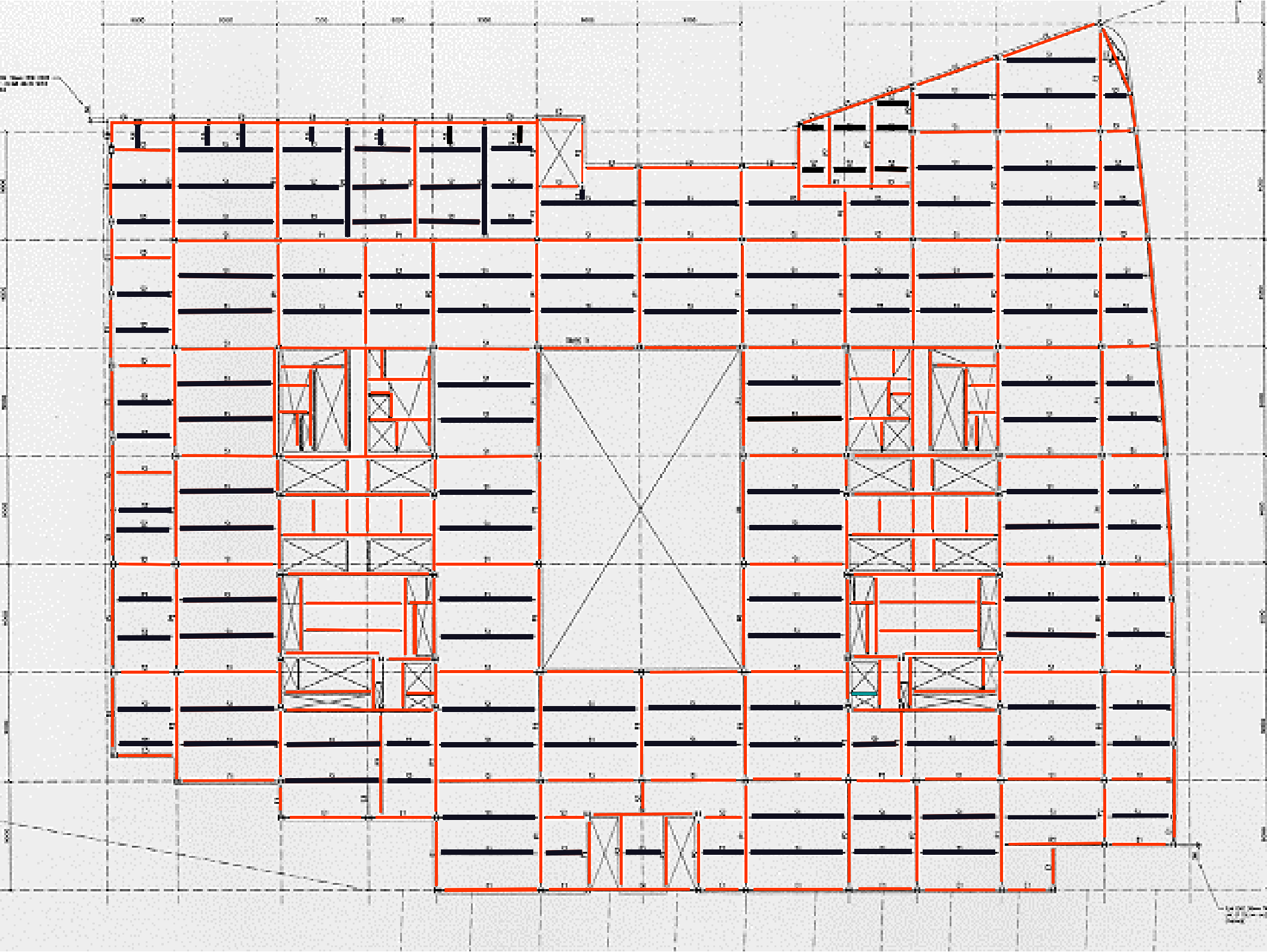
Research Fund
for Coal & Steel

Il comportamento in caso di incendio dei sistemi di solaio composti acciaio-calcestruzzo

Il metodo di calcolo semplificato

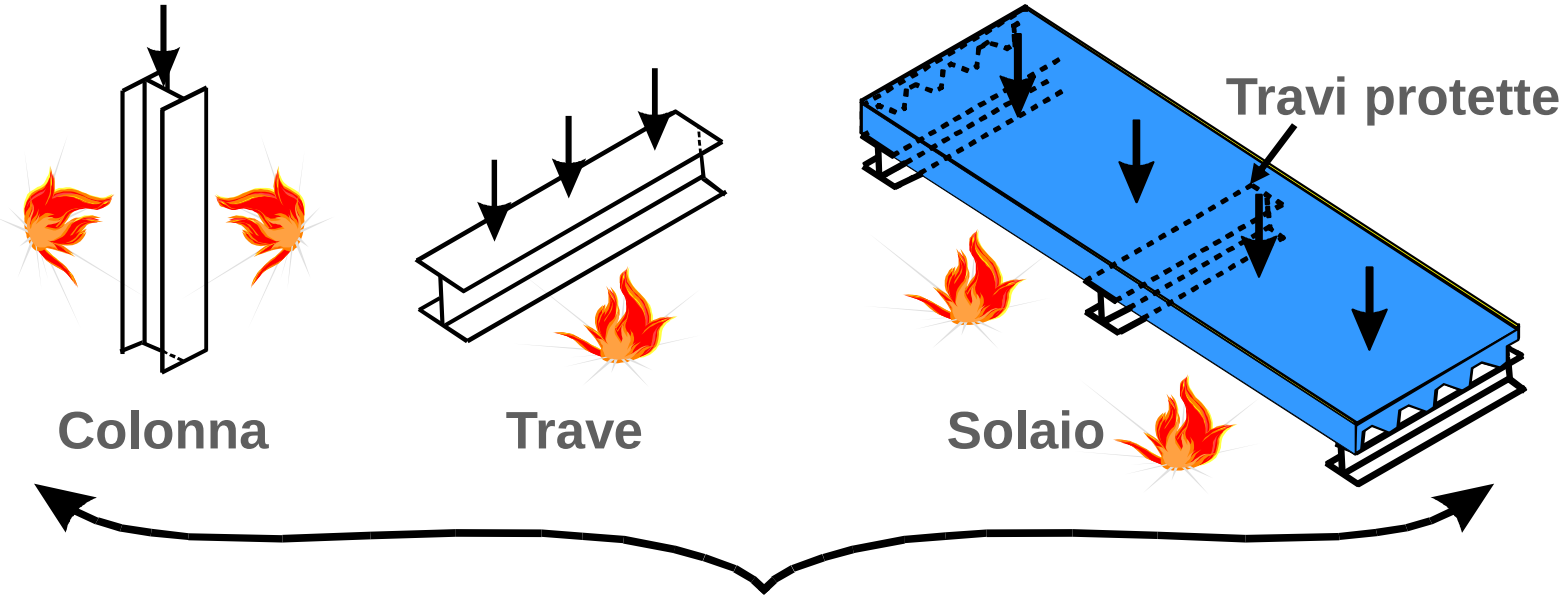
Scopo del metodo di calcolo semplificato



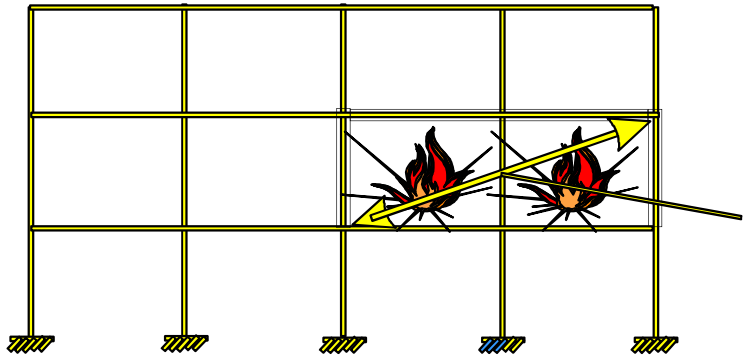
Contenuti della presentazione

- **Il comportamento meccanico dei solai composti acciaio-calcestruzzo in condizioni di incendio**
- **Metodo di calcolo semplificato delle solette in cemento armato a 20 °C**
  - **Il modello della soletta del solaio**
  - **Modi di collasso**
- **Metodo di calcolo semplificato dei solai composti acciaio-calcestruzzo ad elevate temperature:**
  - **Estensione al comportamento in caso di incendio**
  - **Effetto membrana ad elevate temperature**
  - **Contributo delle travi non protette**
  - **Progetto delle travi protette**

- **Il metodo di calcolo tradizionale**



I metodi di calcolo esistenti ipotizzano che gli elementi isolati si comportino in maniera analoga negli edifici reali



Comportamento meccanico dei solai composti

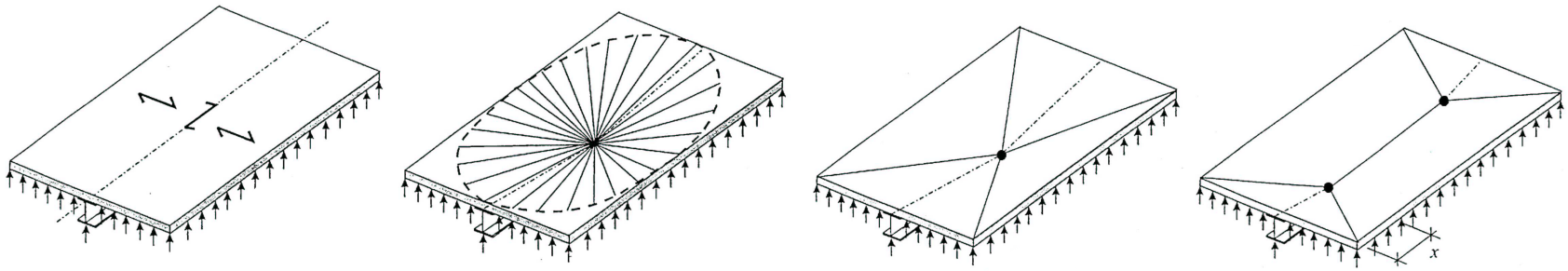
Comportamento meccanico dei solai composti acciaio-cls

Metodo di calcolo semplificato a 20°C

Metodo di calcolo semplificato a temperature elevate

- **Comportamento reale di un solaio composto realizzato con una rete di armatura di acciaio nella soletta di calcestruzzo**

Incremento di temperatura durante l'incendio



(a) **(b)** **(c)** **(d)**

Flessione semplice → **Effetto membrana**

Simple design method of reinforced concrete slabs at 20 °C

Comportamento meccanico dei solai composti acciaio-cls

Metodo di calcolo semplificato a 20°C

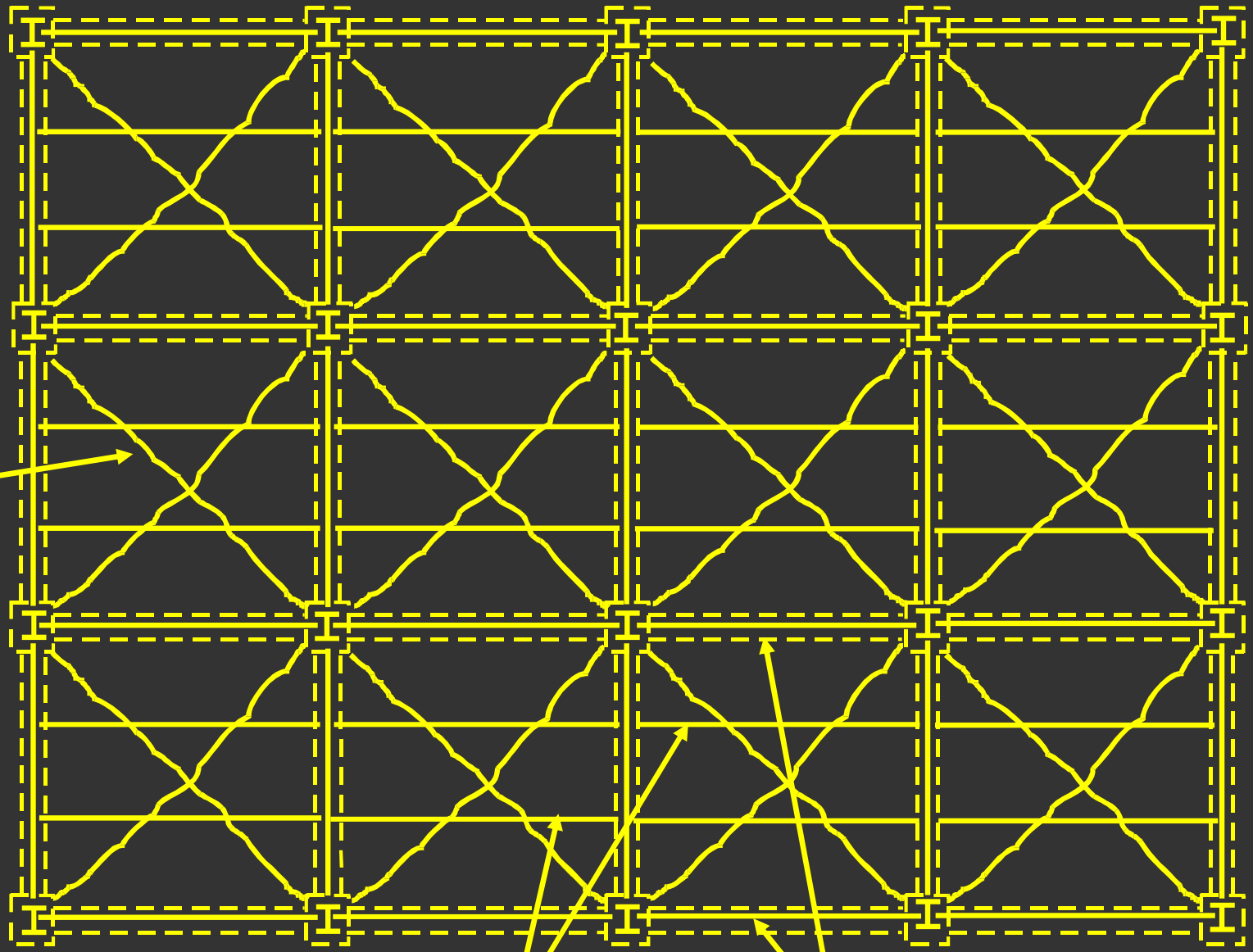
Metodo di calcolo semplificato a temperature elevate

- **Metodo sviluppato dal Prof. Colin Bailey**

  University of Manchester

  in precedenza con Building Research Establishment (BRE)

Progettare con l'effetto membrana in caso di incendio



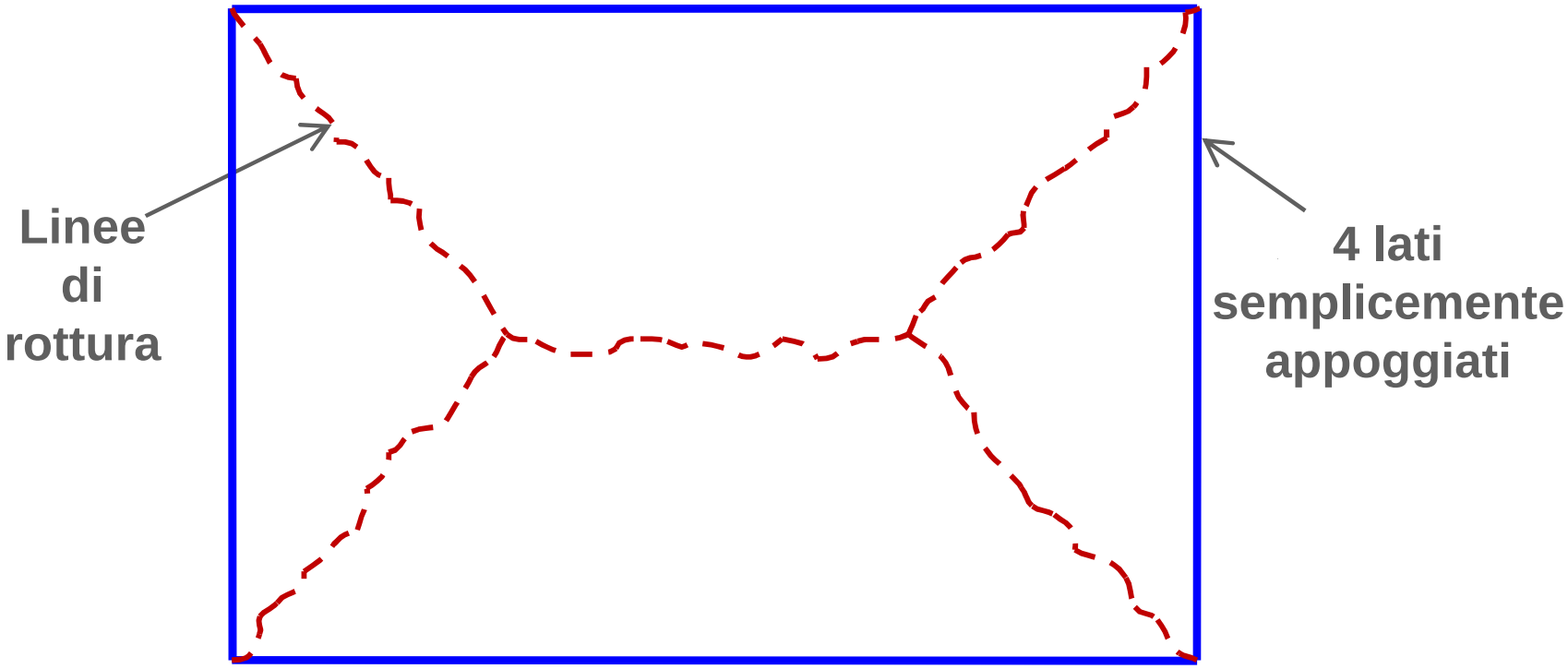
Metodo di calcolo semplificato delle solette in cemento armato a 20 °C

Comportamento meccanico dei solai composti acciaio-cls

Metodo di calcolo semplificato a 20°C

Metodo di calcolo semplificato a temperature elevate

- **Modello della soletta del solaio avente 4 lati vincolati** (Linee di rottura plastica) – orizzontalmente non vincolata – ipotesi molto conservativa



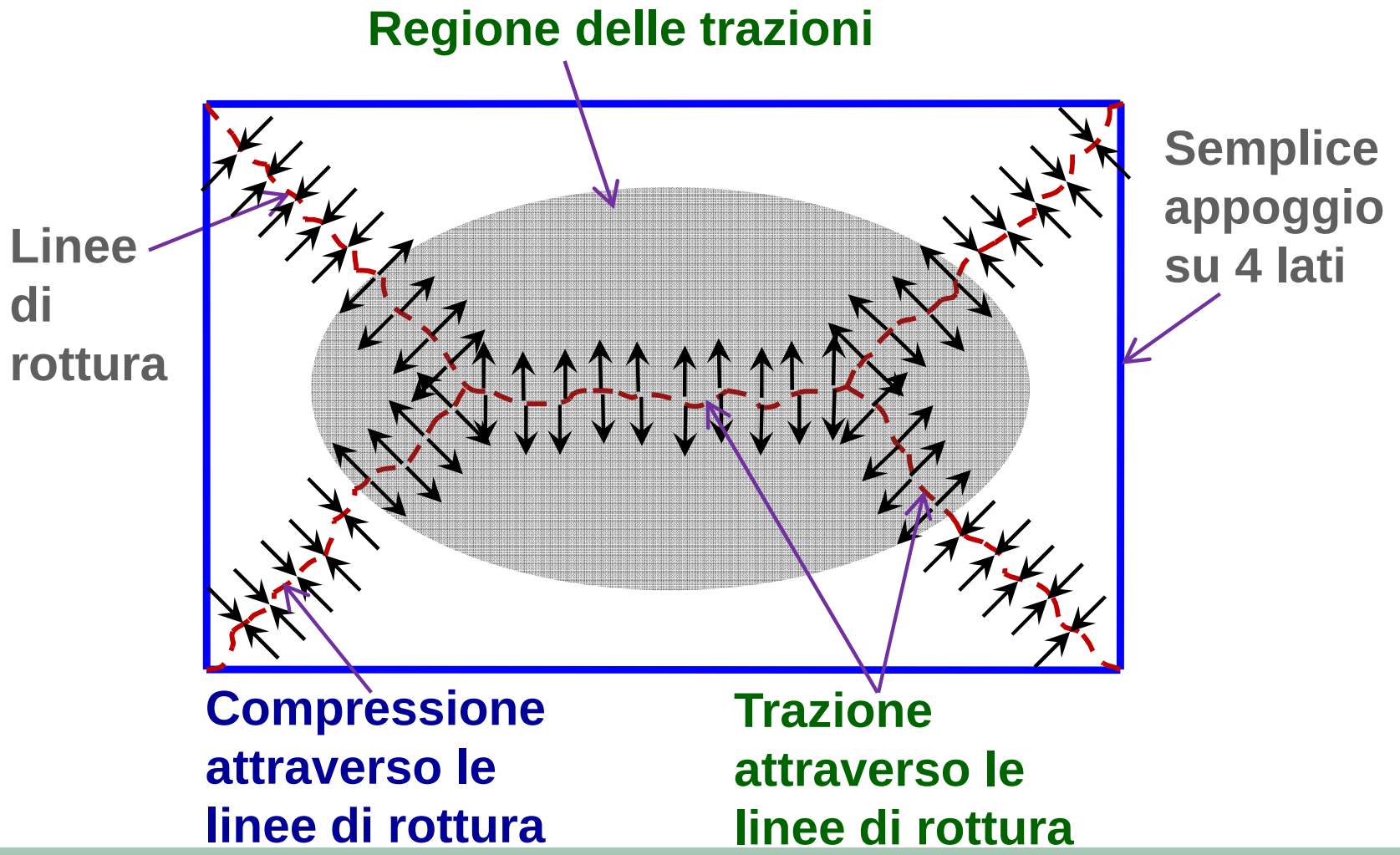
Metodo di calcolo semplificato delle solette in cemento armato a 20 °C

Comportamento meccanico dei solai composti acciaio-cls

Metodo di calcolo semplificato a 20°C

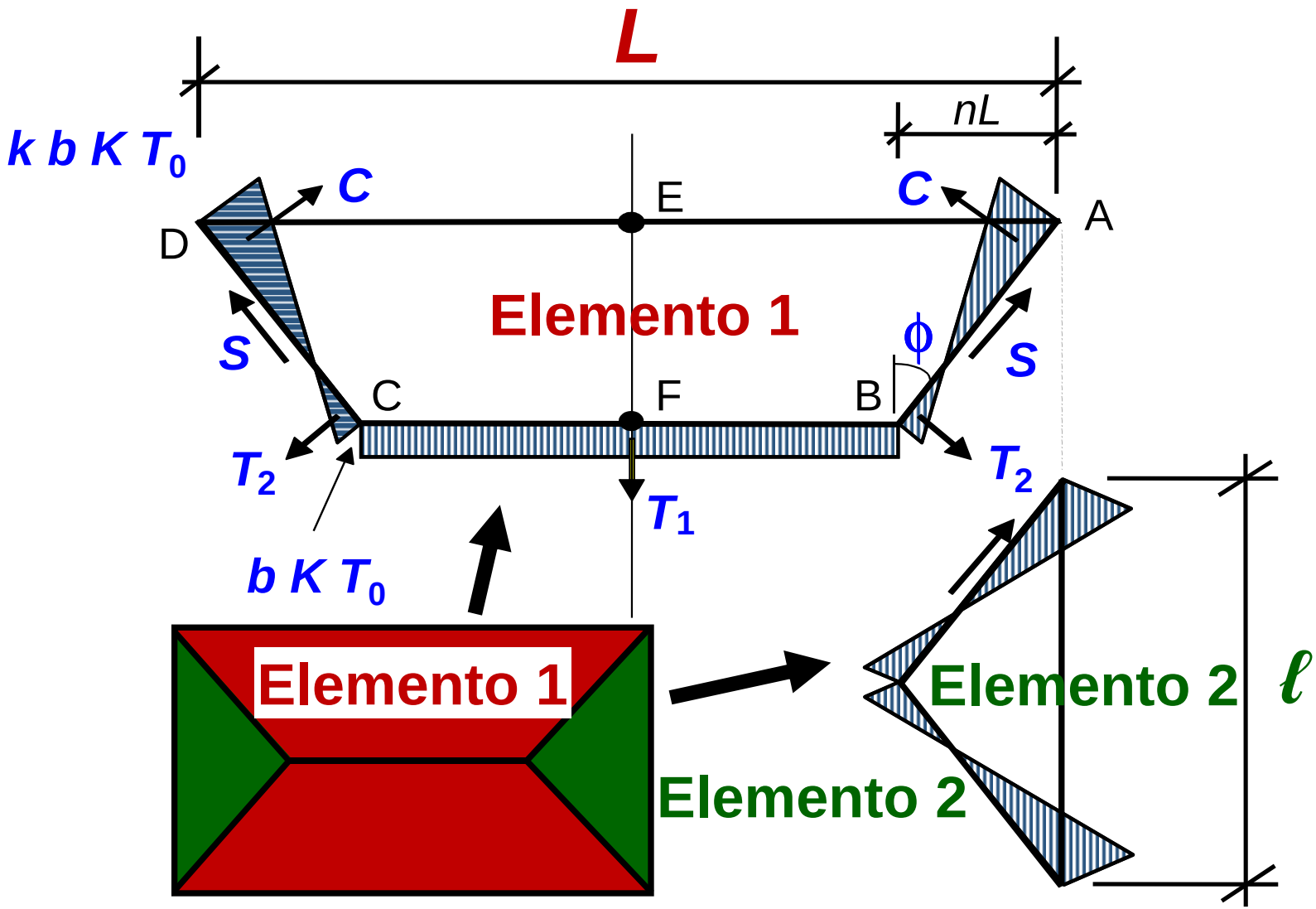
Metodo di calcolo semplificato a temperature elevate

- **Modello della soletta del solaio**
  - L'effetto membrana migliora la resistenza delle linee di rottura



Metodo di calcolo semplificato delle solette in cemento armato a 20 °C

- **Forze membranali lungo le linee di rottura (1)**

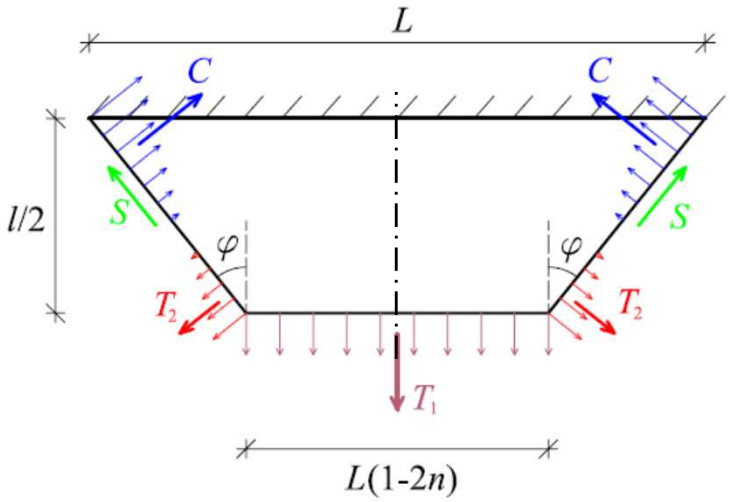


- **Forze membranali lungo le linee di rottura ()**

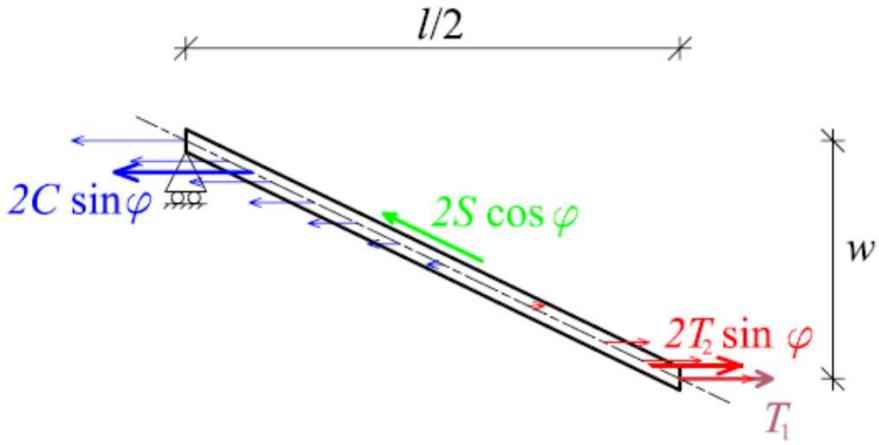
k*, *b	sono parametri che definiscono la grandezza delle forze membranali,
n	è un coefficiente dedotto dalla teoria delle linee di rottura,
K	è il rapporto tra le armature disposte lungo la luce minore e lungo la luce maggiore,
KT_0	è la resistenza della rete di armatura di acciaio per unità di larghezza,
T_1, T_2, C, S	sono le forze membranali risultanti lungo le linee di rottura.

Metodo di calcolo semplificato delle solette in cemento armato a 20 °C

- **Contributo dell'azione membranale (1)**
  - **Elemento 1**

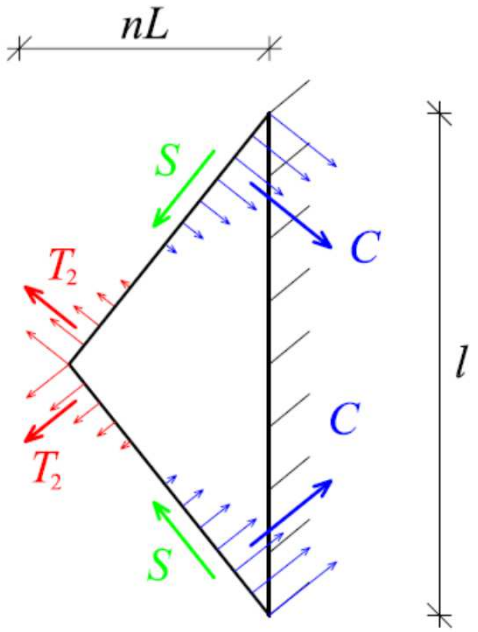


Vista in pianta delle forze membranali risultanti

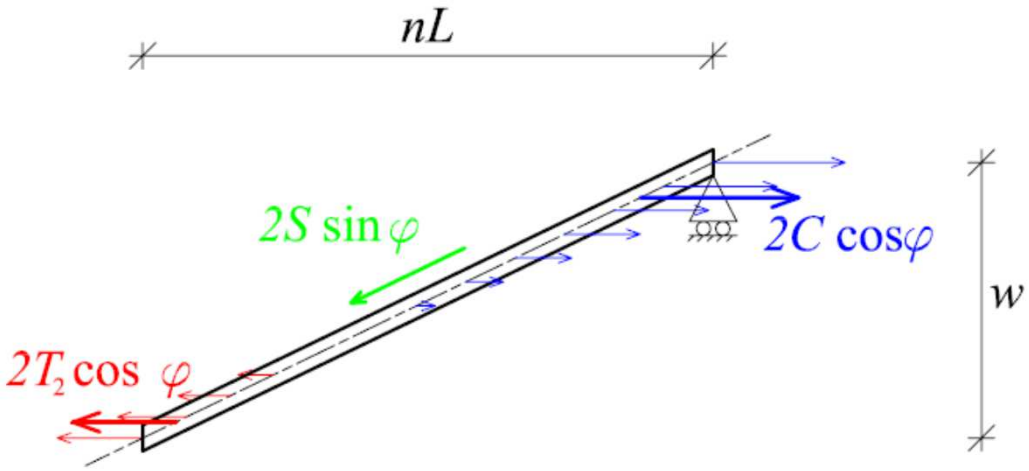


Vista laterale delle forze membranali risultanti in presenza di un'unflessione pari a *w*

- **Contributo dell'azione membranale (2)**
  - **Elemento 2**



Vista in pianta delle forze membranali risultanti



Vista laterale delle forze membranali risultanti in presenza di un'unflessione pari a *w*

- **Contributo dell'azione membranale (3)**
  - **Coefficiente di incremento per ogni elemento**

$$e_{i,\ i=1,2} = \begin{cases} e_{im} : \text{incremento dovuto alle forze membranali nell'elemento i} \\ + \\ e_{ib} : \text{incremento dovuto all'effetto delle forze nel piano sulla resistenza flessionale} \end{cases}$$

  - **Incremento complessivo**

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

dove:

μ è il coefficiente di ortotropia dell'armatura

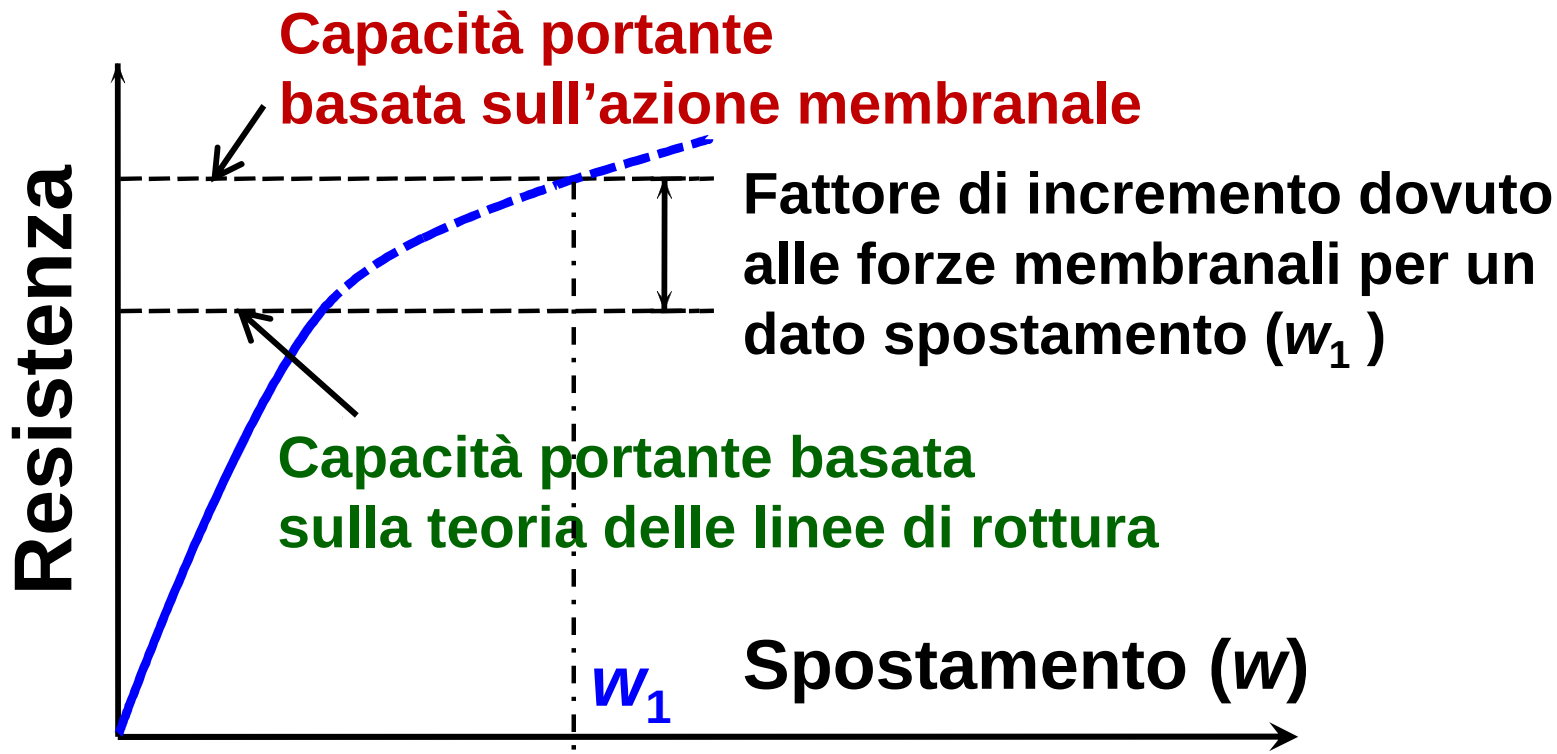
a è il rapporto geometrico della soletta = L/ℓ

Comportamento meccanico dei solai composti acciaio-cls

Metodo di calcolo semplificato a 20°C

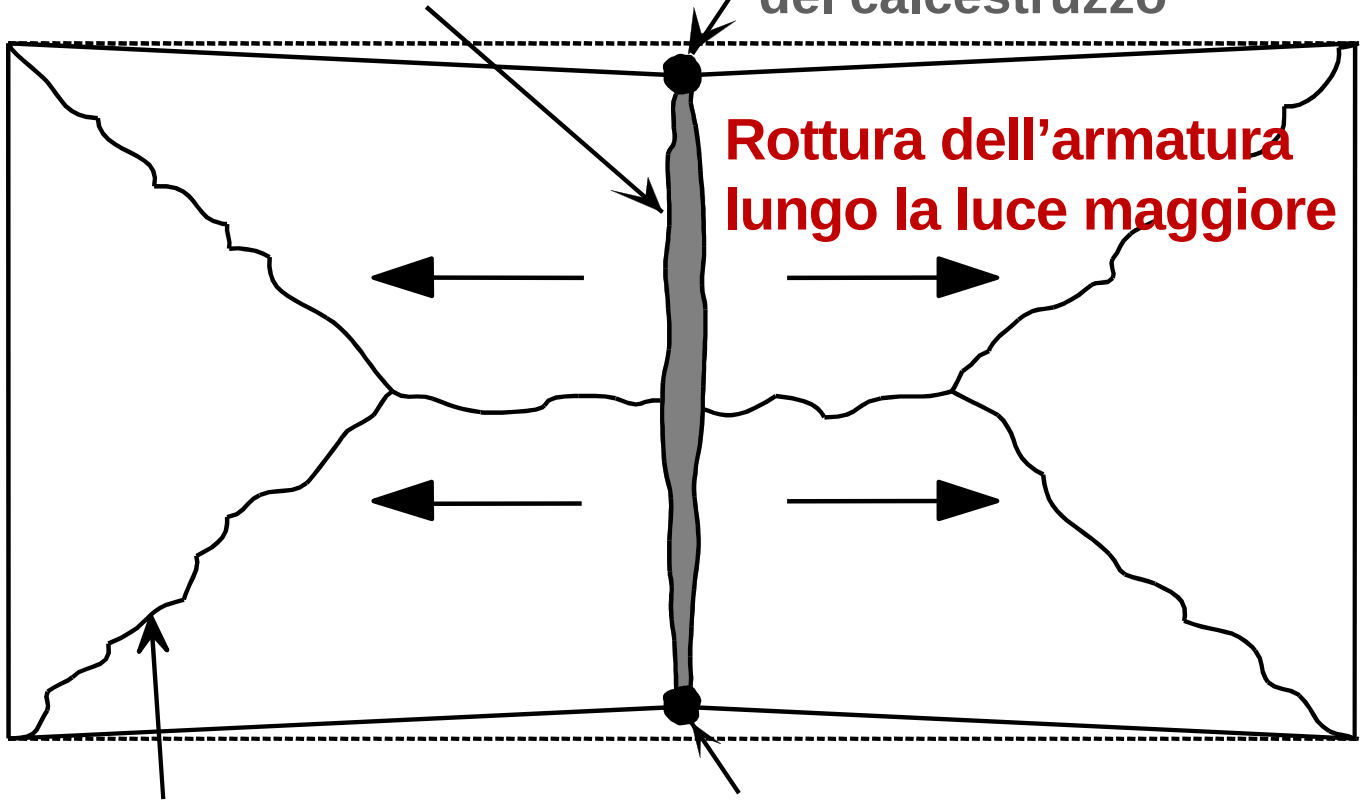
Metodo di calcolo semplificato a temperature elevate

- **Contributo dell'azione membranale (4)**



Metodo di calcolo semplificato delle solette in cemento armato a 20 °C

- **Modi di rottura** (rottura per trazione dell'armatura)



Metodo di calcolo semplificato delle solette in cemento armato a 20 °C

- **Modi di rottura** (rottura per compressione del calcestruzzo)
  - **Più probabile nel caso di rete di armatura forte**

Comportamento meccanico dei solai composti acciaio-cls

Metodo di calcolo semplificato a 20°C

Metodo di calcolo semplificato a temperature elevate

Metodo di calcolo semplificato delle solette in cemento armato a 20 °C

- **Modi di rottura** (testimonianza sperimentale)

Rottura per trazione delle armature

Rottura per compressione del calcestruzzo

Metodo di calcolo semplificato a temperature elevate

Comportamento meccanico dei solai composti acciaio-cls

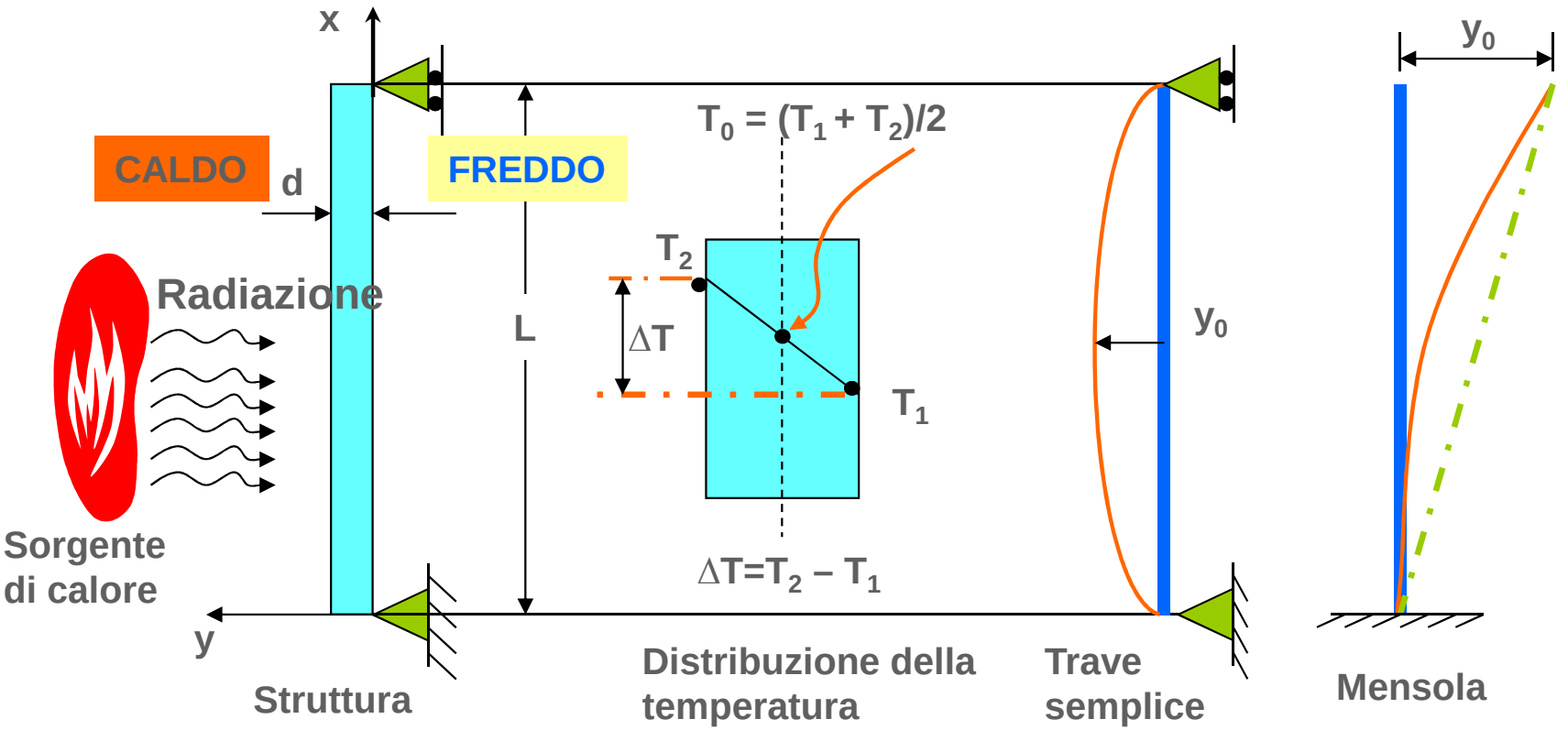
Metodo di calcolo semplificato a 20°C

Metodo di calcolo semplificato a temperature elevate

- **Modello della soletta del solaio ad elevate temperature (1)**
  - **Sulla base dello stesso modello a temperatura ambiente**
  - **Tiene conto degli effetti della temperatura sulle proprietà dei materiali.**

Metodo di calcolo semplificato a temperature elevate

Inflessione libera della soletta di calcestruzzo



Trave Semplice $y_0 = \frac{\alpha L^2}{8}\frac{(T_2 - T_1)}{d}$

Mensola $y_0 = \frac{\alpha L^2}{2}\frac{(T_2 - T_1)}{d}$

L'inflessione è causata dalla differenza di temperatura $\Delta T=T_2 - T_1$ o gradiente $\Delta T/d$

Metodo di calcolo semplificato a temperature elevate

- **Modello della soletta del solaio a temperatura elevata (2)**
  - **Tenendo conto dell'inflessione termica della soletta dovuta al gradiente di temperatura sullo spessore, che è pari a:**

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

dove:

h è lo spessore efficace della soletta

ℓ è la luce minore della soletta

α è il coefficiente di espansione termica per il calcestruzzo

Per il calcestruzzo alleggerito, è preso il valore di EN 1994-1-2

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

Per il calcestruzzo normale, è preso un valore conservativo

$\alpha_{NWC} = 1.2 \times 10^{-5}\ °K^{-1} < 1.8 \times 10^{-5}\ °K^{-1}$ (valore EN 1994-1-2)

T_2 è la temperatura della faccia inferiore della soletta (faccia esposta all'incendio)

T_1 è la temperatura della faccia superiore della soletta (faccia non esposta all'incendio)

- **Modello della soletta del solaio a temperature elevate (3)**
  - **Supponendo una deformazione meccanica media ad una tensione uguale a metà della tensione di snervamento a temperatura ambiente**
  - **La freccia della soletta corrispondente alla sua deformata parabolica dovuta ai carichi trasversali:**

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

dove:

E_s è il modulo elastico dell'armatura a 20°C

f_{sy} è la tensione di snervamento del'armatura a 20°C

L è la luce maggiore della soletta

Metodo di calcolo semplificato a temperature elevate

- **Modello della soletta del solaio a temperature elevate (3)**
  - **Quindi, la massima inflessione della soletta del solaio è:**

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

  - **Comunque, la massima inflessione della soletta del solaio è limitata a :**

$$w < \frac{\alpha(T_2 - T_1)l^2}{19.2h} + l/30$$

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

Metodo di calcolo semplificato a temperature elevate

- **Aspetti conservativi del modello della soletta del solaio ad elevate temperature**
  - **E' ipotizzata la rottura dell'armatura sugli appoggi.**
  - **Gli spostamenti verticali calcolati dovuti alla curvatua termica sono sottostimati rispetto ai valori teorici.**
  - **La curvatura termica è calcolata con riferimento alla luce minore della soletta.**
  - **Ogni ulteriore spostamento verticale indotto dall'espansione termica impedita quando la soletta si trova nella fase post critica è ignorato**
  - **Ogni contributo della lamiera di acciaio è ignorato**
  - **L'incremento della duttilità della rete d'armatura con l'aumento di temperatura è ignorato**

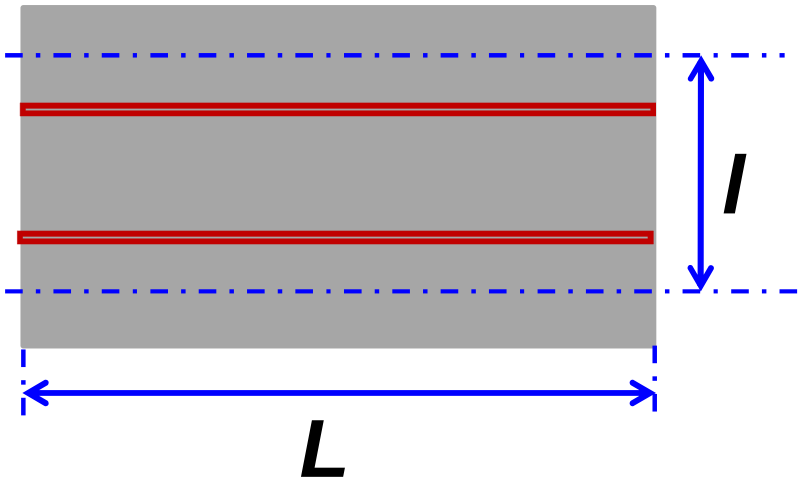
Metodo di calcolo semplificato a temperature elevate

- **Capacità portante del modello della soletta del solaio migliorata in presenza delle travi di acciaio non protette (1)**
  - **L'effetto catenaria delle travi non protette è trascurato**
  - **Il momento flettente resistente dele travi non protette è calcolato con le seguenti ipotesi:**
    - Semplice appoggio ad entrambe le estremità
    - Riscaldamento della sezione di acciaio calcolato in accordo a EN1994-1-2 4.3.4.2, considerando l'effetto ombra
    - Proprietà termiche e meccaniche di acciaio e calcestruzzo date in EN 1994-1-2

Metodo di calcolo semplificato a temperature elevate

- **Capacità portante migliorata del modello di soletta del solaio in presenza delle travi di acciaio non protette (2)**
  - **L'incremento della capacità portante dovuta alle travi non protette:**

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



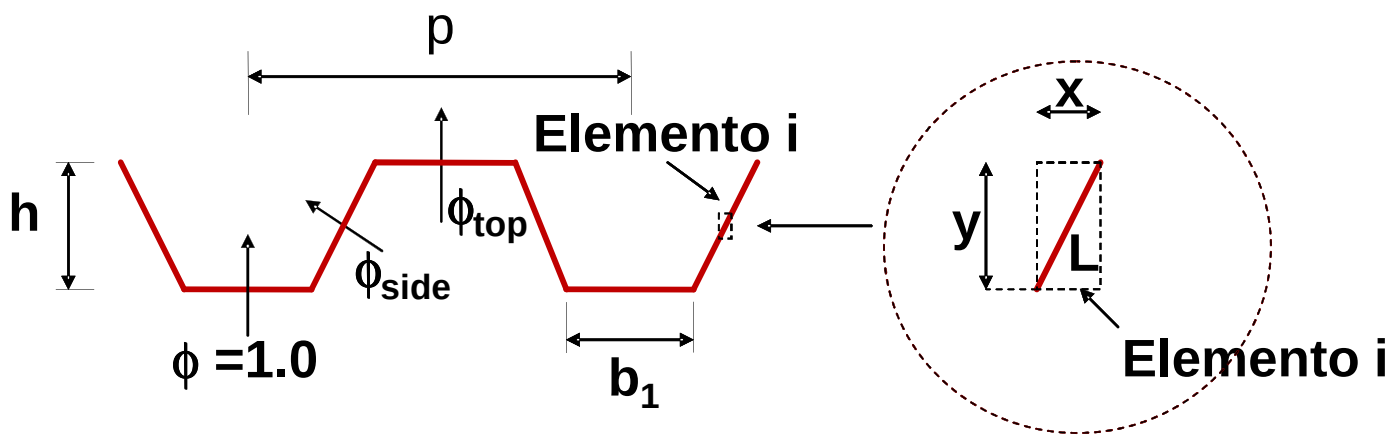
in cui:

n_{ub} è il numero delle travi non protette

$M_{fi,Rd}$ è il momento resistente di ogni trave composta non protetta

Metodo di calcolo semplificato a temperature elevate

- **Calcolo della temperatura della soletta composta**
  - **Sulla base dei modelli di calcolo avanzato**
    - Metodo alle differenze finite 2D
    - Proprietà termiche dei materiali secondo Eurocodice 4 parte 1-2 sia per acciaio che per calcestruzzo
    - L'effetto ombra è tenuto in conto per la soletta composta



Metodo di calcolo semplificato a temperature elevate

Comportamento meccanico dei solai composti acciaio-cls

Metodo di calcolo semplificato a 20°C

Metodo di calcolo semplificato a temperature elevate

- **Capacità portante delle travi perimetrali protette**
  - **Meccanismo del solaio completo allo stato limite plastico basato sulla resistenza della trave**
  - **Livello dei carichi nella situazione di incendio**
    - Carico aggiuntivo sulle travi protette
  - **Metodo di calcolo semplificato della temperatura critica (EN 1994-1-2)**

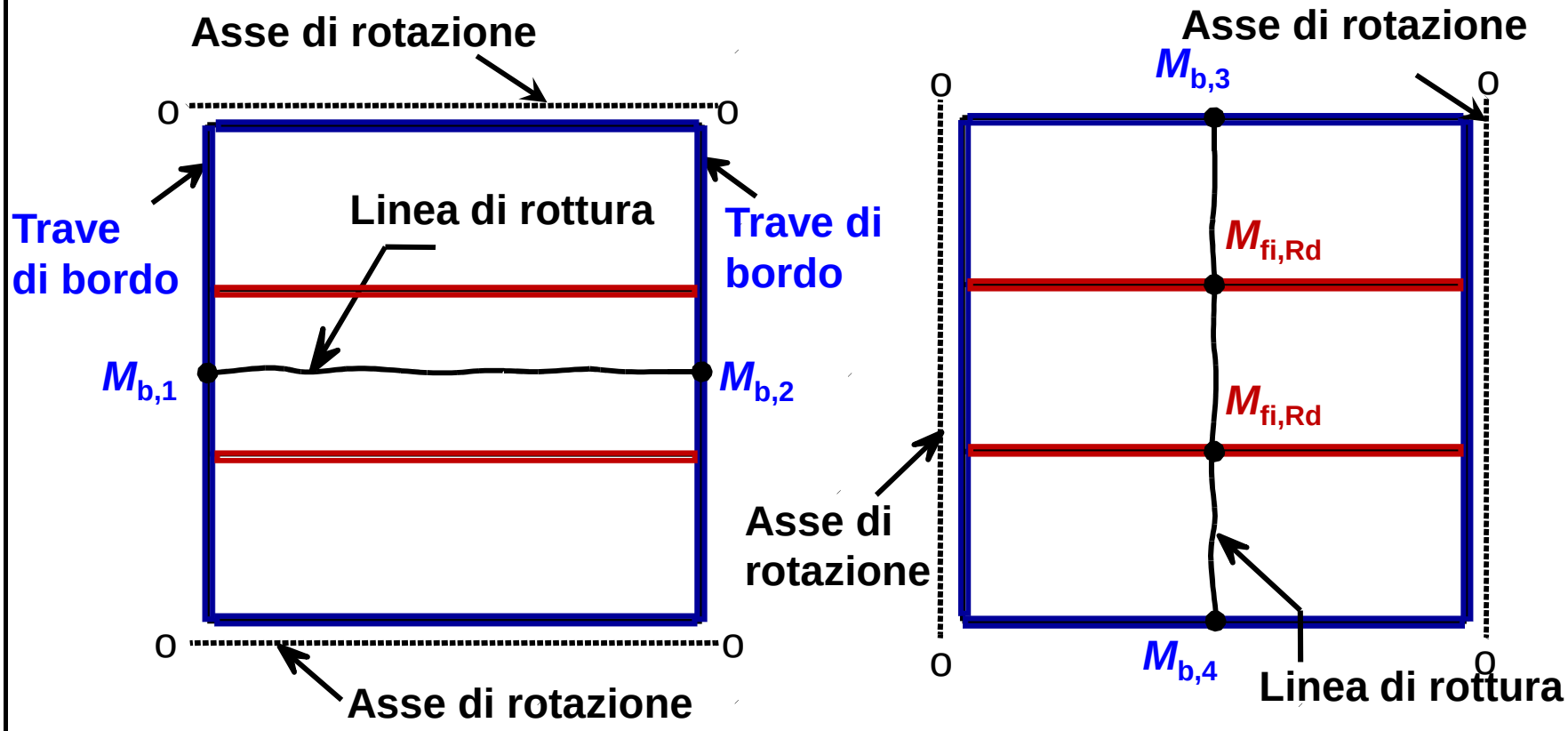
Metodo di calcolo semplificato a temperature elevate

- **Capacità portante delle travi perimetrali protette sulla base del meccanismo plastico completo**

Comportamento meccanico dei solai composti acciaio-cls

Metodo di calcolo semplificato a 20°C

Metodo di calcolo semplificato a temperature elevate



Validazione sulla base dei dati sperimentali

Comportamento meccanico dei solai composti acciaio-cls

Metodo di calcolo semplificato a 20°C

Metodo di calcolo semplificato a temperature elevate

7 prove di Cardington in grande scala

1 prova al BRE in grande scala large-scale BRE test (a freddo ma simulata per il caso di incendio)

10 prove a freddo condotte nel periodo 1960/1970

15 prove in piccola scala condotte all'Università di Sheffield nel 2004

44 prove a freddo e al fuoco in piccola scala condotte all' Università di Manchester

Prove di incendio ISO FRACOF e COSSFIRE

Prova in grande scala condotta all'Università di Ulster nel 2010.

Comportamento sperimentale in piccola scala e progetto delle solette in calcestruzzo

Comportamento meccanico dei solai composti acciaio-cls

Metodo di calcolo semplificato a 20°C

Metodo di calcolo semplificato a temperature elevate

22 prove a freddo e 22 identiche prove al fuoco (sia con MS che SS reti di armatura)

Risultati dell'applicazione della metodologia

Comportamento meccanico dei solai composti acciaio-cls

Metodo di calcolo semplificato a 20°C

Metodo di calcolo semplificato a temperature elevate

Tra 40 e 55% delle travi possono essere lasciate non protette lasciando la protezione solo dove essa è necessaria

Documentazione disponibile

Comportamento meccanico dei solai composti acciaio-cls

Metodo di calcolo semplificato a 20°C

Metodo di calcolo semplificato a temperature elevate