



Comportamiento ante el fuego de sistemas de forjado colaborante de acero

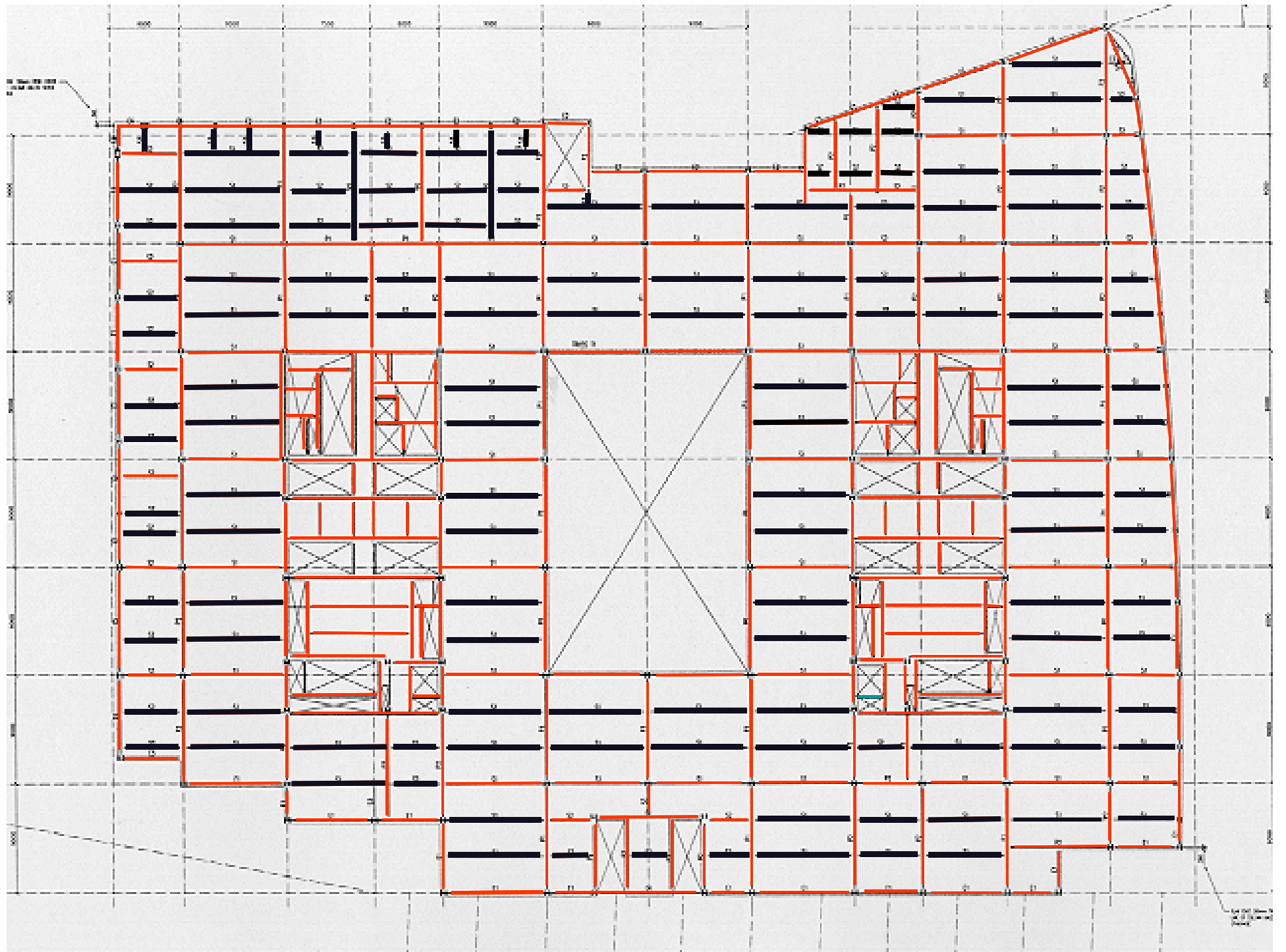
Antecedentes del método de cálculo simplificado

Dic. 2012



Objetivo del método de diseño







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

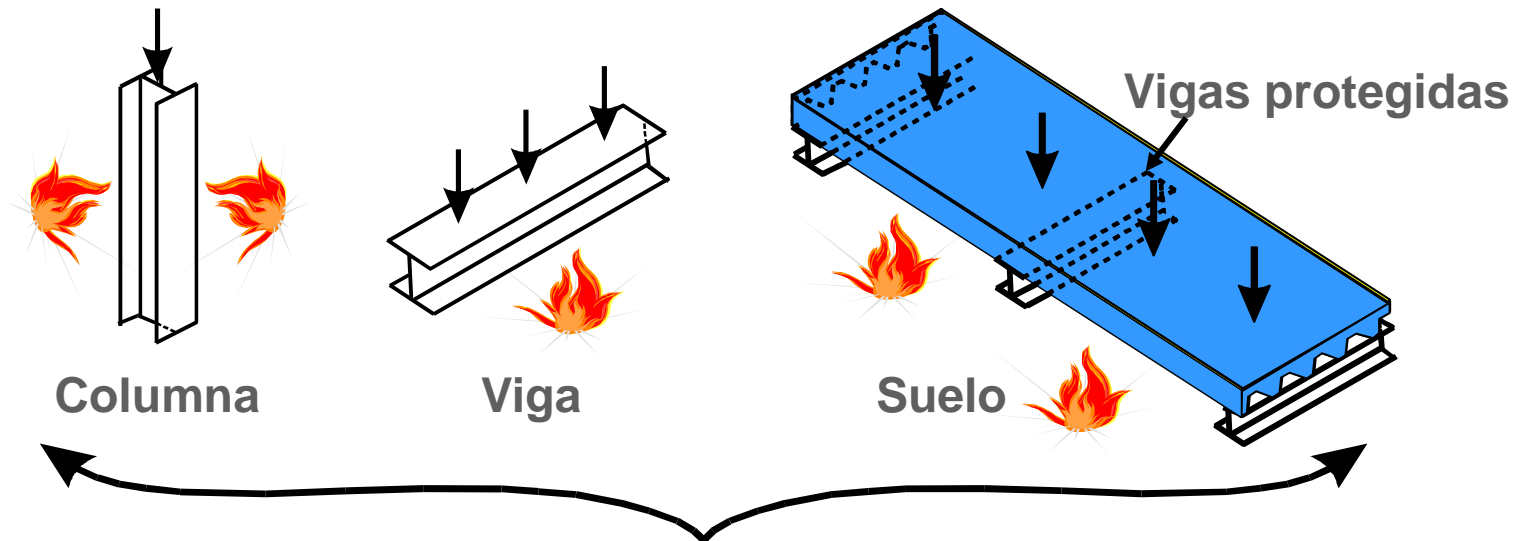


- **Método de diseño tradicional**

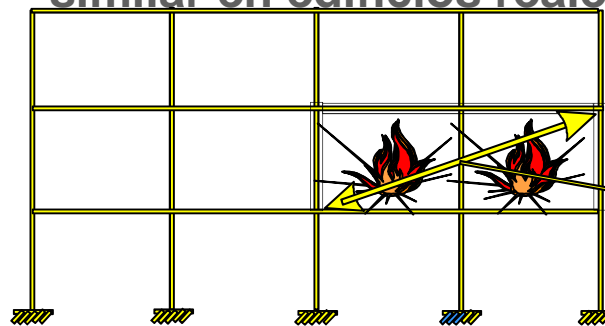
Comportamiento mecánico de los forjados colaborantes

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



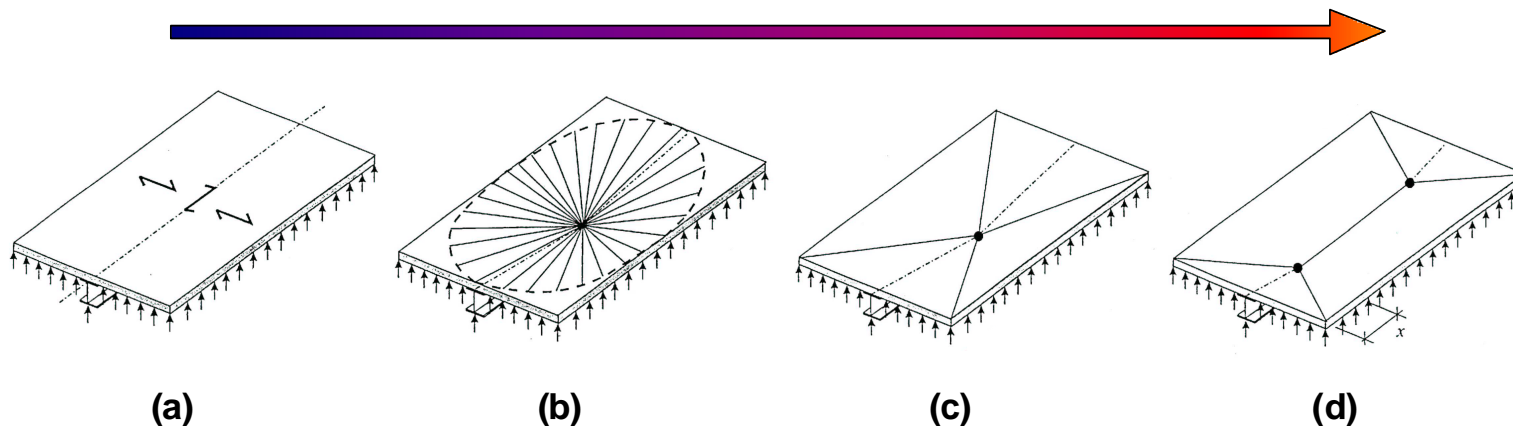
- Comportamiento real en el caso de suelos colaborantes con malla de acero de armadura en interior de losa de hormigón

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 a 20 °C



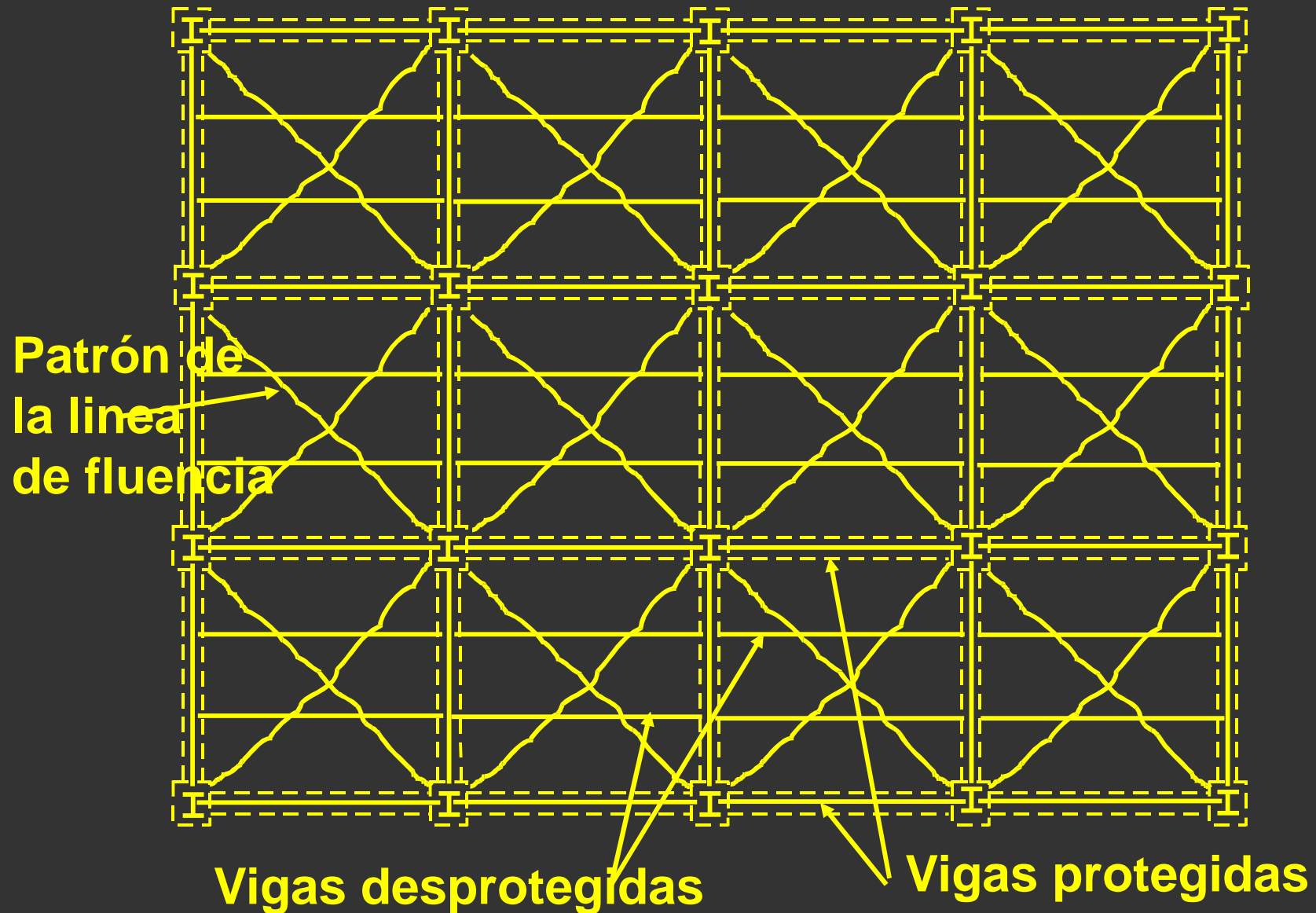
Comportamiento
mecánico de los
forjados
colaborantes

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

Método de cálculo
simplificado a altas
temperaturas

- **Método desarrollado por el Profesor Colin Bailey
Universidad de Manchester
junto con el Building Research Establishment (BRE)**

Diseño en base al efecto membrana a fuego





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

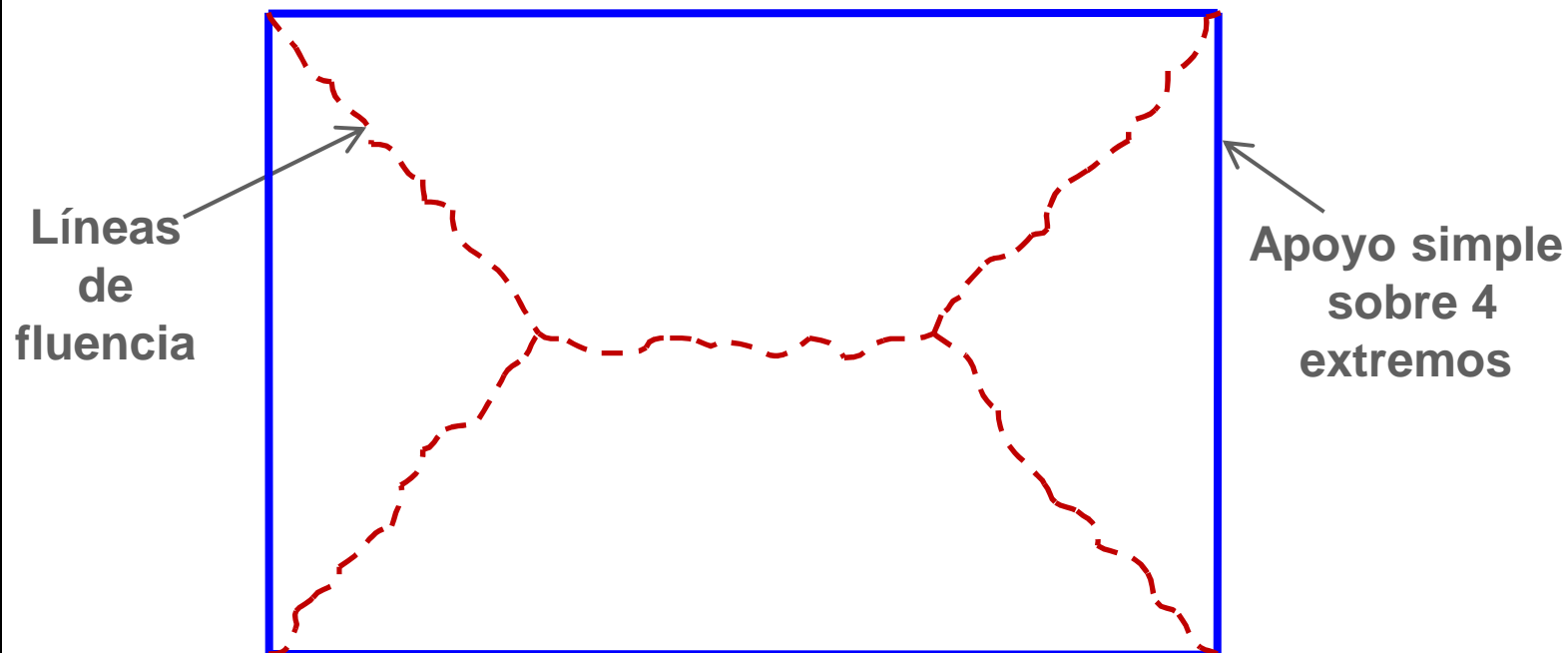


- **Modelo de losa de forjado con 4 lados encastrados verticalmente** (Líneas de fluencia plástica) – sin restricción horizontal – consideración muy conservadora

Comportamiento mecánico de los forjados colaborantes

Método de cálculo simplificado a 20° C

Método de cálculo simplificado a altas temperaturas



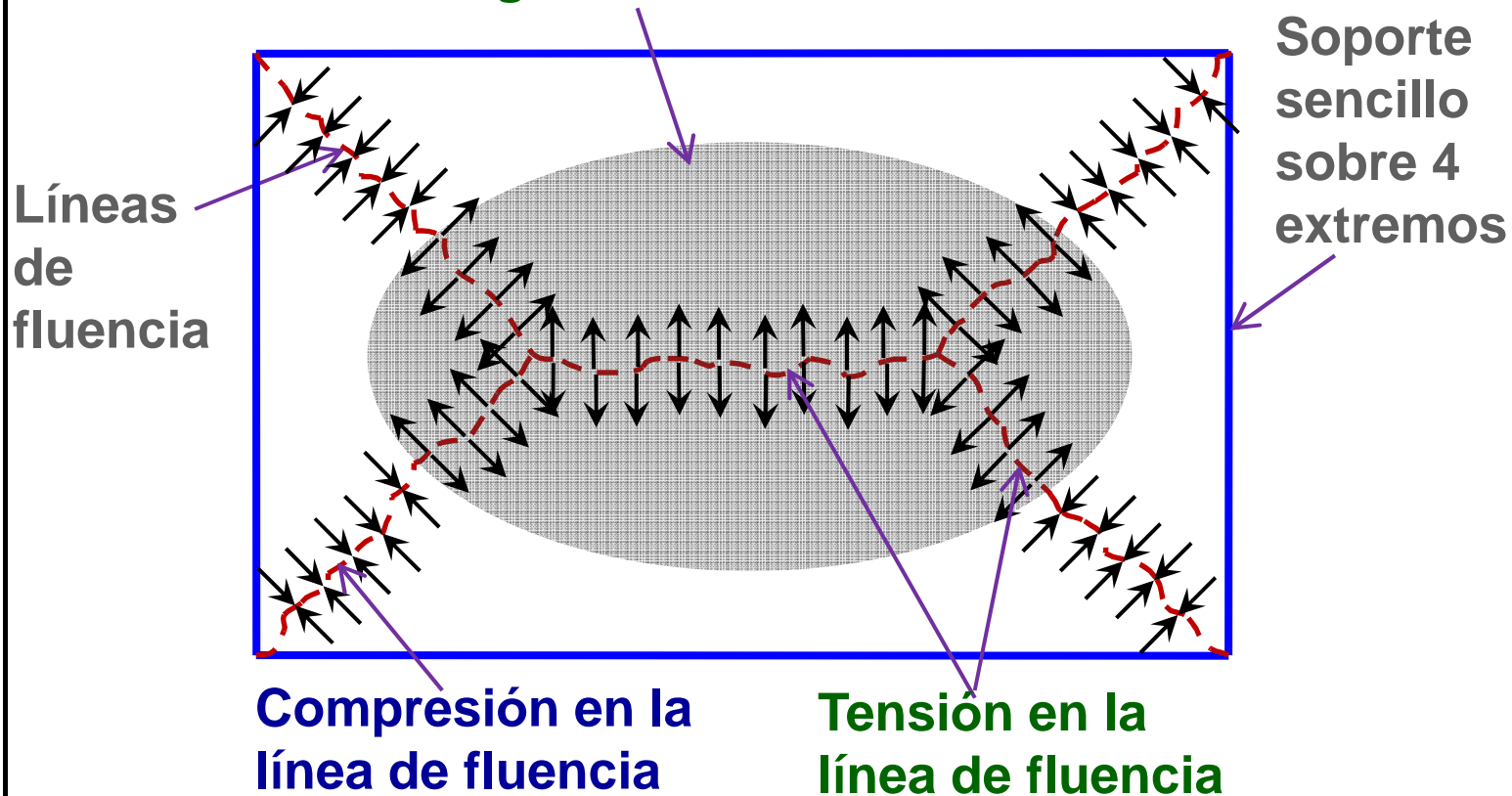


Método de cálculo simplificado de losas de hormigón armado a 20 °C



- **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

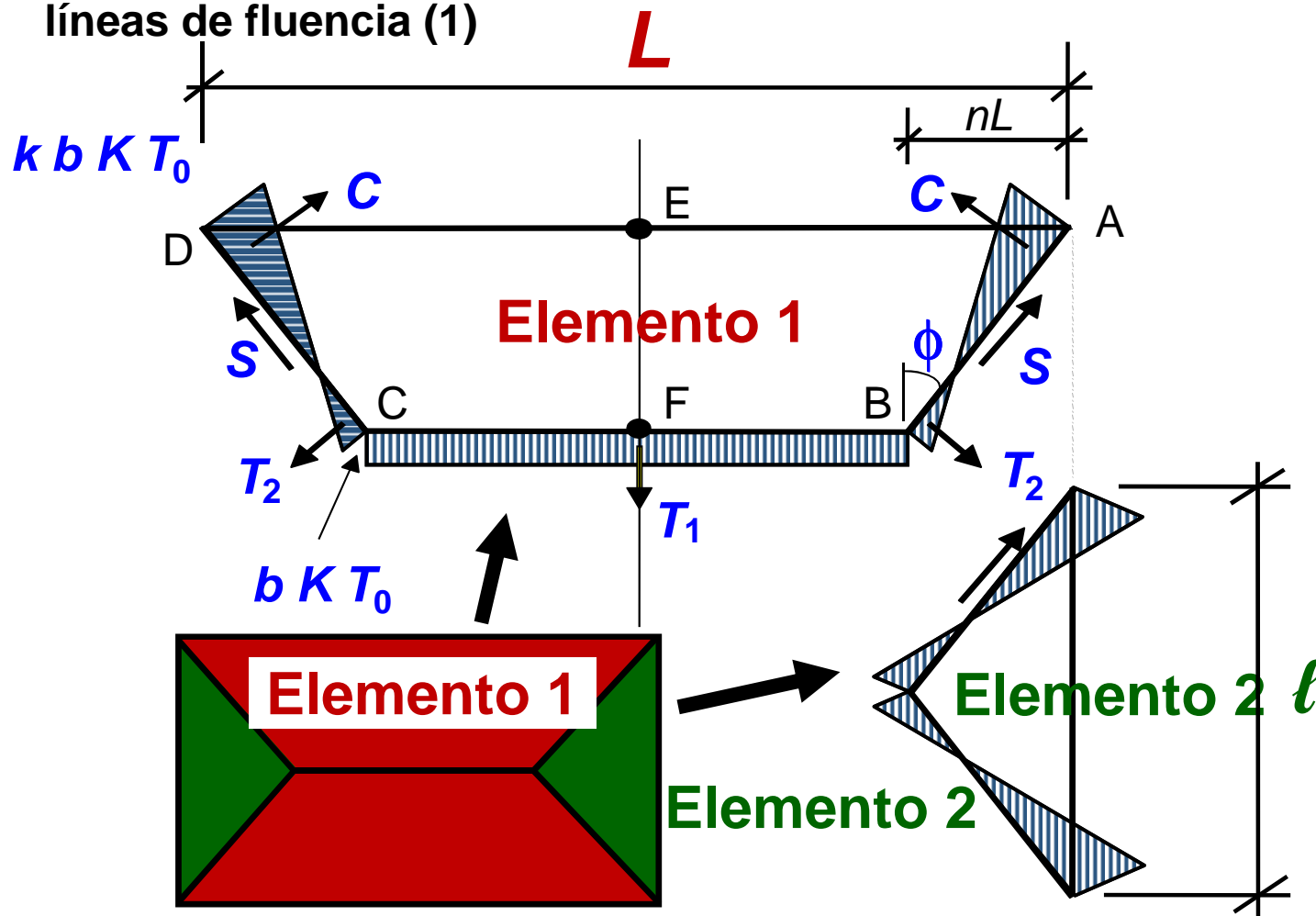
Método de cálculo simplificado a altas temperaturas



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.

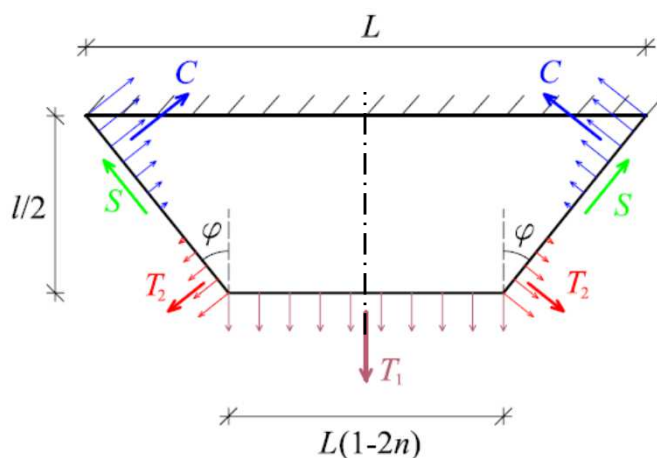


- **Contribución de la acción de la membrana (1)**
 - **Elemento 1**

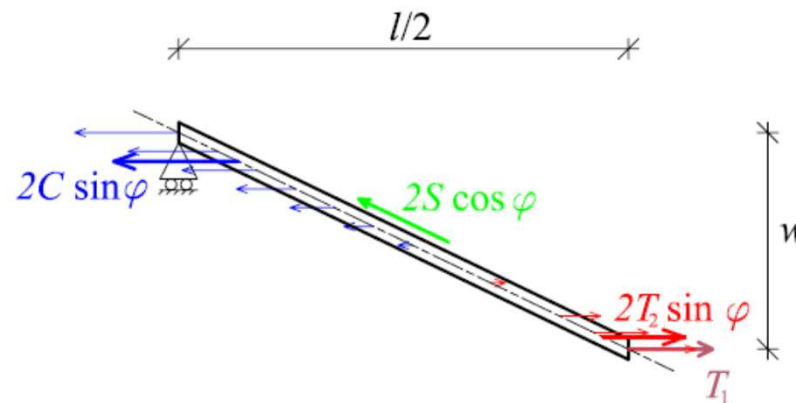
Comportamiento
mecánico de los
forjados
colaborantes

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

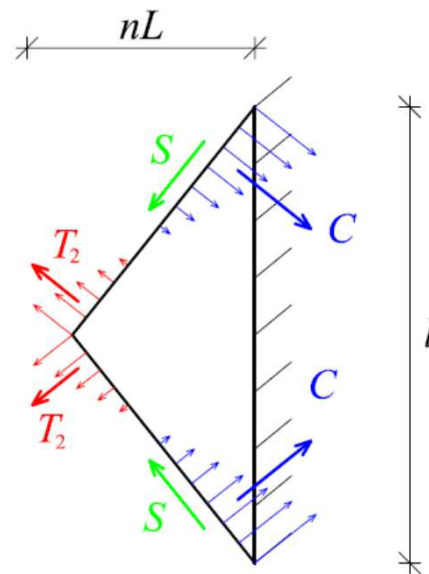


- **Contribución de la acción de la membrana (2)**
 - **Elemento 2**

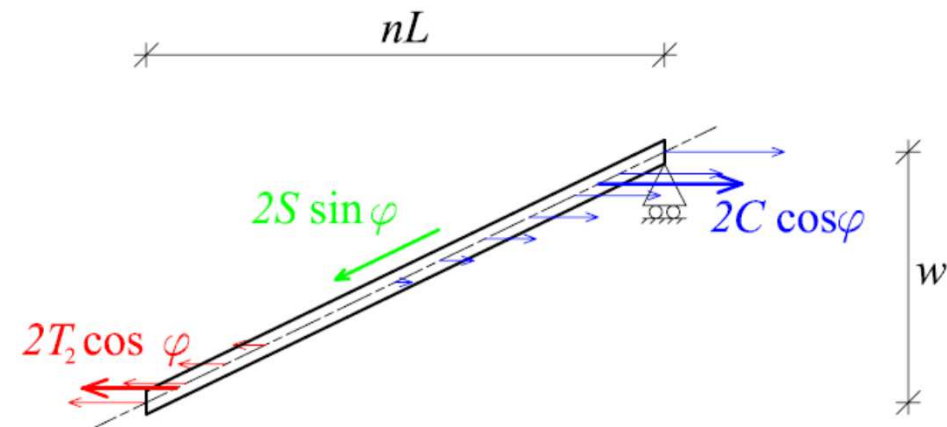
Comportamiento
mecánico de los
forjados
colaborantes

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



Comportamiento
mecánico de los
forjados
colaborantes

Método de
cálculo
simplificado a
20° C

Método de cálculo
simplificado a altas
temperaturas

- **Contribución de la acción de la membrana (3)**

- **Factor de mejora para cada elemento**

$$e_{i, i=1,2} = \begin{cases} e_{im} : \text{resistencia al momento del elemento } i \text{ en torno al} \\ \text{soporte} & + \\ e_{im} : \text{resistencia al momento de las líneas de} \\ \text{fluencia del elemento } i \end{cases}$$

- **Mejora global**

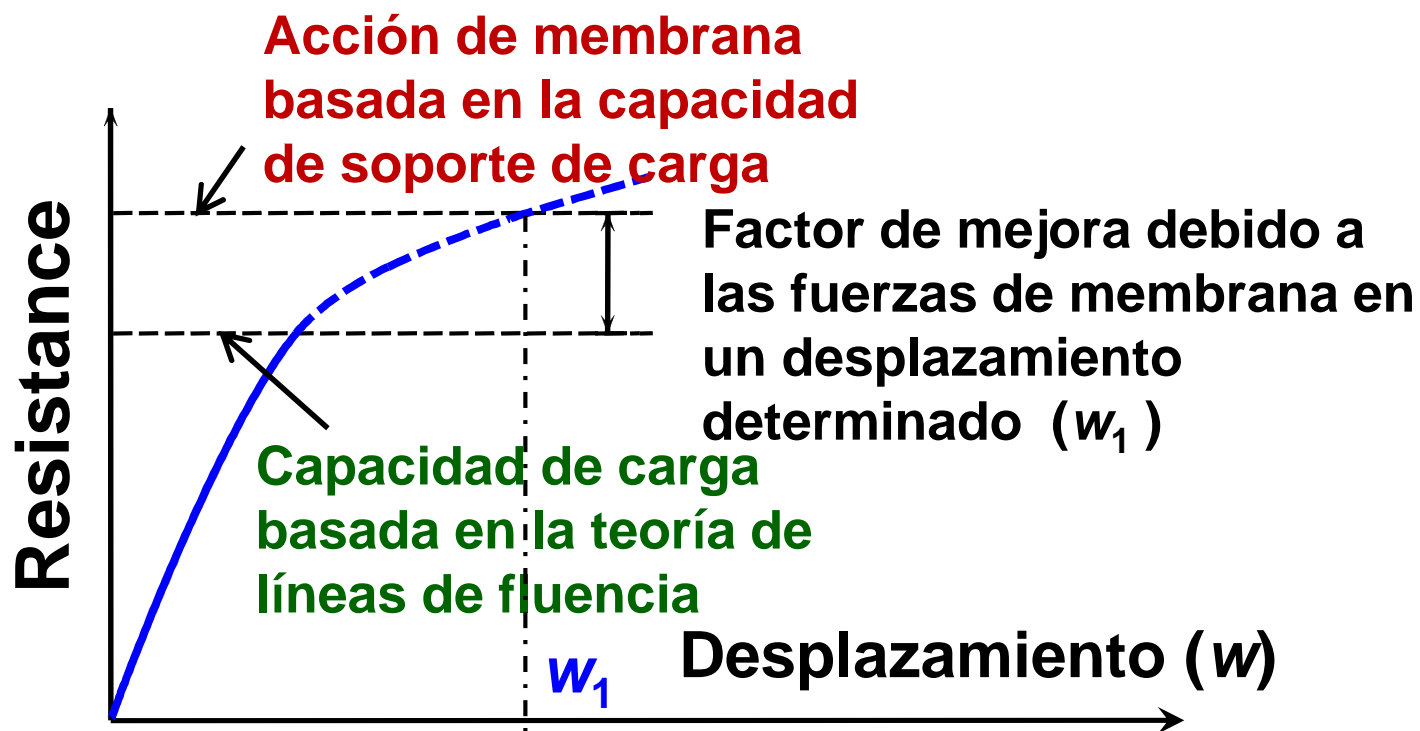
$$e = e_1 - \frac{e_1 - e_2}{1 + 2\mu a^2}$$

donde:

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



- Contribución de la acción de la membrana (4)



Comportamiento mecánico de los forjados colaborantes

Método de cálculo simplificado a 20° C

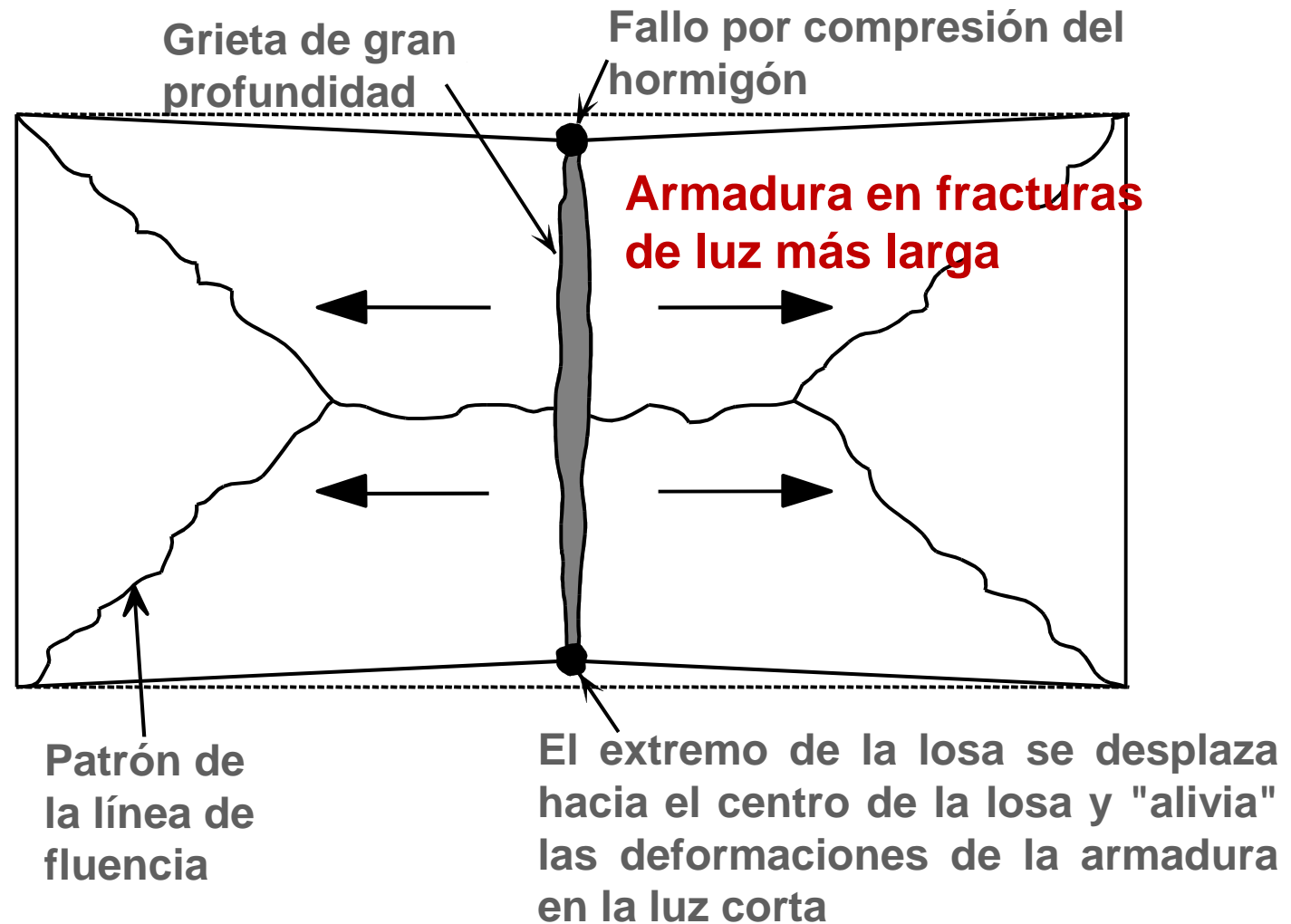
Método de cálculo simplificado a altas temperaturas



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

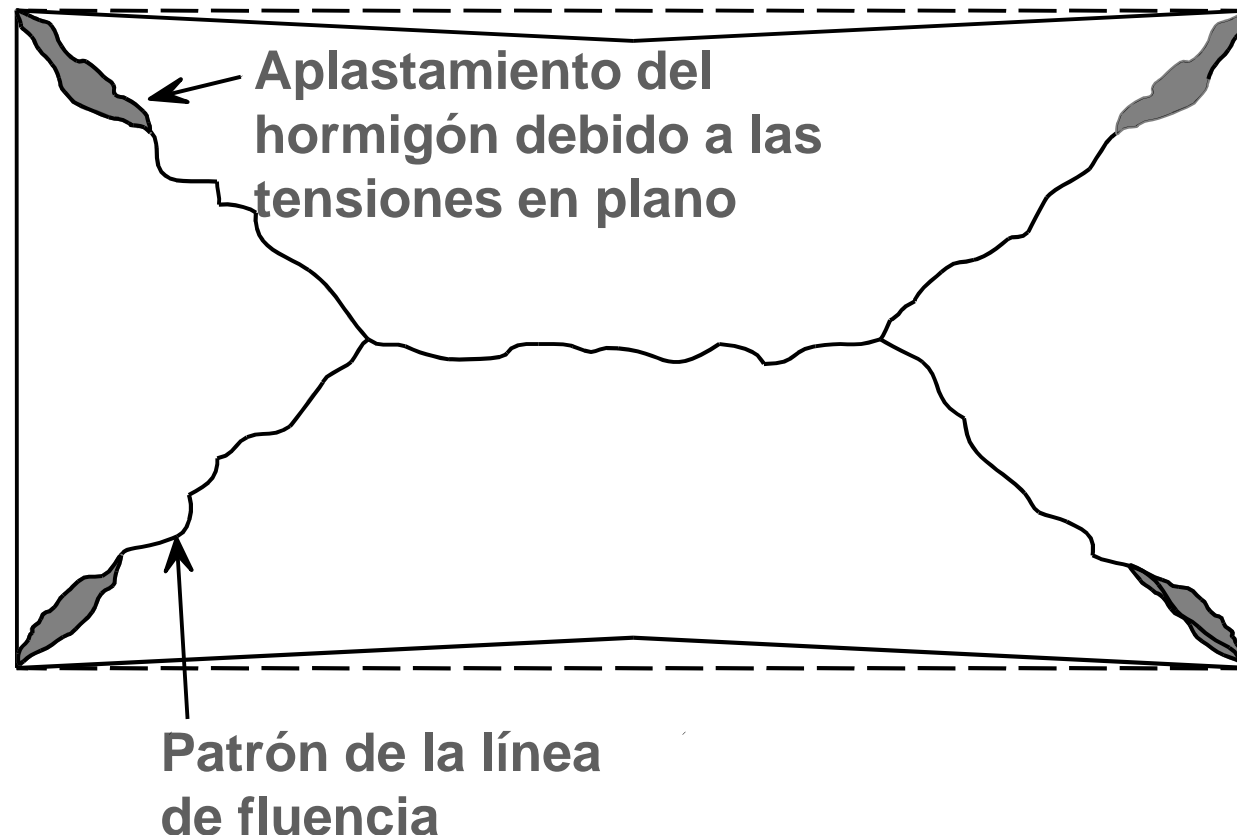
Método de cálculo simplificado a altas temperaturas



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



- **Modelo de forjado a altas temperaturas (1)**
 - En base al mismo modelo que a temperatura ambiente
 - Se ha tenido en cuenta el efecto de la temperatura en las propiedades del material.

Comportamiento
mecánico de los
forjados
colaborantes

Método de cálculo
simplificado a 20°
C

**Método de
cálculo
simplificado a
altas
temperaturas**

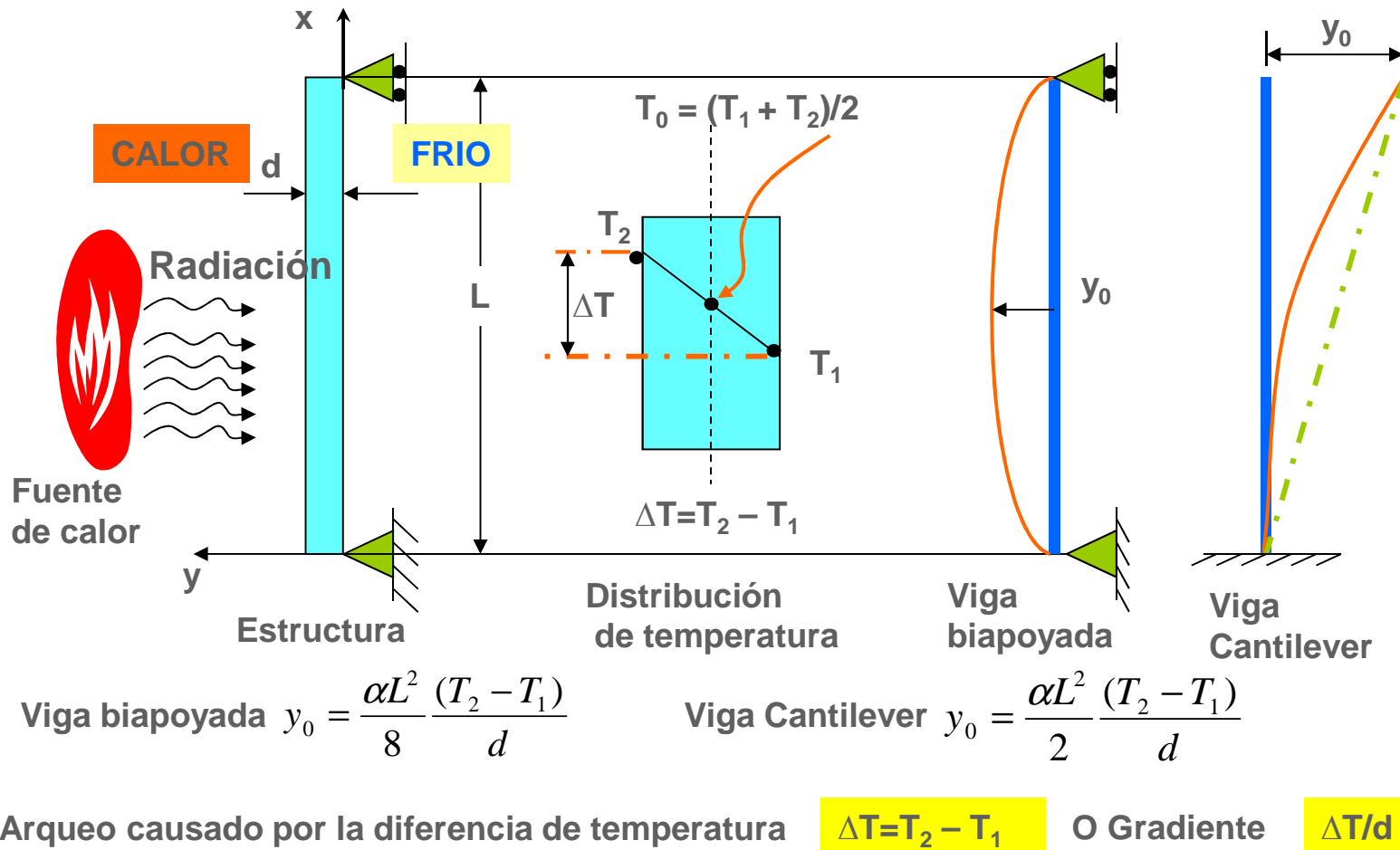


Arqueo libre del forjado de hormigón

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**

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

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

donde:

h es la altura total de la losa colaborante

ℓ 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)



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 (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:

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

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**

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

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

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

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

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



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**

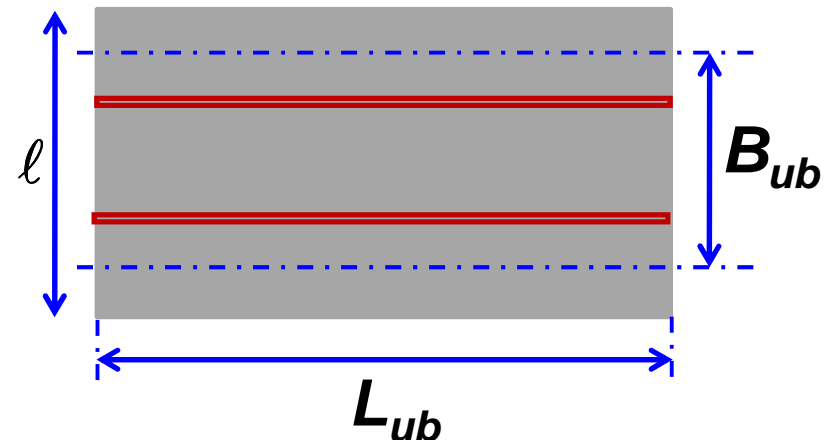
- **Capacidad de soporte de carga del modelo de losa de forjado mejorado en presencia de vigas de acero desprotegidas (1)**
 - **Se omite la acción catenaria de las vigas desprotegidas**
 - **Se considera la resistencia del momento de flexión de las vigas desprotegidas en los siguientes supuestos:**
 - 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



- **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:

$$\frac{8M_{Rd,fi}}{L^2} \frac{1+n_{ub}}{\ell}$$



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



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

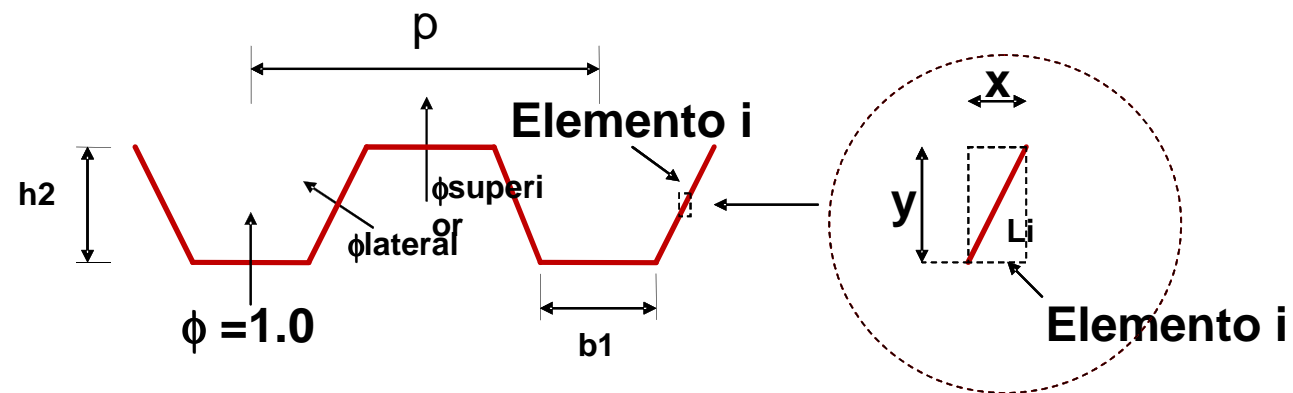
- **Según modelos de cálculo avanzados**

- 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



Comportamiento
mecánico de los
forjados
colaborantes

Método de cálculo
simplificado a 20°
C

**Método de
cálculo
simplificado a
altas
temperaturas**

- **Capacidad de carga de las vigas perimetrales protegidas**
 - Mecanismo plástico global del forjado en base a la resistencia de las vigas
 - Ratio de carga en situación de incendio
 - Carga adicional en las vigas protegidas
 - **Método simplificado de la Temperatura Crítica (EN 1994-1-2)**



Método de cálculo simplificado a altas temperaturas

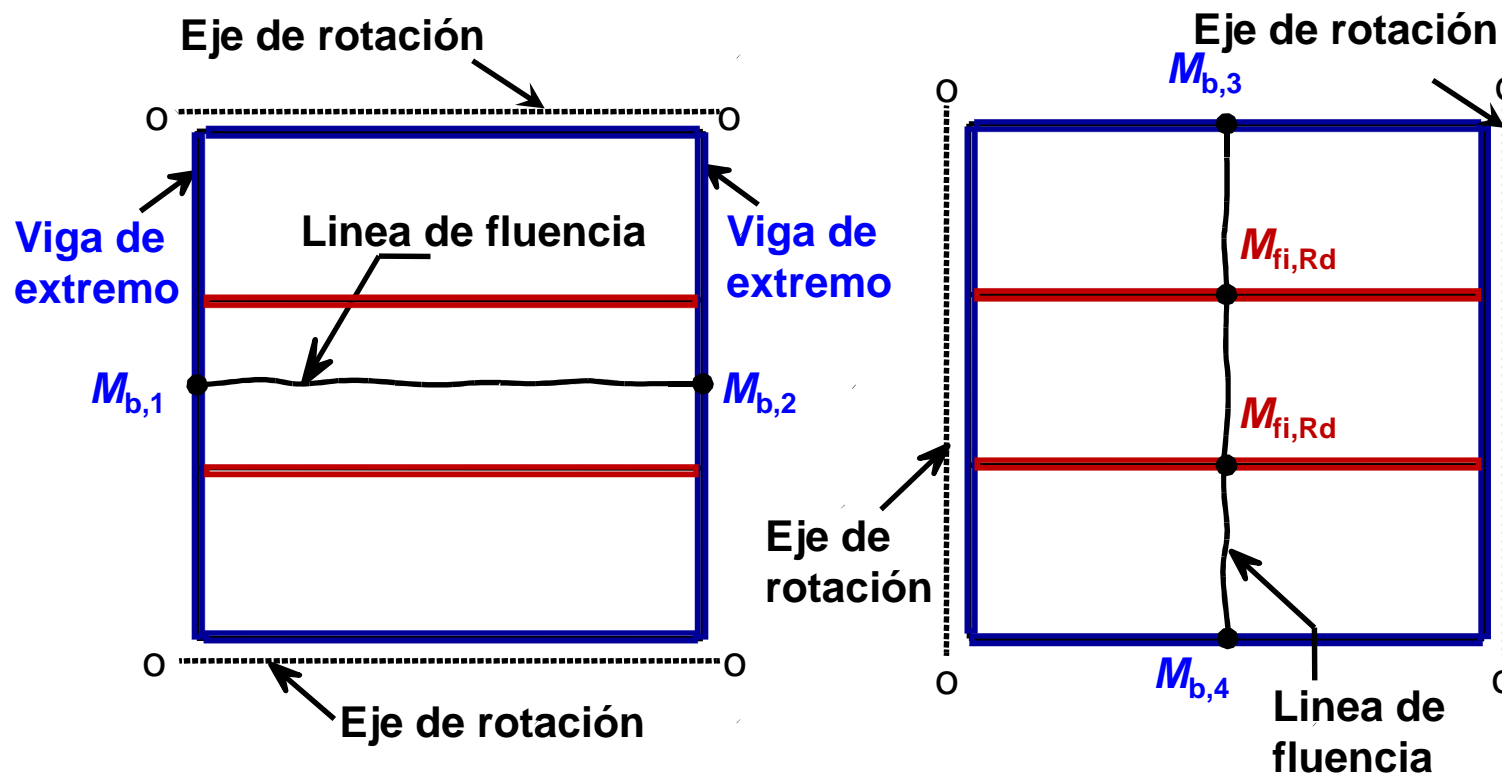


- Capacidad de carga de las vigas protegidas de extremo en base al mecanismo global plástico

Comportamiento mecánico de los forjados colaborantes

Método de cálculo simplificado a 20° C

Método de cálculo simplificado a altas temperaturas





7 ensayos a escala real en Cardington

1 large-scale BRE test (a temperatura ambiente pero simulado frente a fuego)

10 ensayos a temperatura ambiente desarrollados entre las décadas de 1960 y 1970

15 ensayos a escala pequeña realizados por la Universidad de Sheffield en 2004

44 ensayos a escala pequeña realizados a temperatura ambiente y fuego por la Universidad de Manchester Manchester

Ensayos frente a fuego ISO de los proyectos FRACOF y COSSFIRE

Ensayo a escala global desarrollado por la Universidad del Ulster en 2010

Comportamiento
mecánico de los
forjados
colaborantes

Método de cálculo
simplificado a 20°
C

Método de
cálculo
simplificado a
altas
temperaturas



Diseño y Comportamiento de forjados de hormigón en ensayos a pequeña escala



Comportamiento
mecánico de los
forjados
colaborantes

Método de cálculo
simplificado a 20°
C

Método de
cálculo
simplificado a
altas
temperaturas



22 ensayos a temperatura ambiente y 22 ensayos a fuego (Both MS and SS mesh reinforcement)





Resultados obtenidos aplicando la metodología



Comportamiento mecánico de los forjados colaborantes



Método de cálculo simplificado a 20° C

Método de cálculo simplificado a altas temperaturas

Entre el 40 y el 55% de las vigas puede dejarse sin proteger, siempre que se proteja donde es necesario.





Documentos Disponibles



Comportamiento
mecánico de los
forjados
colaborantes

Método de cálculo
simplificado a 20°
C

**Método de
cálculo
simplificado a
altas
temperaturas**

