

Factor de emisividad:

El pilar está expuesto por todos los lados. De la tabla T-1 obtenemos $e_r = 0,7$.

Entrando con estos datos en la tabla T-4, obtenemos una temperatura máxima alcanzable por el pilar $T_p = 765^\circ \text{C}$.

Carga crítica del pilar

Datos:

2 PNU - 100 en cajón con soldadura continua

$$\sigma_E = 2.600 \text{ kg/m}^2$$

$$P^* = 40.000 \text{ kg}$$

$$I_p = 270 \text{ cm}$$

$$A = 27 \text{ cm}^2$$

$$\lambda = 72 \text{ esbeltez}$$

$$\omega = 1,37$$

$$\gamma = 1 \text{ (ver nota)}$$

$$T_p^t > = 765^\circ \text{C}$$

Utilizando la tabla T-6 obtenemos una tensión crítica de pandeo bastante inferior a 1.000 kg/cm^2 (aproximadamente 500 kg/cm^2), lo que hace inutilizable el pilar en las condiciones descritas.

Esto se debe a que en condiciones normales debe verificarse que:

$$\frac{P^*}{A} \leq \frac{\sigma_E}{\omega}, \text{ es decir}$$

$$\frac{40.000 \text{ kg}}{27 \text{ cm}^2} = 1.481 \text{ kg/cm}^2 \leq \frac{2.600}{1,37} = 1.898 \text{ kg/cm}^2$$

Pero a 765°C , el segundo miembro de la desigualdad ya hemos visto que apenas vale 500 kg/cm^2 .

Ello nos indica que en esas condiciones el pilar no será utilizable, ya que la tensión de trabajo será superior a la crítica.

Si protegemos el pilar con una capa de 4 cm de vermiculita, cuya conductividad a 500° es $\lambda = 0,14 \text{ Kcal/m/m}^2\text{h}^\circ \text{C}$ (tabla T-9), tenemos:

$$\frac{\text{espesor del aislante}}{\text{conductividad}} = \frac{e_m}{\lambda_m} = \frac{0,04}{0,14} = 0,286$$

Factor de forma:

$$f = \frac{4 \cdot 0,18 \text{ m}}{0,0027 \text{ m}^2} = 266$$

Entrando en la tabla T-5 con los datos siguientes:

$$\left. \begin{array}{l} Q = 17,9 \\ \frac{S_a \sqrt{h_a}}{S_T} = 0,087 \\ f = 266 \\ \frac{e_m}{\lambda_m} = 0,286 \cong 0,3 \end{array} \right\} \text{ Interpolando obtenemos: } T_p^t = 200^\circ \text{C}$$

Entrando en la tabla T-6 con $T_p^t = 200^\circ$, $\lambda = 72$, $\gamma = 1$, obtenemos una tensión crítica de pandeo $\sigma_{cri} \approx 1.550 \text{ kg/cm}^2$, que al ser superior a 1481 Kg/cm^2 nos indica que en este caso el pilar es utilizable.

γ es un coeficiente que depende del grado de libertad de dilatación del pilar: $\gamma = 1$ para libertad total y $\gamma = 0$ para dilatación totalmente impedida. Se considera que $0,2 \leq \gamma \leq 0,5$ cuando las vigas son continuas, pasando por encima de la cabeza del pilar.

Temperatura alcanzada por las vigas

Coefficiente de emisividad (tabla T-1):

$$e_r = 0,7$$

Factor de forma (tabla T-2):

$$f = \frac{1,03 - 0,125}{0,00691} = 131$$

$$Q = 17,9$$

$$\frac{S_a \sqrt{h_a}}{S_T} = 0,087$$

$$f = 266$$

$$e_r = 0,7$$

Interpolando en la tabla T-4 obtenemos:
 $T_p^t = 750^\circ \text{ C}$

Carga crítica de las vigas

Para calcular la carga crítica de las vigas hay que considerar un nuevo factor, que es la velocidad de calentamiento, la cual tiene influencia en el proceso de deformación del perfil y por tanto en la carga crítica. Depende este factor de la carga de fuego y del factor de aberturas (tabla T-7).

Las tablas T-8 para el cálculo de la carga crítica en secciones I consideran tres velocidades de calentamiento: I (100°C/min), II (20°C/min) y III (4°C/min).

Velocidad de calentamiento:

$$f = \frac{1,03 - 0,125}{0,00691} = 131$$

$$Q = 17,9$$

$$\frac{S_a \sqrt{h_a}}{S_T} = 0,087$$

$$f = 266$$

$$e_r = 0,7$$

(Tabla T-7)
 Velocidad en torno a 60°/min .

Carga crítica:

La carga mayorada que soportan las vigas, a razón de 756 kg/m^2 de forjado, es de 3.024 kg/ml .

La carga crítica según las tablas T-8, para $T_p^t = 750^\circ$, $V_c \approx 60^\circ\text{C/min}$, carga uniformemente repartida y viga simplemente apoyada, lo que nos da $\beta = 0,3$, será:

$$p = \beta \frac{\sigma_e 8W}{L^2} = 0,3 \frac{2600 \cdot 8 \cdot 653 \text{ cm}^3}{500^2} = 16,3 \text{ kg/cm} = 1,630 \text{ kg/ml} < 3024 \text{ kg/ml}$$

Luego se hace necesario proteger la viga igual que se hizo con el pilar. Se hará recubriéndola con 4 cm de vermiculita (figura 6).

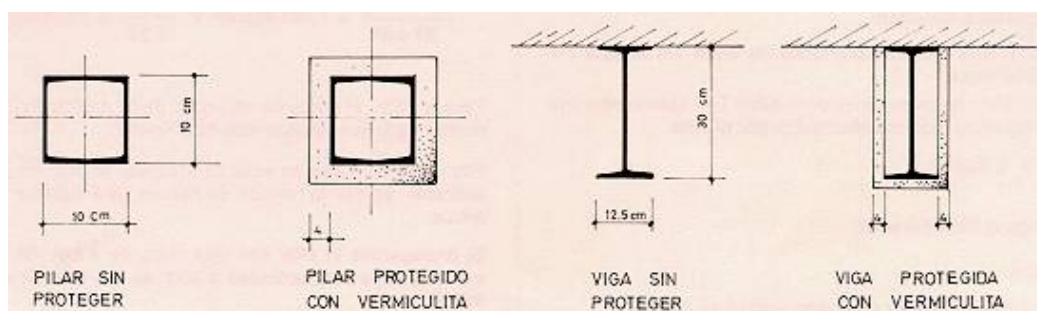


Fig. 6: Protección del pilar y de la viga

$$\frac{e_m}{\lambda_m} = \frac{0,04 \text{ m}}{0,14} = 0,286$$
$$f = \frac{2 \cdot 0,34 + 0,205}{0,00691} = 128$$

Entrando en la tabla T-5 con los valores siguientes:

$$\left. \begin{array}{l} Q = 17,9 \\ \frac{S_a \sqrt{h_a}}{S_T} = 0,087 \\ f = 128 \\ \frac{e_m}{\lambda_m} = 0,286 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Interpolando obtenemos:} \\ T_p^{\ddagger} = 125^{\circ}\text{C} \end{array}$$

A continuación habrá que averiguar la carga crítica para este nuevo valor.

La velocidad de calentamiento según T-7 es de 25° C/minuto (curva II).

Considerando estos nuevos valores en la tabla T-8, obtenemos $\beta \geq 1$, luego la viga cumple perfectamente su cometido.

Bibliografía

(1) HART, F. Y OTROS

Atlas de la Construcción Metálica

Barcelona, Ed. Gustavo Gili, S.A., 1976

(2) ARGUELLES, R.

La estructura metálica hoy

Madrid, Ed. Librería Técnica Bellisco. Vol. 1, 1975

(3) VARIOS AUTORES

La construcción y el fuego

Ed. Mapfre, S.A., 1982

(4) MARCHANT, E. W.

El fuego y los edificios

Ed. Mapfre, S.A.

Nota final: Gran parte de la información que ha servido para redactar esta nota técnica y las tablas (una vez traducidas y adaptadas) que se integran en la NTP n° 201, proceden de ENSIDESA, Dirección de Asistencia a Proyectos.