



Education and Culture DG

Lifelong Learning Programme
LEONARDO DA VINCI



Comportamiento ante el fuego de sistemas de forjado colaborante de acero

Antecedentes del método de cálculo simplificado

Olivier VASSART - Bin ZHAO

Dic. 2010



Contenido de la presentación



- **Comportamiento mecánico de forjados colaborantes en situaciones de incendio**
- **Método de cálculo simplificado de losas de hormigón armado a 20 °C**
 - Modelo de losa de forjado
 - Modos de fallo
- **Método de cálculo simplificado de forjados colaborantes a altas temperaturas**
 - Resistencia de la losa de hormigón con líneas de fluencia plástica
 - Efecto de membrana a altas temperaturas
 - Mejora con la presencia de vigas de soporte de acero



Comportamiento mecánico de los forjados colaborantes

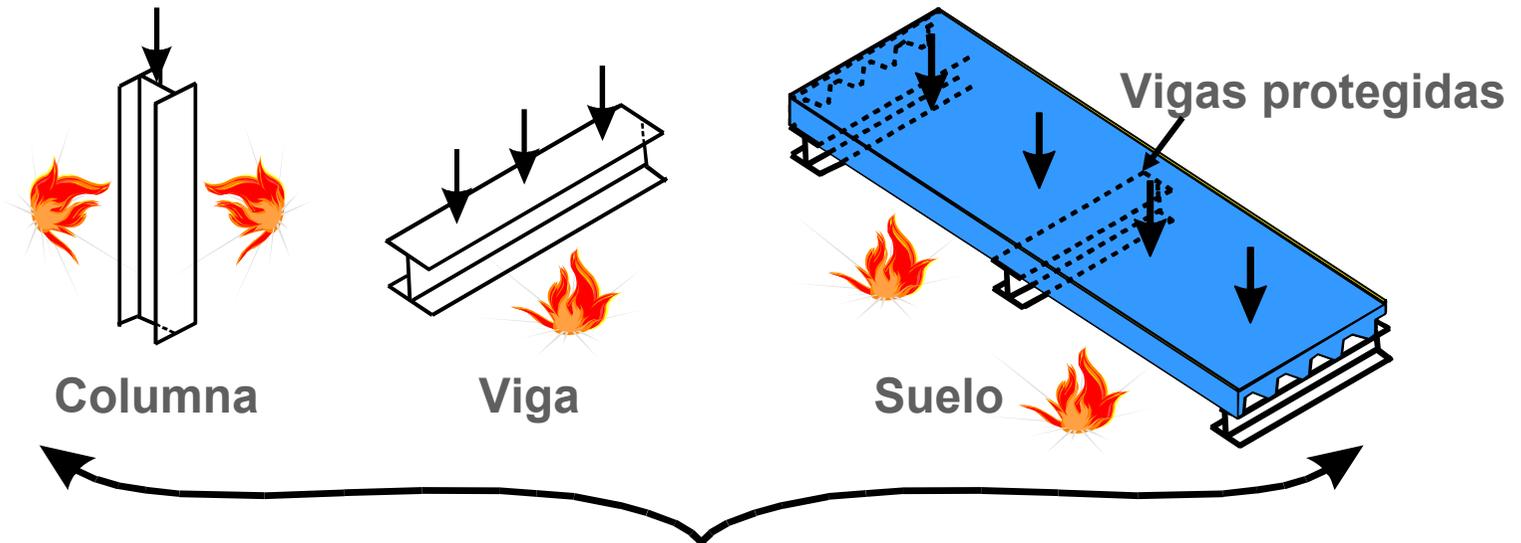


- **Método de diseño tradicional**

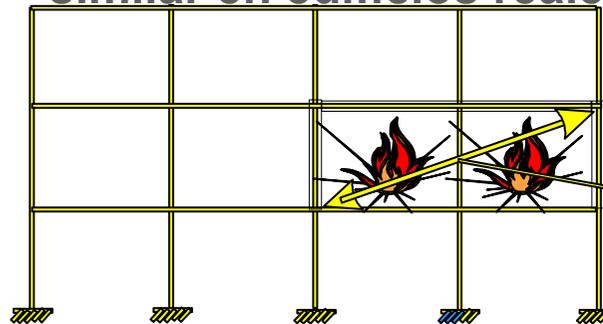
Comportamiento mecánico de los forjados colaborantes

Método de cálculo simplificado de losas de hormigón armado a 20°C

Método de cálculo simplificado de forjados colaborantes a altas temperaturas



Los métodos de diseño existentes dan por supuesto que los elementos aislados tienen un comportamiento similar en edificios reales



Sector de incendio



Comportamiento mecánico de los forjados colaborantes



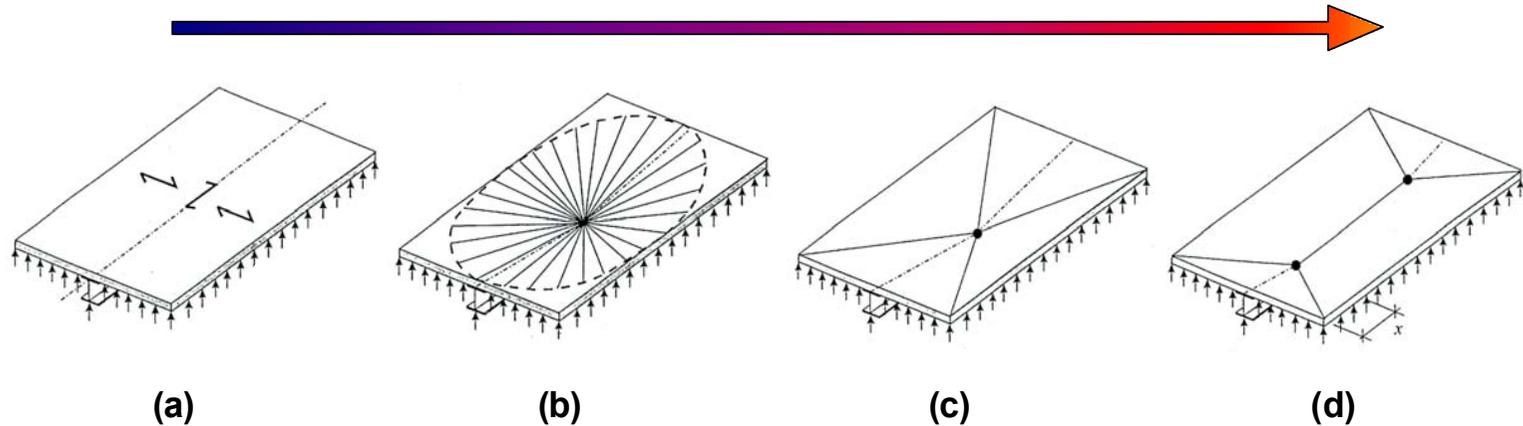
- Comportamiento real en el caso de suelos colaborantes con malla de acero de armadura en interior de losa de hormigón

Comportamiento mecánico de los forjados colaborantes

Método de cálculo simplificado a 20° C

Método de cálculo simplificado a altas temperaturas

Incremento de T durante el incendio



Flexión simple

Comportamiento efecto membrana



Método de cálculo simplificado de losas de hormigón armado a 20 °C

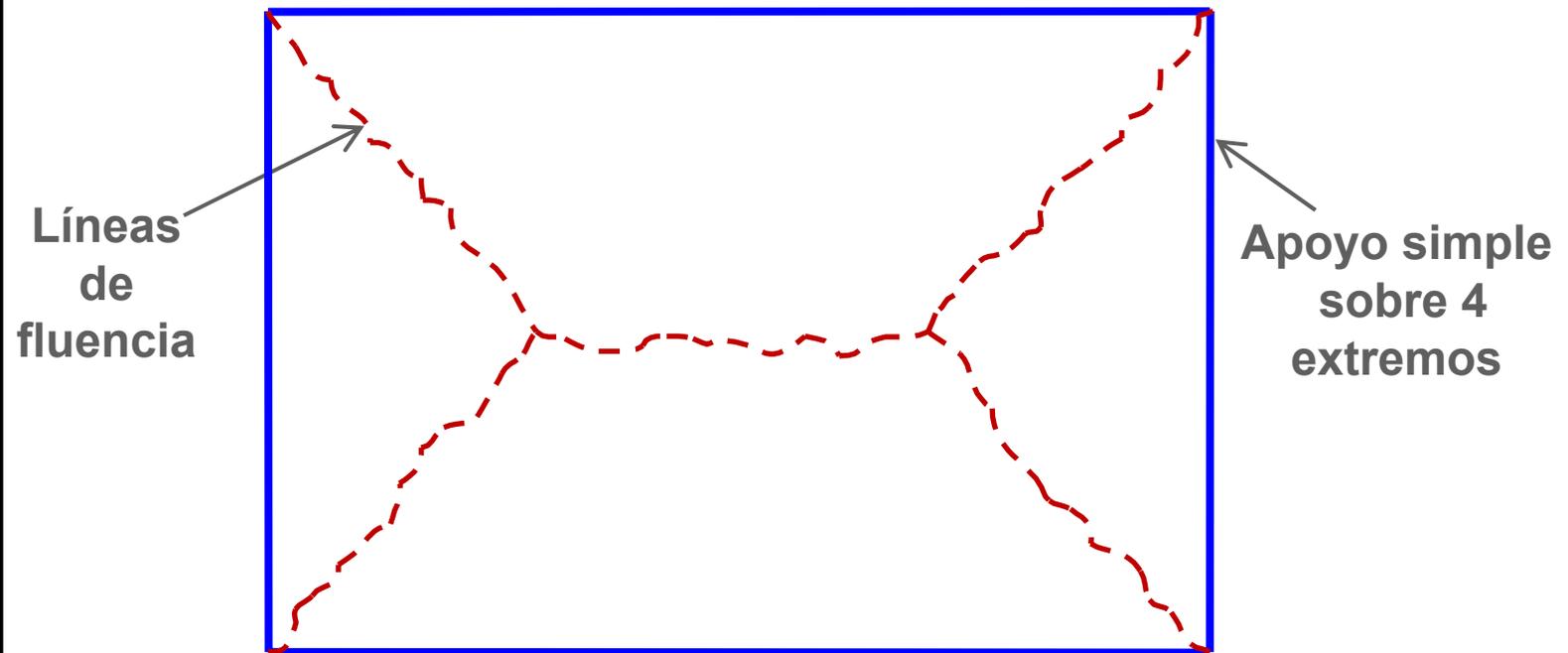


- **Modelo de losa de forjado con 4 lados encastrados verticalmente** (Líneas de fluencia plástica)

Comportamiento
mecánico de los
forjados
colaborantes

Método de
cálculo
simplificado a
20° C

Método de cálculo
simplificado a altas
temperaturas



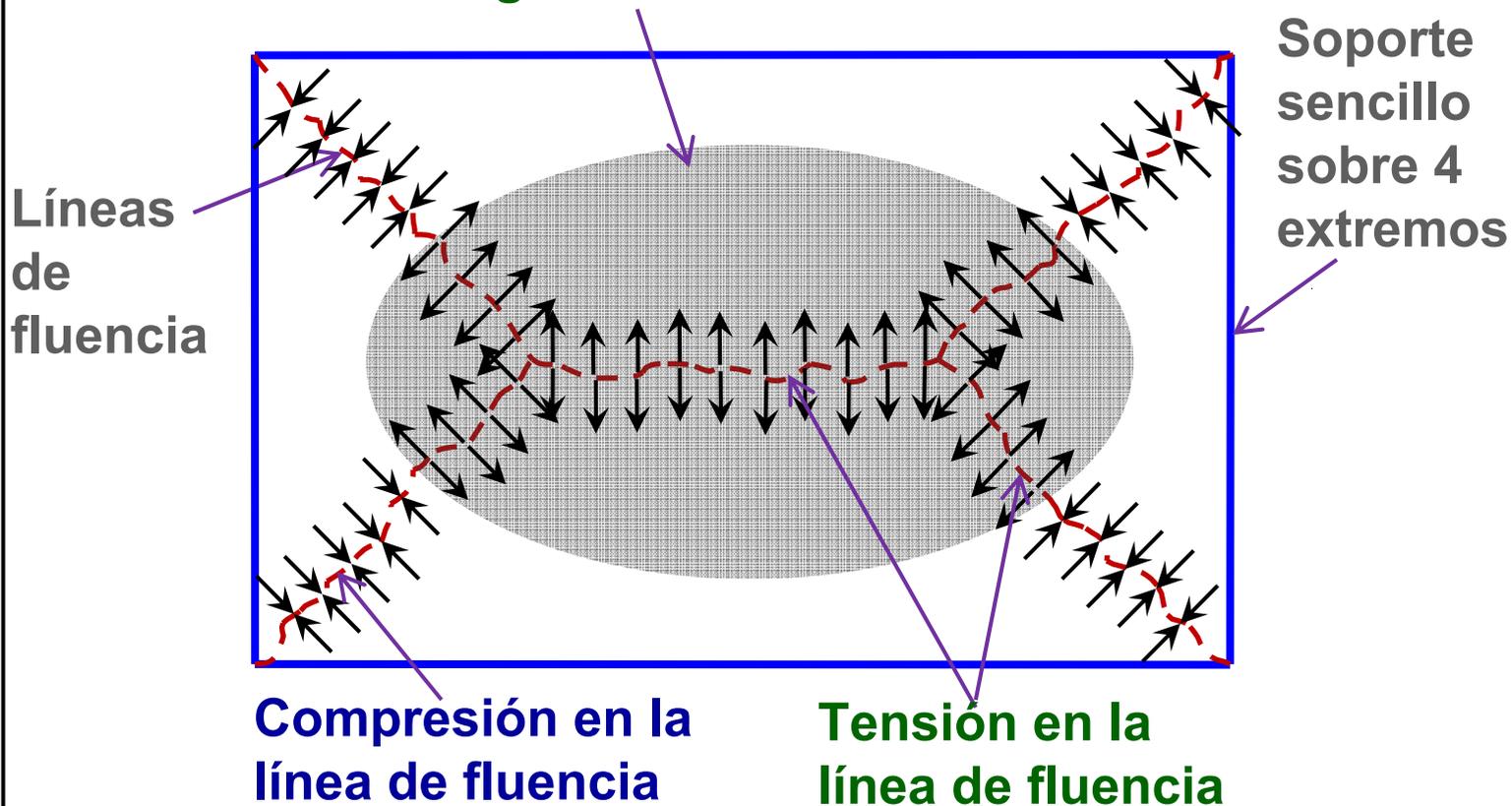


Método de cálculo simplificado de losas de hormigón armado a 20 °C



- **Modelo de losa de forjado**
 - Efecto de membrana que mejora la resistencia de las líneas de fluencia

Región de tensión



Comportamiento mecánico de los forjados colaborantes

Método de cálculo simplificado a 20° C

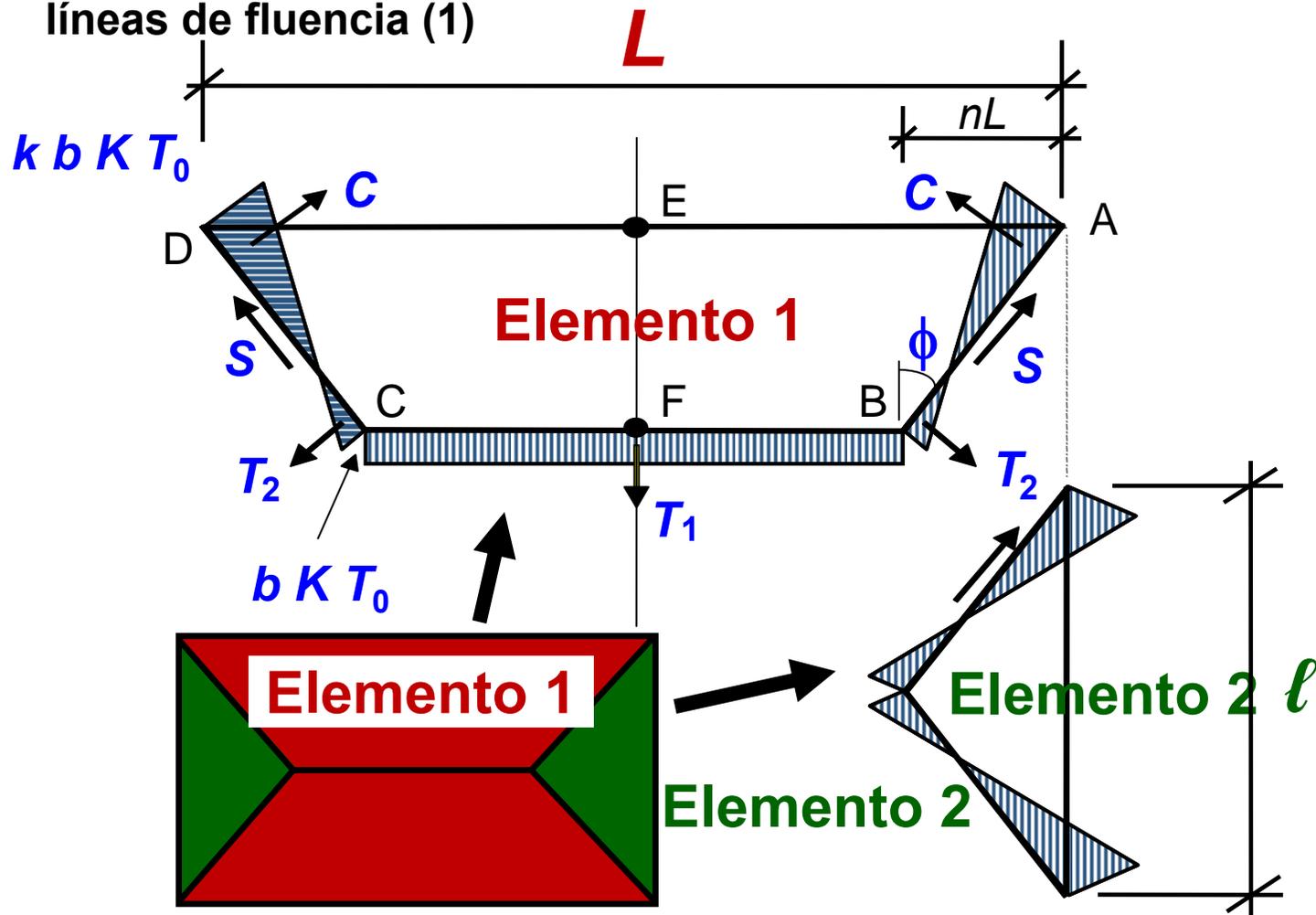
Método de cálculo simplificado a altas temperaturas



Método de cálculo simplificado de losas de hormigón armado a 20 °C



- Fuerzas de membrana a lo largo de las líneas de fluencia (1)



Comportamiento mecánico de los forjados colaborantes

Método de cálculo simplificado a 20° C

Método de cálculo simplificado a altas temperaturas



Método de cálculo simplificado de losas de hormigón armado a 20 °C



- **Fuerzas de membrana a lo largo de las líneas de fluencia (2)**

Comportamiento
mecánico de los
forjados
colaborantes

**Método de
cálculo
simplificado a
20° C**

Método de cálculo
simplificado a altas
temperaturas

k, b

son parámetros que definen la magnitud de las fuerzas de membrana

n

es un factor que se deduce de la teoría de las líneas de fluencia,

K

es la relación de la armadura en su luz menor con respecto al armado en la luz mayor,

T_0

es la armadura por unidad de anchura en la luz mayor,

T_1, T_2, C, S

son las fuerzas de membrana resultantes en las líneas de fluencia.



Método de cálculo simplificado de losas de hormigón armado a 20 °C

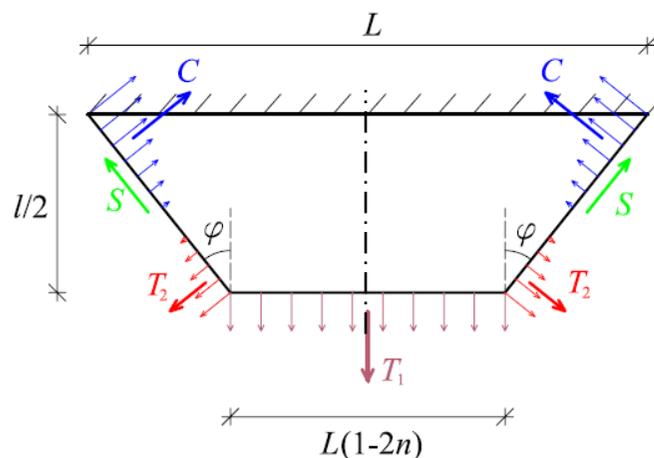


- **Contribución de la acción de la membrana (1)**
 - **Elemento 1**

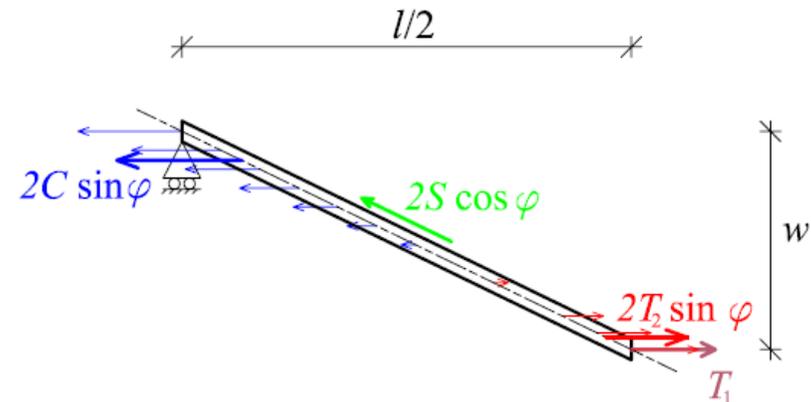
Comportamiento mecánico de los forjados colaborantes

Método de cálculo simplificado a 20° C

Método de cálculo simplificado a altas temperaturas



Vista en plano de las fuerzas de membrana resultantes



Vista lateral de las fuerzas de membrana resultantes con una flecha igual w



Método de cálculo simplificado de losas de hormigón armado a 20 °C

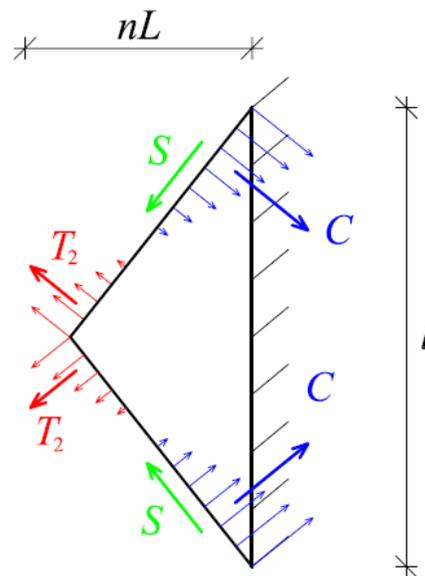


- **Contribución de la acción de la membrana (2)**
 - **Elemento 2**

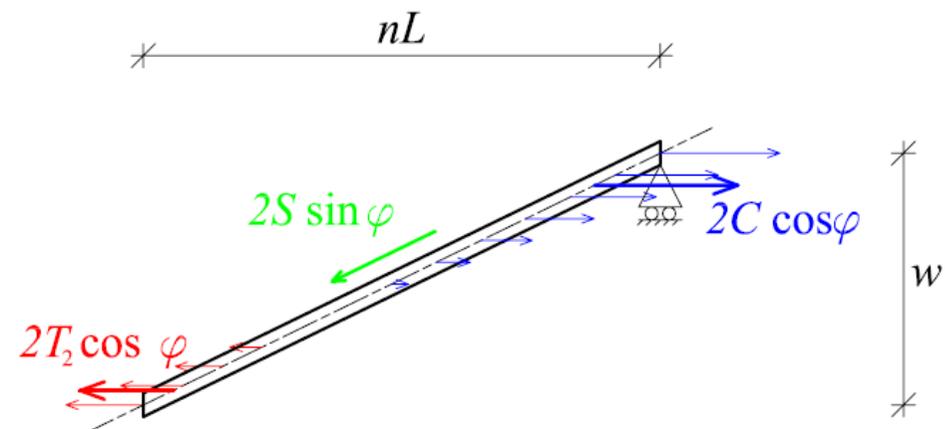
Comportamiento mecánico de los forjados colaborantes

Método de cálculo simplificado a 20° C

Método de cálculo simplificado a altas temperaturas



Vista en plano de las fuerzas de membrana resultantes



Vista lateral de las fuerzas de membrana resultantes con una flecha igual a w



Método de cálculo simplificado de losas de hormigón armado a 20 °C



- **Contribución de la acción de la membrana (3)**
 - **Factor de mejora para cada elemento**

$$e_{i, i=1,2} = \left[\begin{array}{l} e_{im} : \text{resistencia al momento del elemento } i \text{ en torno al} \\ \text{soporte} \\ + \\ e_{im} : \text{resistencia al momento de las líneas de} \\ \text{fluencia del elemento } i \end{array} \right.$$

- **Mejora global**

$$e = e_1 - \frac{e_1 - e_2}{1 + 2\mu a^2}$$

donde:

μ es el coeficiente de ortotropía de la armadura
 a es la relación de aspecto de la losa = L/ℓ

Comportamiento
mecánico de los
forjados
colaborantes

**Método de
cálculo
simplificado a
20° C**

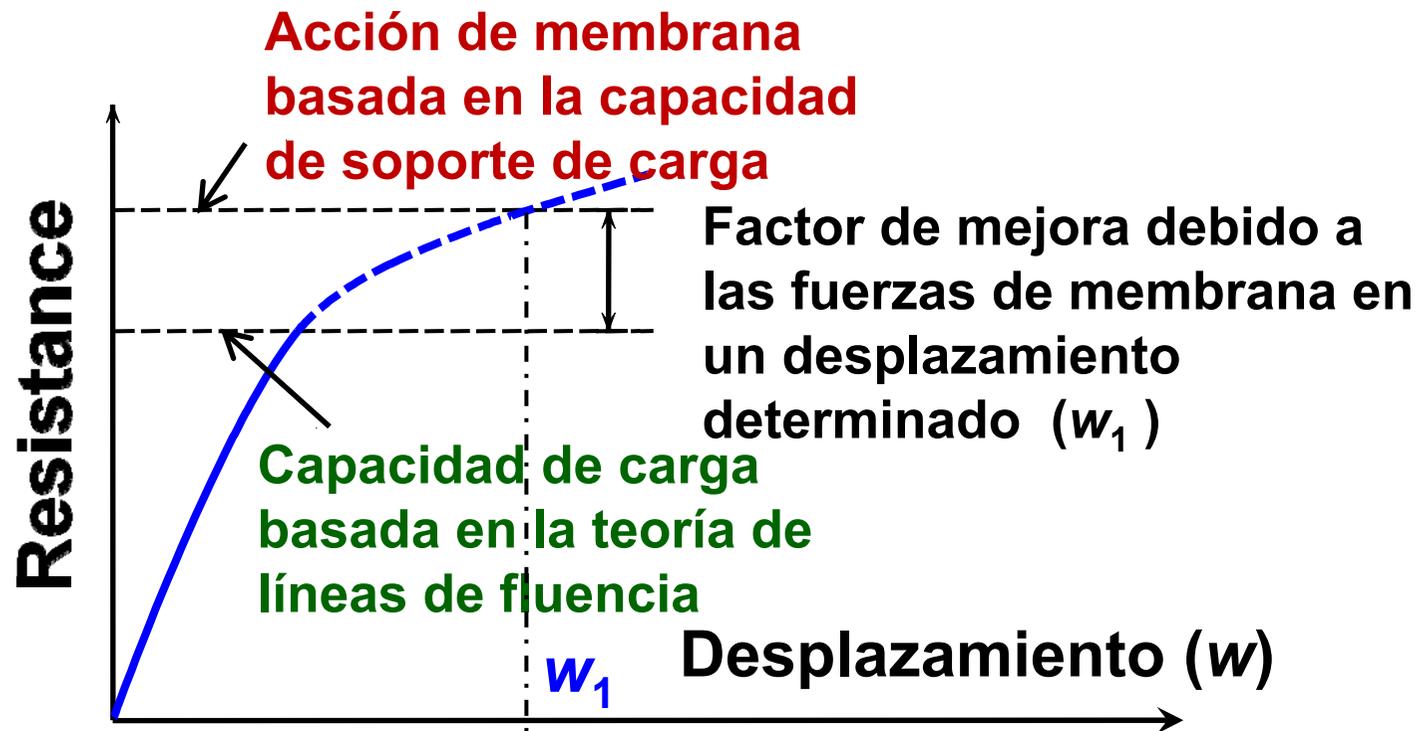
Método de cálculo
simplificado a altas
temperaturas



Método de cálculo simplificado de losas de hormigón armado a 20 °C



- Contribución de la acción de la membrana (4)



Comportamiento mecánico de los forjados colaborantes

Método de cálculo simplificado a 20° C

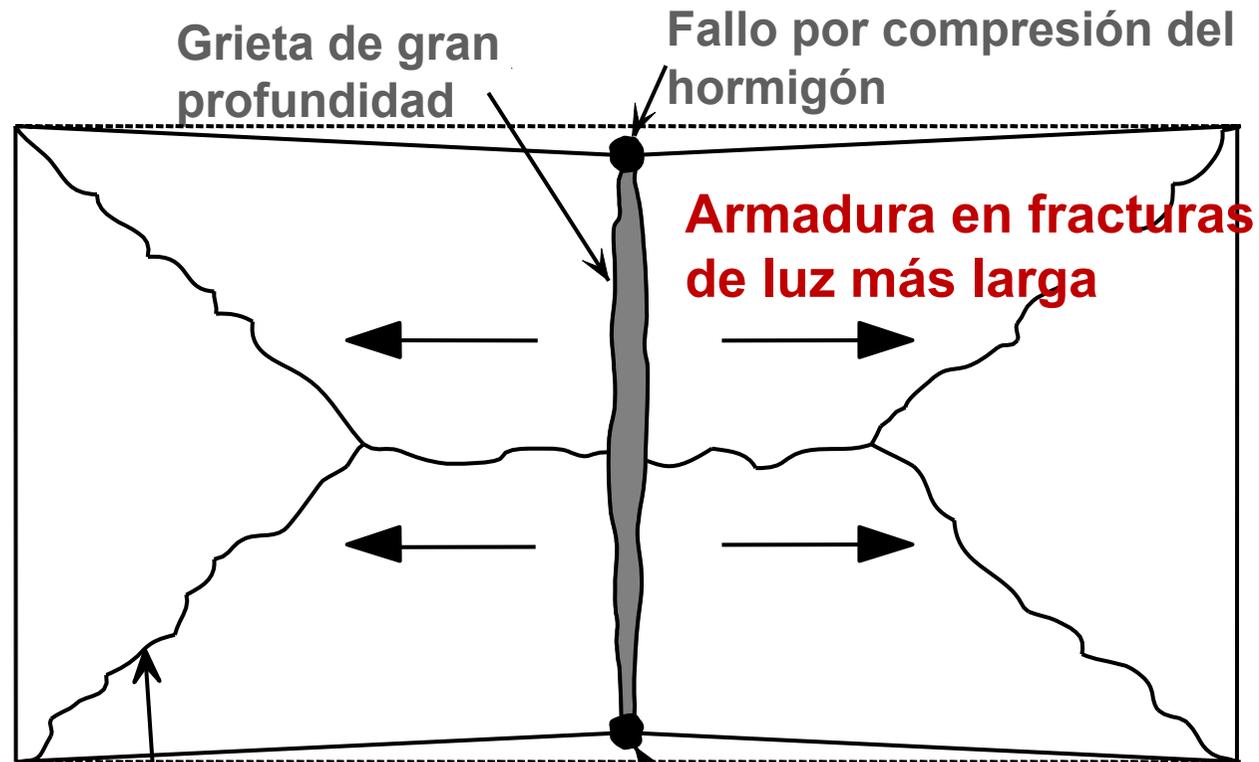
Método de cálculo simplificado a altas temperaturas



Método de cálculo simplificado de losas de hormigón armado a 20 °C



- **Modos de fallo** (fallo de tracción de la armadura)



Comportamiento mecánico de los forjados colaborantes

Método de cálculo simplificado a 20° C

Método de cálculo simplificado a altas temperaturas

Patrón de la línea de fluencia

El extremo de la losa se desplaza hacia el centro de la losa y "alivia" las deformaciones de la armadura en la luz corta



Método de cálculo simplificado de losas de hormigón armado a 20 °C

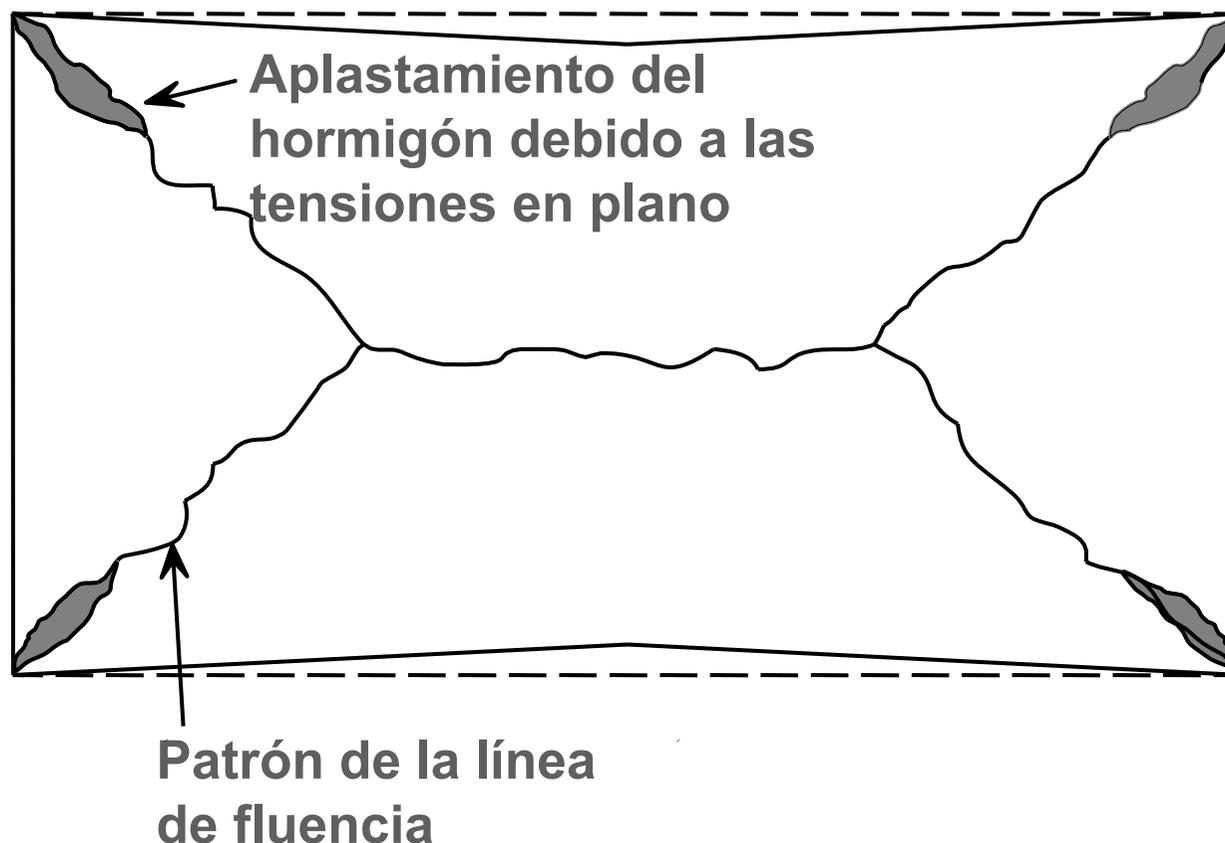


- **Modos de fallo** (fallo de compresión de la armadura)
 - Es más probable que se produzca en el caso de una malla fuerte de armadura

Comportamiento
mecánico de los
forjados
colaborantes

**Método de
cálculo
simplificado a
20° C**

Método de cálculo
simplificado a altas
temperaturas





Método de cálculo simplificado de losas de hormigón armado a 20 °C



- **Modos de fallo** (pruebas experimentales)

Comportamiento
mecánico de los
forjados
colaborantes

**Método de
cálculo
simplificado a
20° C**

Método de cálculo
simplificado a altas
temperaturas



**Fallo de tracción de
la armadura**



**Fallo por
compresión del
hormigón**



Método de cálculo simplificado a altas temperaturas



Comportamiento
mecánico de los
forjados
colaborantes

Método de cálculo
simplificado a 20°
C

Método de
cálculo
simplificado a
altas
temperaturas

- **Modelo de losa de forjado a altas temperaturas (1)**
 - Basado en el mismo modelo a temperatura ambiente
 - Justifica la curvatura térmica de la losa debido al gradiente de temperatura en profundidad, que es igual a:

$$w_{\theta} = \frac{\alpha (T_2 - T_1) \lambda^2}{19.2 h}$$

donde:

h es la altura total de la losa colaborante

λ es la luz más corta de la losa



Método de cálculo simplificado a altas temperaturas



Comportamiento
mecánico de los
forjados
colaborantes

Método de cálculo
simplificado a 20°
C

Método de
cálculo
simplificado a
altas
temperaturas

- **Modelo de losa de forjado a altas temperaturas (2)**

y:

α es el coeficiente de expansión térmica del hormigón

Para el hormigón LW, se toma el valor de la EN 02/01/1994

$$\alpha_{LWC} = 0.8 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$$

Para el hormigón NW, se toma un valor conservador

$$\alpha_{NWC} = 1.2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1} < 1.8 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1} \text{ (valor de EN 1994-1-2)}$$

T_2 es la temperatura de la parte inferior de la losa (lado expuesto al fuego)

T_1 es la temperatura de la parte superior de la losa (lado no expuesto al fuego)



Método de cálculo simplificado a altas temperaturas



- **Modelo de losa de forjado a altas temperaturas (3)**

- Presupone una deformación mecánica media a una tensión igual a la mitad de la tensión de fluencia a temperatura ambiente
- Flecha de la losa basada en una forma parabólica de la losa debido a una carga transversal:

$$w_{\varepsilon} = \sqrt{\left(\frac{0.5 f_{sy}}{E_s}\right) \frac{3L^2}{8}} \leq \frac{\lambda}{30}$$

donde:

E_s es el módulo elástico de la armadura a 20 °C

f_{sy} es el límite elástico de la armadura a 20 °C

L es la luz más larga de la losa

Comportamiento
mecánico de los
forjados
colaborantes

Método de cálculo
simplificado a 20°
C

Método de
cálculo
simplificado a
altas
temperaturas



Método de cálculo simplificado a altas temperaturas



- **Modelo de losa de forjado a altas temperaturas (4)**

- **Por lo tanto, la flecha máxima de la losa del forjado es:**

$$w = \frac{\alpha(T_2 - T_1)\lambda^2}{19.2 h} + \sqrt{\left(\frac{0.5 f_{sy}}{E_s}\right) \frac{3L^2}{8}}$$

- **Sin embargo, la flecha máxima de la losa del forjado está limitada a:**

$$w \leq \frac{L + \lambda}{30}$$

Comportamiento
mecánico de los
forjados
colaborantes

Método de cálculo
simplificado a 20°
C

**Método de
cálculo
simplificado a
altas
temperaturas**



Método de cálculo simplificado a altas temperaturas



Comportamiento
mecánico de los
forjados
colaborantes

Método de cálculo
simplificado a 20°
C

**Método de
cálculo
simplificado a
altas
temperaturas**

- **Ajuste conservador del modelo de la losa de forjado a altas temperaturas**
 - Los desplazamientos verticales estimados debidos a la curvatura térmica están infravalorados si se comparan con los valores teóricos
 - La curvatura térmica se calcula en base a la luz menor de la losa
 - Se ignora cualquier desplazamiento vertical adicional inducido por la dilatación térmica limitada cuando la losa se encuentra en situación de post-pandeo
 - Se ignora cualquier contribución de la cubierta de acero
 - Se ignora el incremento de la ductilidad de la malla con la temperatura



Método de cálculo simplificado a altas temperaturas



Comportamiento
mecánico de los
forjados
colaborantes

Método de cálculo
simplificado a 20°
C

**Método de
cálculo
simplificado a
altas
temperaturas**

- **Capacidad de soporte de carga del modelo de losa de forjado mejorado en presencia de vigas de acero desprotegidas (1)**
 - **Se omite la acción catenaria de las vigas desprotegidas**
 - **Se considera la resistencia del momento de flexión de las vigas desprotegidas en los siguientes supuestos:**
 - Soporte simple en ambos extremos
 - Calentamiento de la sección transversal del acero según la EN1994-1-2 4.3.4.2, considerando el efecto de sombra
 - Propiedades térmicas y mecánicas para acero y hormigón según EN 1994-1-2



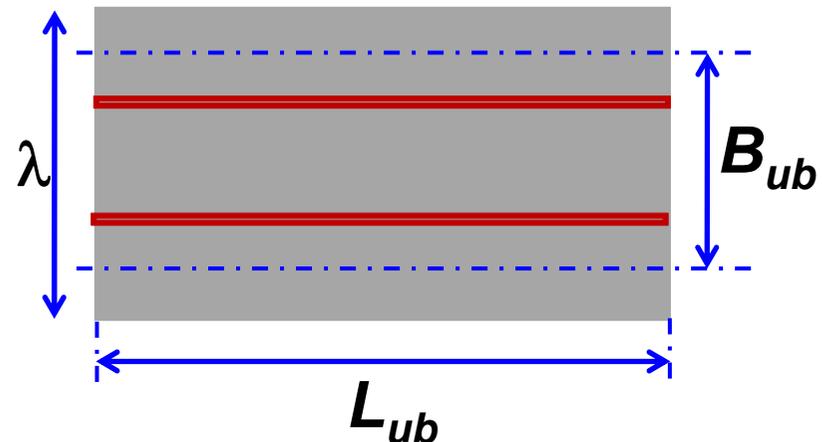
Método de cálculo simplificado a altas temperaturas



- Capacidad de soporte de carga del modelo de losa de forjado mejorado en presencia de vigas de acero desprotegidas (2)

- La mejora de la capacidad de soporte de carga de vigas desprotegidas es:

$$\frac{\delta M_{Rd,fi}}{L_{ub}^2} \frac{n_{ub}}{B_{ub}} = \frac{\delta M_{Rd,fi}}{L^2} \frac{l + n_{ub}}{\lambda}$$



donde:

n_{ub} es el número de vigas desprotegidas

$M_{Rd,fi}$ es la resistencia de momento de cada viga mixta desprotegida

Comportamiento
mecánico de los
forjados
colaborantes

Método de cálculo
simplificado a 20°
C

Método de
cálculo
simplificado a
altas
temperaturas



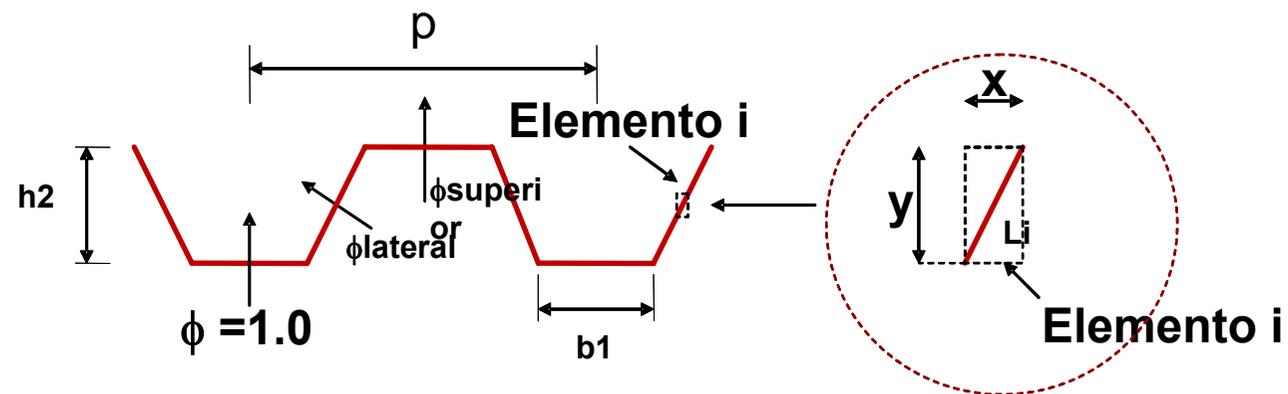
Método de cálculo simplificado a altas temperaturas



- **Cálculo de temperatura de la losa mixta**

- **Según modelos de cálculo avanzados**

- Método de diferencias finitas en 2D
- Propiedades térmicas de materiales según EN 1994-1-2 para acero y hormigón
- Se tiene en cuenta el efecto de sombra en las losas mixtas



Comportamiento
mecánico de los
forjados
colaborantes

Método de cálculo
simplificado a 20°
C

Método de
cálculo
simplificado a
altas
temperaturas



Método de cálculo simplificado a altas temperaturas



- **Capacidad de soporte de carga de vigas perimetrales protegidas**

- Nivel de carga $\eta_{fi,t}$

- Carga adicional en vigas secundarias

- **Método de temperatura crítica**

- Vigas mixtas (EN 1994-1-2)

- R30

- Otras características de resistencia al fuego

- Vigas de acero (EN 1993-1-2) $0.9 \eta_{fi,t} = \frac{f_{ay,\theta cr}}{f_{ay}} = \frac{M_{Rd,fi,b,i}}{M_{Rd,b,i}} \Big|_{i=1,2}$

$$\eta_{fi,t} = \frac{f_{ay,\theta cr}}{f_{ay}} = \frac{M_{Rd,fi,b,i}}{M_{Rd,b,i}} \Big|_{i=1,2}$$

$$\eta_{fi,t} = \frac{f_{ay,\theta cr}}{f_{ay}} = \frac{M_{Rd,fi,b,i}}{M_{Rd,b,i}} \Big|_{i=1,2}$$

Comportamiento
mecánico de los
forjados
colaborantes

Método de cálculo
simplificado a 20°
C

**Método de
cálculo
simplificado a
altas
temperaturas**



Método de cálculo simplificado a altas temperaturas



- **Capacidad de soporte de carga de las vigas perimetrales desprotegidas basándose en un mecanismo plástico global**
 - Las vigas primarias y las vigas secundarias se diseñan independientemente
 - Tanto en vigas primarias como secundarias
 - Se considera un único patrón de línea de fluencia de unión entre bisagras plásticas
 - La resistencia de momento requerida $M_{Rd,fi,b}$ es la misma en todas las vigas perimetrales paralelas, independientemente de su sección transversal real
 - Se estudian 2 casos
 - 2 vigas extremas
 - al menos 1 viga interna
 - Se aplica el principio de trabajo virtual

Comportamiento
mecánico de los
forjados
colaborantes

Método de cálculo
simplificado a 20°
C

**Método de
cálculo
simplificado a
altas
temperaturas**

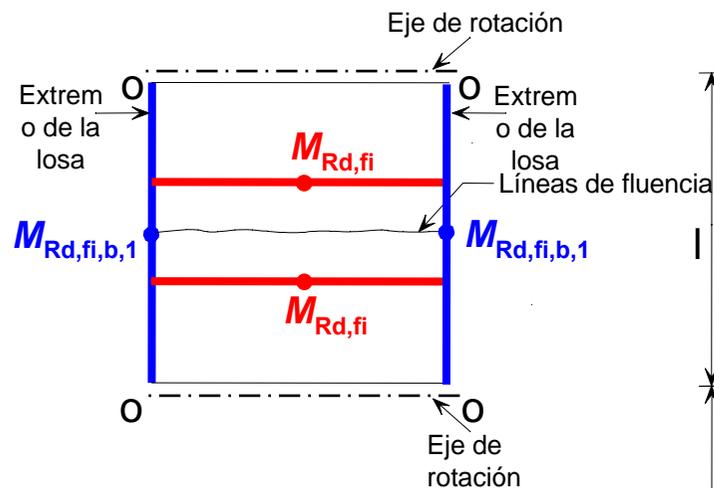


Método de cálculo simplificado a altas temperaturas

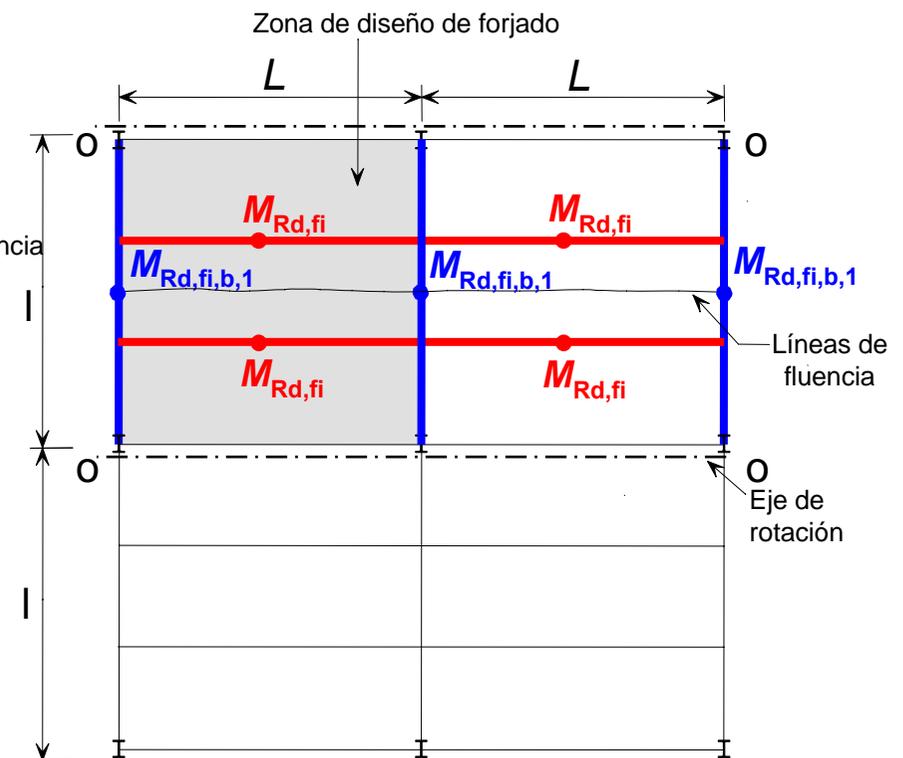


- Capacidad de soporte de carga de las vigas primarias (1)

2 vigas extremas



1 viga interna



Comportamiento mecánico de los forjados colaborantes

Método de cálculo simplificado a 20°C

Método de cálculo simplificado a altas temperaturas



Método de cálculo simplificado a altas temperaturas



Comportamiento
mecánico de los
forjados
colaborantes

Método de cálculo
simplificado a 20°
C

**Método de
cálculo
simplificado a
altas
temperaturas**

- **Capacidad de soporte de carga de las vigas primarias (2)**

- **2 vigas extremas**

$$M_{Rd,fi,b,1} = \frac{pL^2\lambda - 8\mu M_0 L_{eff}}{16}$$

- **Al menos una viga interna**

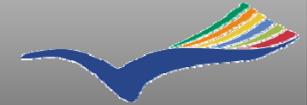
$$M_{Rd,fi,b,1} = \frac{pL^2\lambda - 8\mu M_0 L_{eff}}{12}$$

donde:

p es el valor máximo de la carga aplicada y de la capacidad de soporte de carga del forjado



Método de cálculo simplificado a altas temperaturas



- **Capacidad de soporte de carga de las vigas primarias (3)**

y:

L_{eff} es la longitud efectiva de la línea de fluencia

- 2 vigas extremas de acero

$$L_{eff} = L$$

- sólo 1 viga mixta

$$L_{eff} = L - \min\left(\frac{L}{2}; \frac{\lambda}{8}\right)$$

- 2 vigas mixtas

$$L_{eff} = L - 2 \times \min\left(\frac{L}{2}; \frac{\lambda}{8}\right)$$

Comportamiento
mecánico de los
forjados
colaborantes

Método de cálculo
simplificado a 20°
C

**Método de
cálculo
simplificado a
altas
temperaturas**

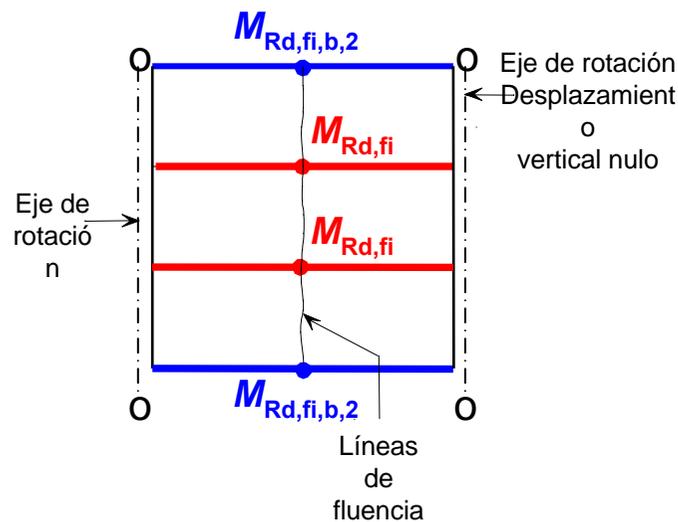


Método de cálculo simplificado a altas temperaturas

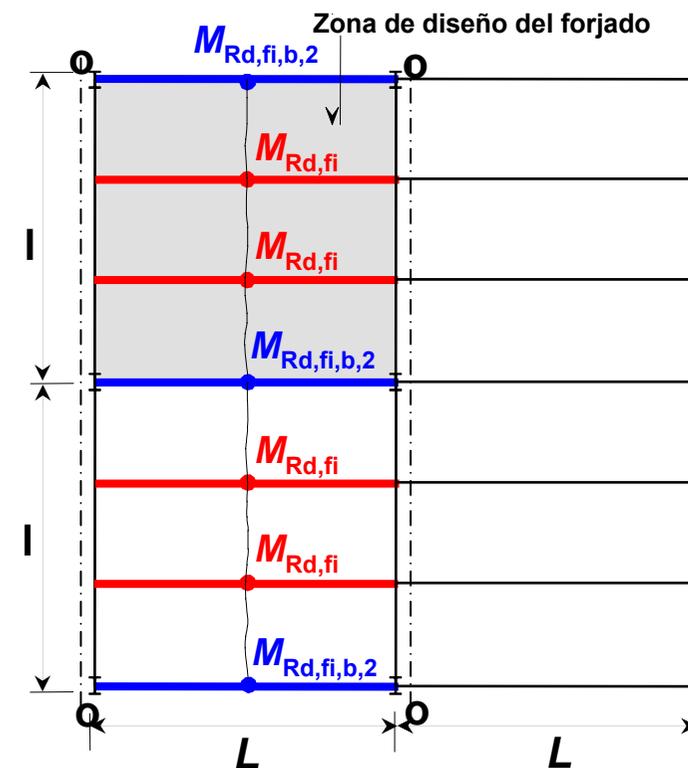


- Capacidad de soporte de carga de las vigas secundarias protegidas (1)

2 vigas extremas



1 viga interna



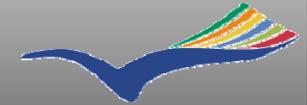
Comportamiento mecánico de los forjados colaborantes

Método de cálculo simplificado a 20° C

Método de cálculo simplificado a altas temperaturas



Método de cálculo simplificado a altas temperaturas



- **Capacidad de soporte de carga de las vigas secundarias protegidas (2)**

- **2 vigas extremas**

$$M_{Rd,fi,b,2} = \frac{pL\lambda^2 - 8(M_0\lambda_{eff} + n_{ub}M_{Rd,fi})}{16}$$

- **Al menos una viga interna**

$$M_{Rd,fi,b,2} = \frac{pL\lambda^2 - 8(M_0\lambda_{eff} + n_{ub}M_{Rd,fi})}{12}$$

donde:

p es el valor máximo de la carga aplicada y de la capacidad de soporte de carga del forjado

Comportamiento
mecánico de los
forjados
colaborantes

Método de cálculo
simplificado a 20°
C

Método de
cálculo
simplificado a
altas
temperaturas



Método de cálculo simplificado a altas temperaturas



- **Capacidad de soporte de carga de las vigas secundarias protegidas (3)**

y:

λ_{eff} es la longitud efectiva de la línea de fluencia

- 2 vigas extremas de acero

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda - n_{ub} \min \left(\frac{\lambda}{1 + n_{ub}}; \frac{L}{4} \right)$$

- sólo 1 viga mixta

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda - \left(n_{ub} + \frac{1}{2} \right) \min \left(\frac{\lambda}{1 + n_{ub}}; \frac{L}{4} \right)$$

- 2 vigas mixtas

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda - (n_{ub} + 1) \min \left(\frac{\lambda}{1 + n_{ub}}; \frac{L}{4} \right)$$

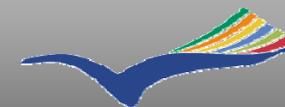
Comportamiento
mecánico de los
forjados
colaborantes

Método de cálculo
simplificado a 20°
C

**Método de
cálculo
simplificado a
altas
temperaturas**



Bibliografía



- **Johansen, K.W. *Yield-line formulae for slabs*. Cement and Concrete Association. Londres: Taylor & Francis, 1972.**
- **Bailey, C.G. *Membrane action of slab/beam composite floor systems in fire*. Engineering Structures, Octubre 2004, Vol. 26, N° 12, pp. 1691-1703.**
- **EN 1994-1-2 : *Eurocode 4 : Diseño de estructuras colaborantes de hormigón y acero – Parte 1-2: Normas generales - diseño de fuego estructural*, CEN.**
- ***Fire Resistance Assessment Of Partially Protected Composite Floors (FRACOF) - Evaluación de la resistencia al fuego en forjados de chapa colaborante con protección parcial Documento técnico teórico Informe técnico*, CTICM, SCI, 2009.**