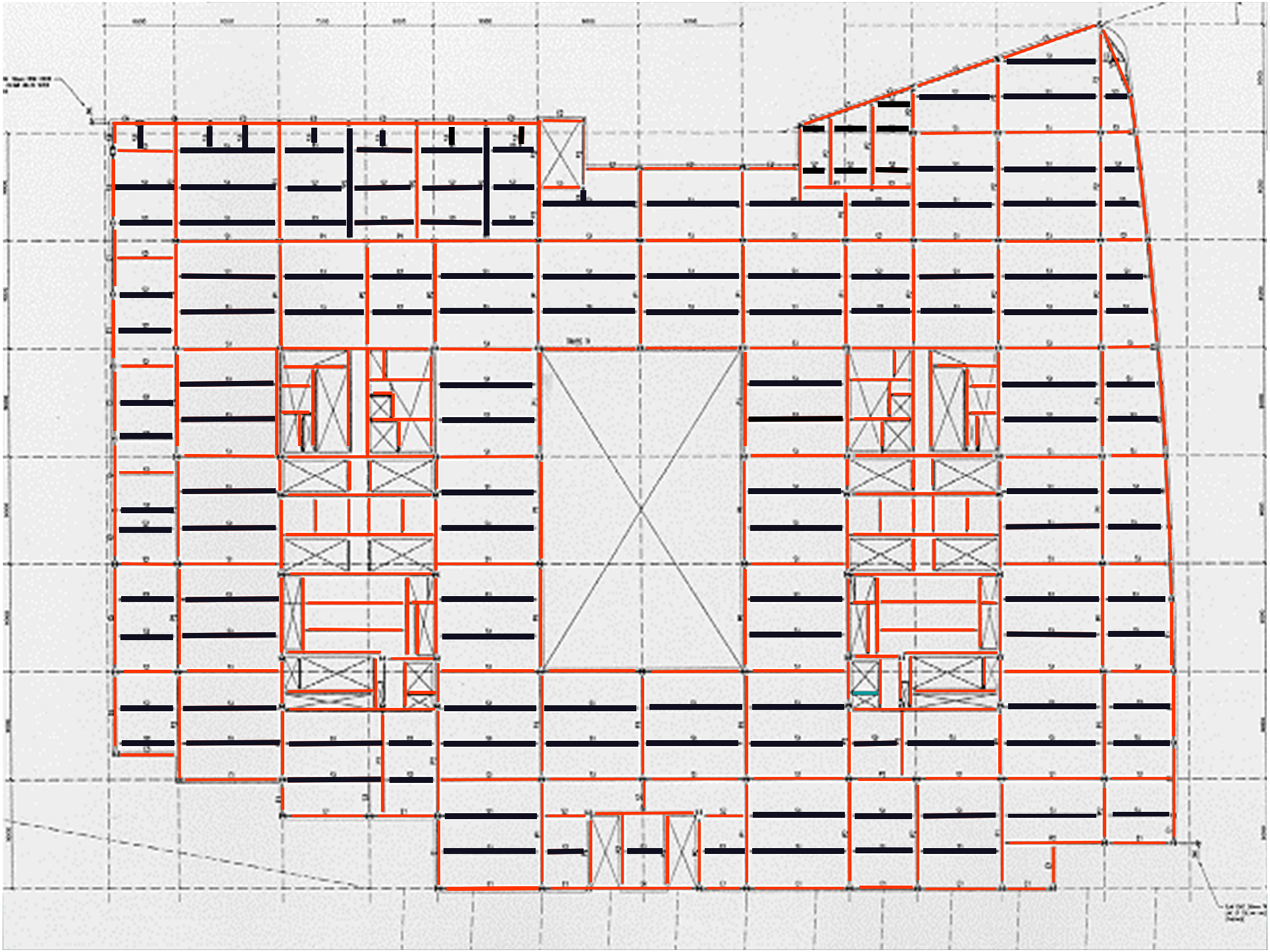
Research Fund for Coal & Steel

# Comportamento ao fogo de lajes mistas aço-betão

*Método de cálculo simplificado*

# Objetivo do método de cálculo



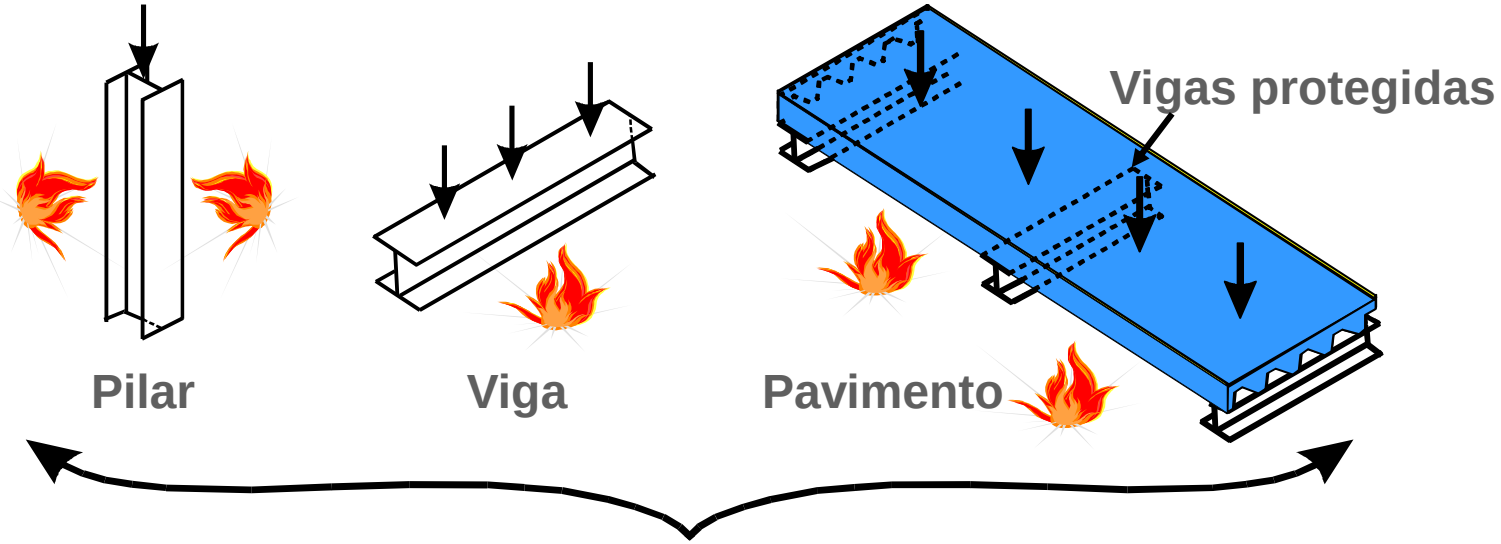
# Conteúdo da apresentação

- **Comportamento mecânico de pavimentos mistos em situação de incêndio**
- **Método de cálculo simplificado de lajes de betão reforçadas a 20℃**
  - **Modelo da laje de pavimento**
  - **Modos de rotura**
- **Método de cálculo simplificado de pavimentos mistos a elevadas temperaturas**
  - **Extensão para o comportamento ao fogo**
  - **Efeito membrana a elevadas temperaturas**
  - **Contribuição de vigas não protegidas**
  - **Dimensionamento de vigas protegidas**

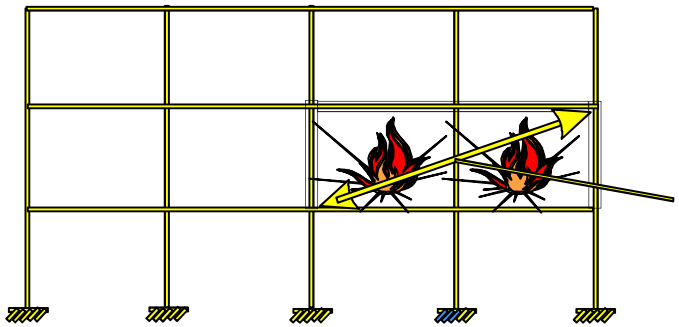
# Comportamento mecânico de pavimentos mistos



- **Método de cálculo tradicional**




**Os métodos de cálculo existentes consideram que membros isolados irão ter um desempenho semelhante em edifícios reais**

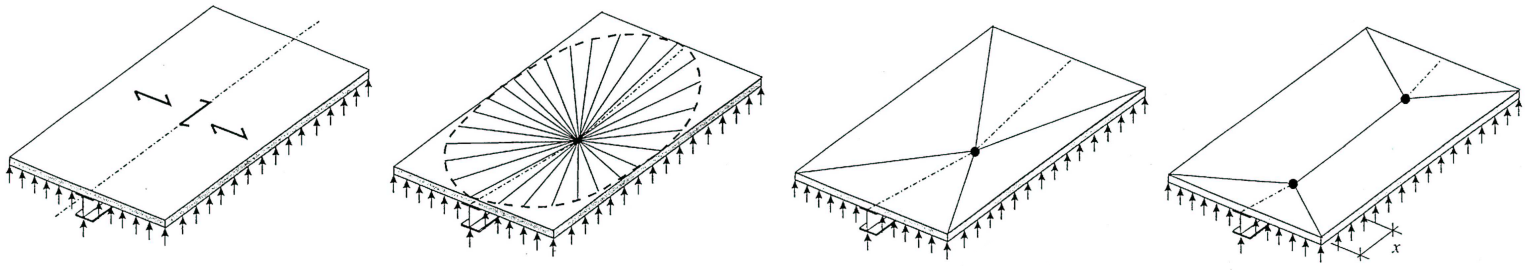


# Comportamento mecânico de pavimentos mistos



- **Comportamento real de um pavimento misto com rede de armadura na laje de betão**

**Aumento de temperatura durante o incêndio**



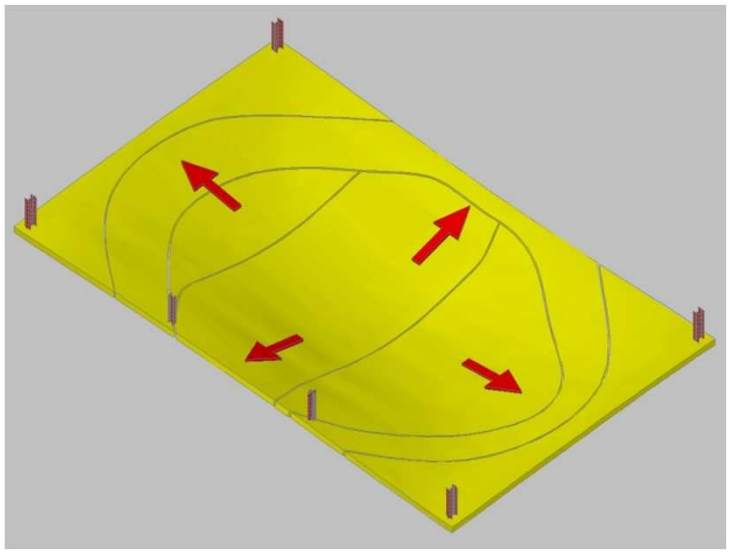
**(a)** **(b)** **(c)** **(d)**

**Flexão** → **Efeito da membrana**

# Comportamento mecânico de pavimentos mistos



- **Comportamento real de um pavimento misto com rede de armadura na laje de betão**



**Efeito da membrana**

# Método de cálculo simplificado de lajes de betão reforçadas a 20 °C

Comportamento mecânico de pavimentos mistos

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

Método de cálculo simplificado a elevadas temperaturas

- **Método desenvolvido pelo Professor Colin Bailey**

  **Universidade de Manchester**

  **Ex-investigador do Building Research Establishment (BRE)**

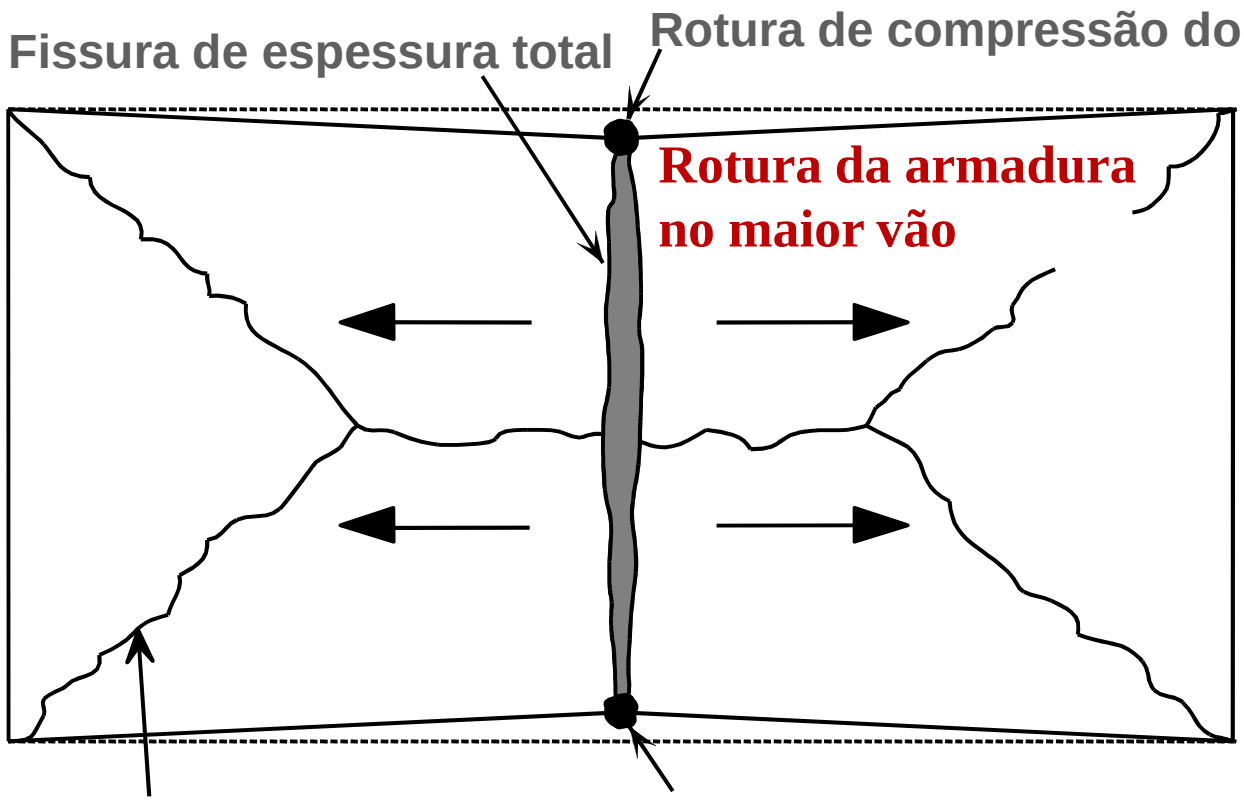
# Método de cálculo simplificado de lajes de betão reforçadas a 20 °C

Comportamento mecânico de pavimentos mistos

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

Método de cálculo simplificado a elevadas temperaturas

- **Modos de rotura** (rotura de tração da armadura)



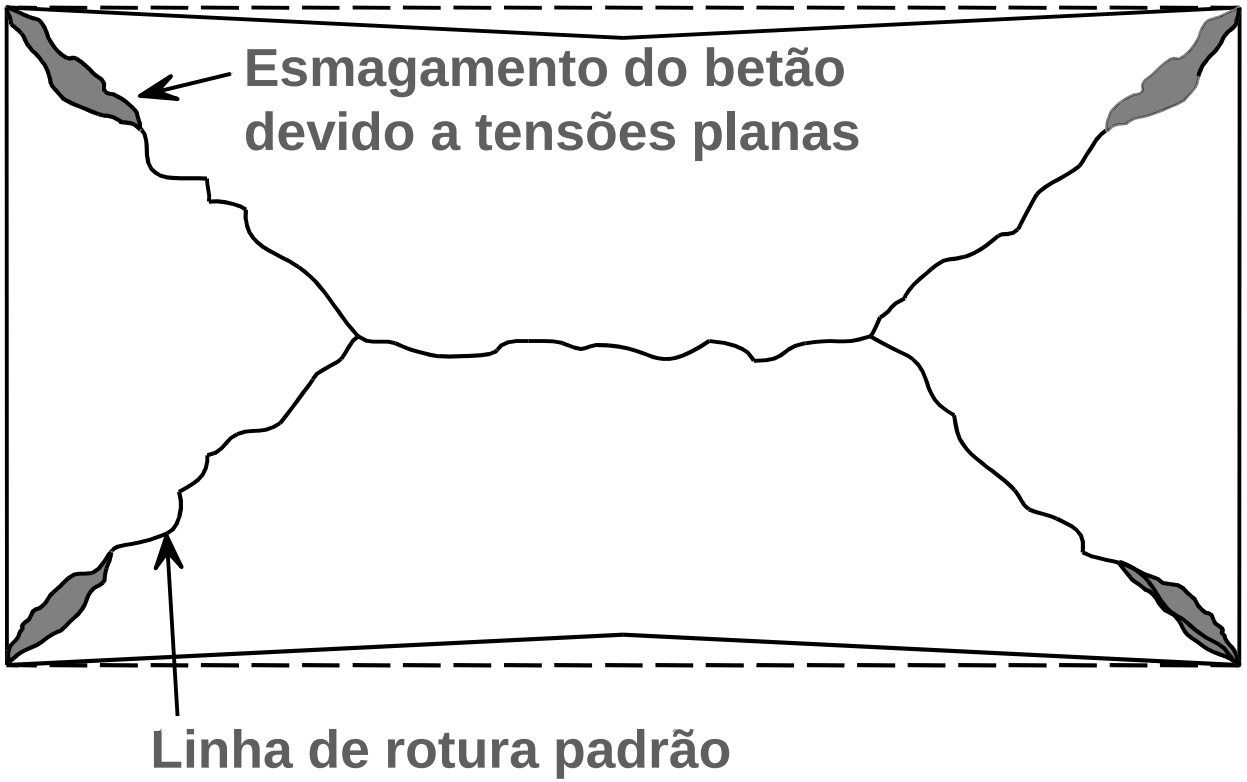
# Método de cálculo simplificado de lajes de betão reforçadas a 20 °C

Comportamento mecânico de pavimentos mistos

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

Método de cálculo simplificado a elevadas temperaturas

- **Modos de rotura** (rotura de compressão do betão)
  - **Mais provável de ocorrer no caso de rede de armadura forte**



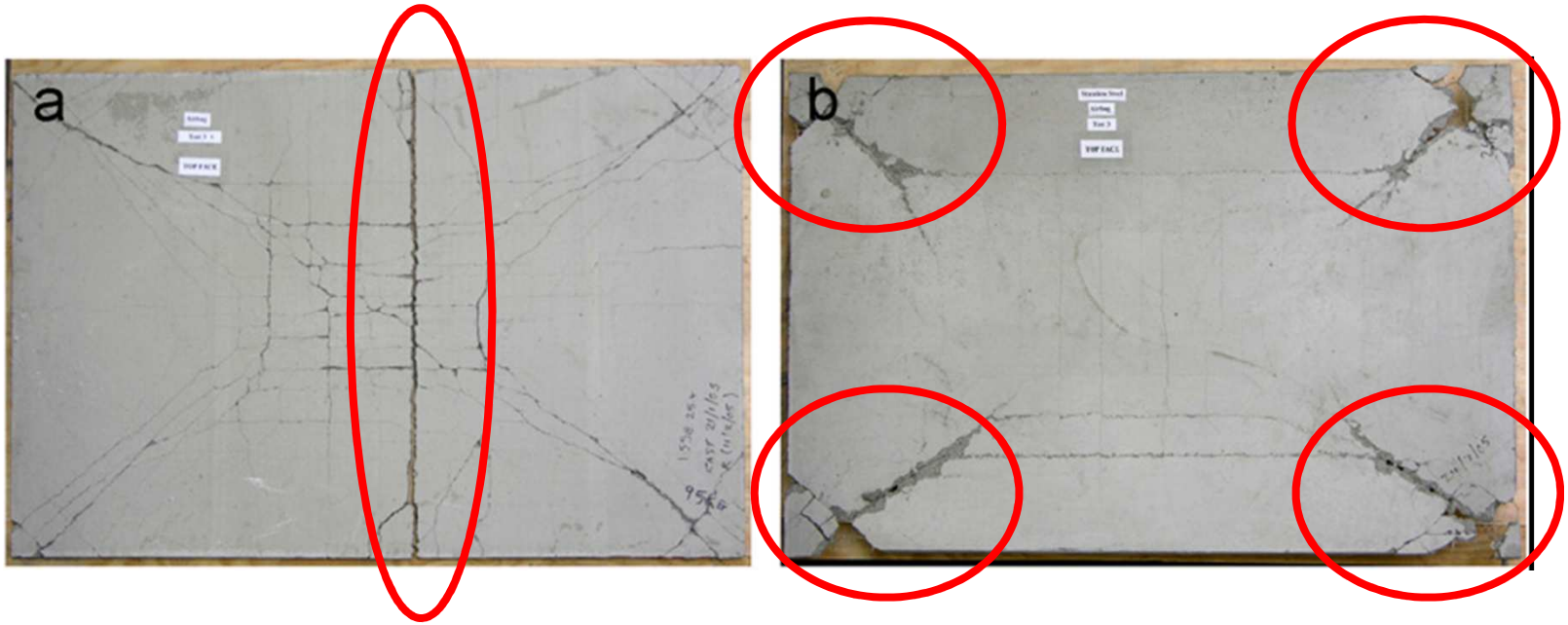
# Método de cálculo simplificado de lajes de betão reforçadas a 20 °C

Comportamento mecânico de pavimentos mistos

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

Método de cálculo simplificado a elevadas temperaturas

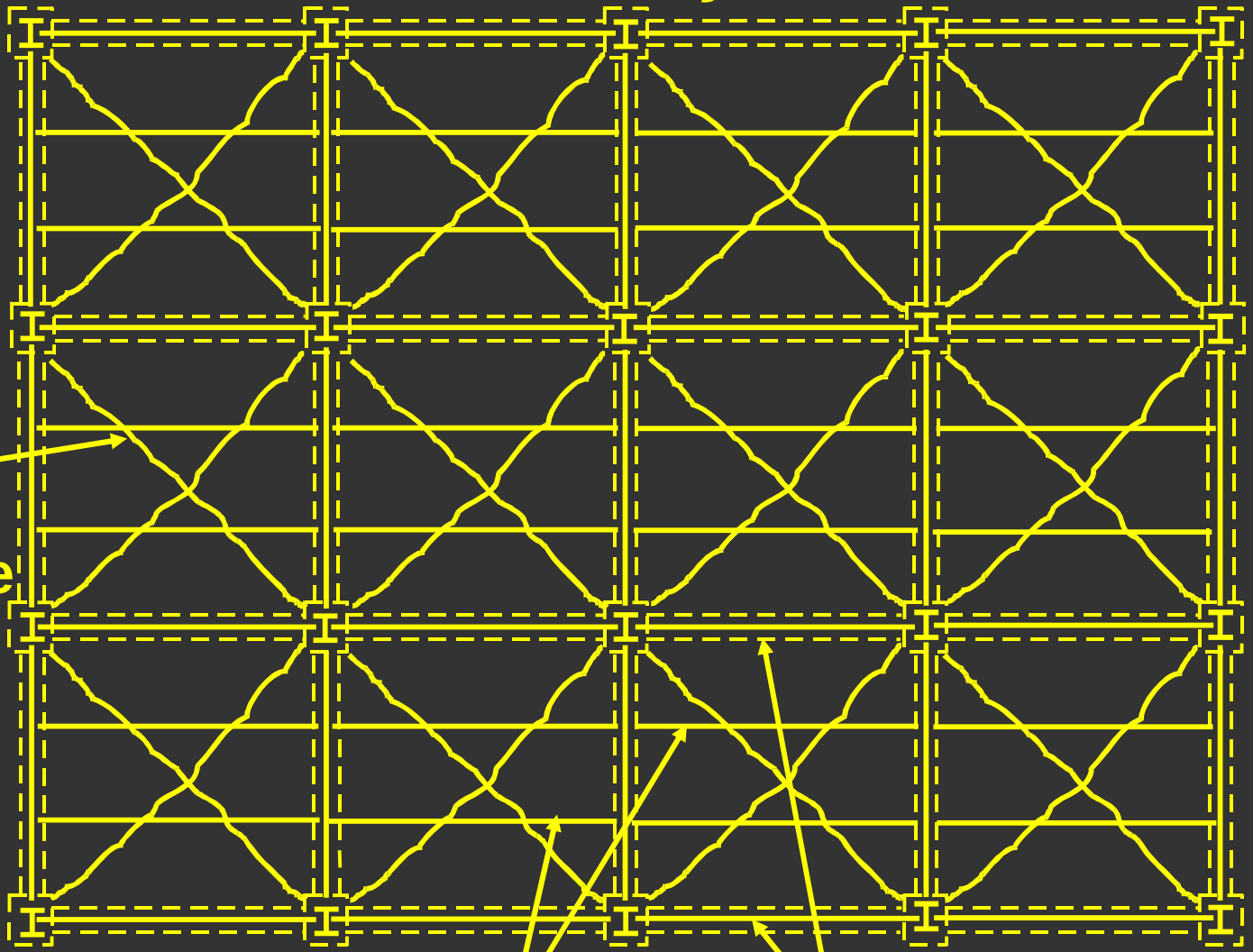
- **Modos de rotura** (evidência experimental)




**Rotura de tração da armadura**

**Rotura de compressão do betão**

# *Dimensionamento tendo em conta o efeito de membrana em situação de incêndio*



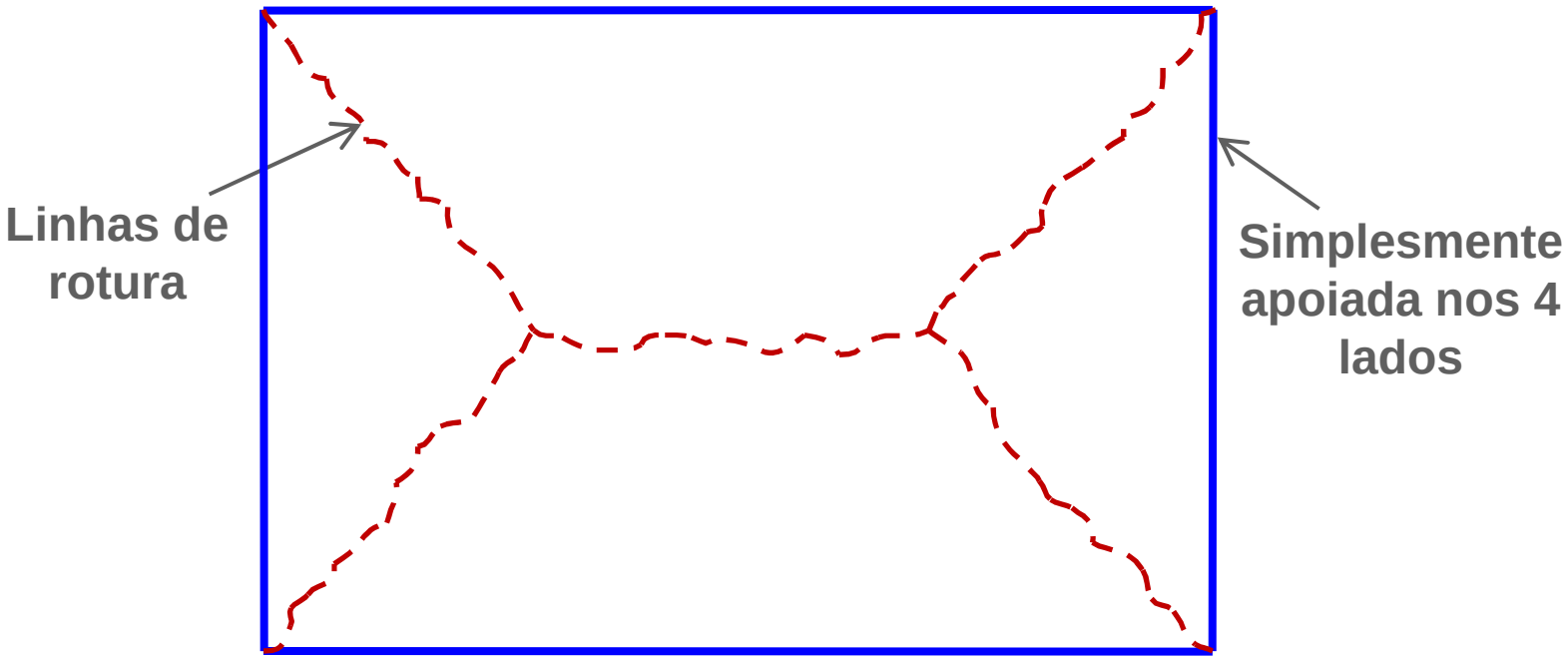
# Método de cálculo simplificado de lajes de betão reforçadas a 20 °C

Comportamento mecânico de pavimentos mistos

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

Método de cálculo simplificado a elevadas temperaturas

- **Modelo da laje de pavimento com 4 lados restringidos verticalmente** (linhas de rotura) – não restringido horizontalmente – suposição muito conservativa



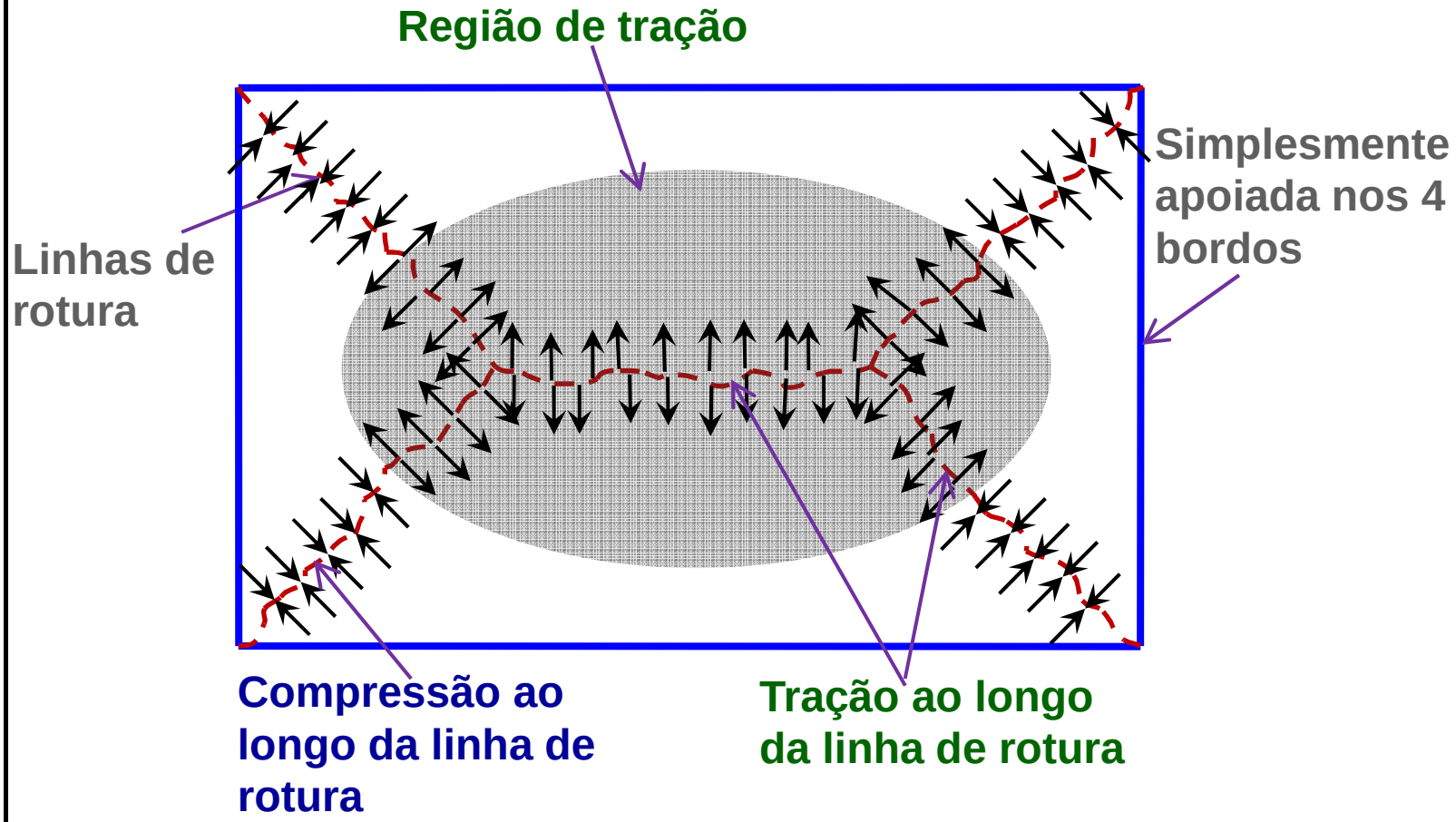
# Método de cálculo simplificado de lajes de betão reforçadas a 20 °C

Comportamento mecânico de pavimentos mistos

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

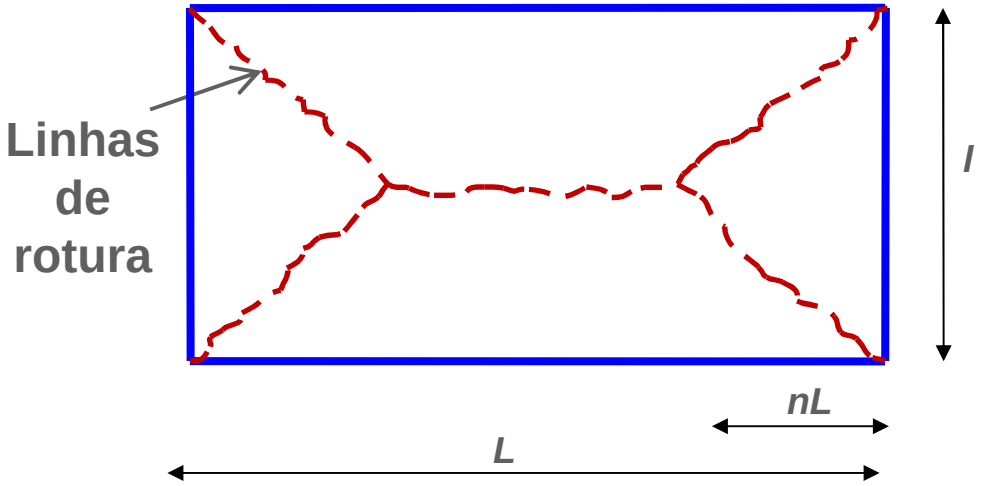
Método de cálculo simplificado a elevadas temperaturas

- **Modelo da laje de pavimento**
  - **Efeito de membrana melhorando a resistência das linhas de rotura**



# Método de cálculo simplificado de lajes de betão reforçadas a 20 °C

- **Carga uniformemente distribuída máxima suportada pela laje** (linhas de rotura) – não restringido horizontalmente – suposição muito conservativa




$$a = \frac{l}{L}$$

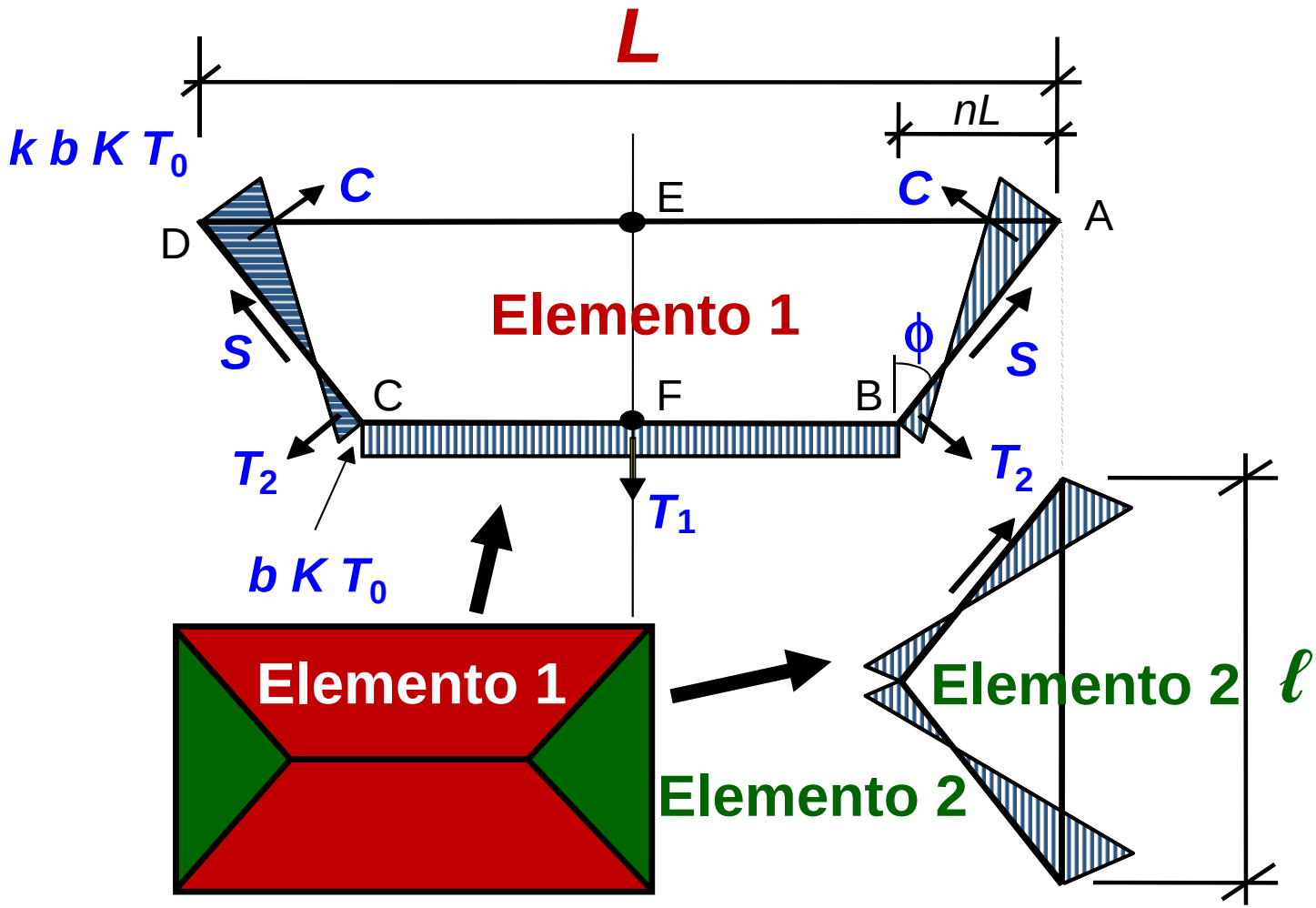
$$n = \frac{1}{2\mu a^2}\left(\sqrt{3\mu a^2 + 1} - 1\right)$$

**Conhecidos, o momento resistente da laje $M_{Rd}$, $a$, e $n$ determina-se a carga resistente de acordo com a teoria das linhas de rotura e terá de ser:**

$$q_{Ed} \le q_{Rd} = 6\frac{M_{Rd}}{n^2 a^2 l^2}$$

# Método de cálculo simplificado de lajes de betão reforçadas a 20 °C

- **Forças de membrana ao longo das linhas de rotura (1)**



# Método de cálculo simplificado de lajes de betão reforçadas a 20 °C

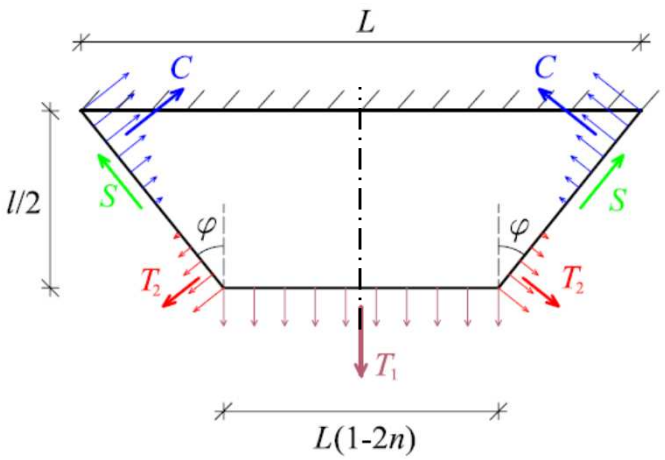
- **Forças de membrana ao longo das linhas de rotura (2)**

| | |
|---|---|
| $k$, $b$ | são parâmetros que definem a magnitude das forças de membrana, |
| $n$ | é um fator deduzido a partir da teoria da linha de rotura, |
| $K$ | é a razão entre a armadura no menor vão e a armadura no maior vão, |
| $KT_0$ | é a resistência da rede de armadura por unidade de largura, |
| $T_1$, $T_2$, $C$, $S$ | são as forças de membrana resultantes ao longo das linhas de rotura. |

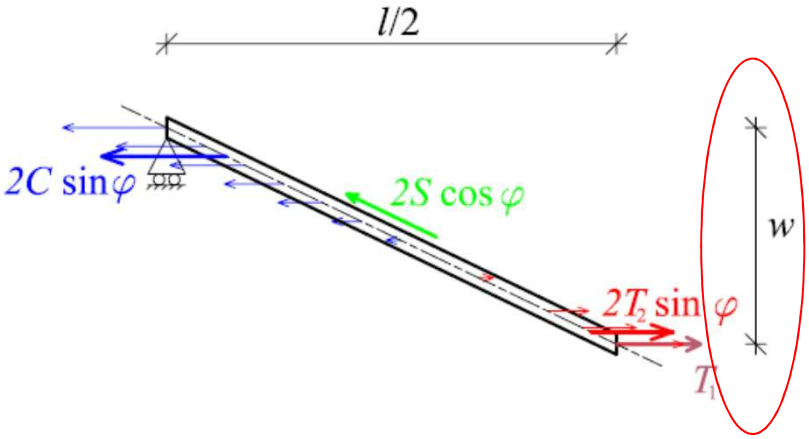
# Método de cálculo simplificado de lajes de betão reforçadas a 20 °C



- **Contribuição da ação membrana (1)**
  - **Elemento 1**



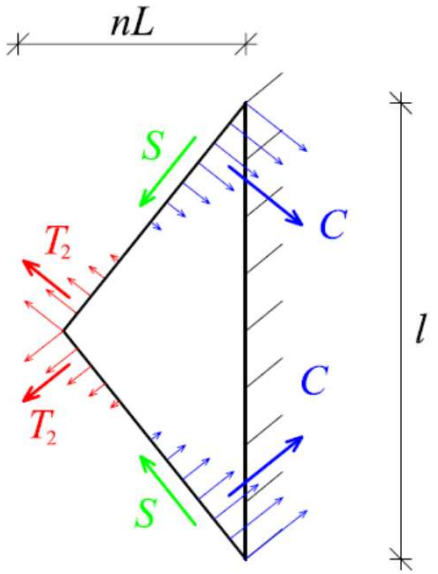

**Vista em planta das forças de membrana resultantes**



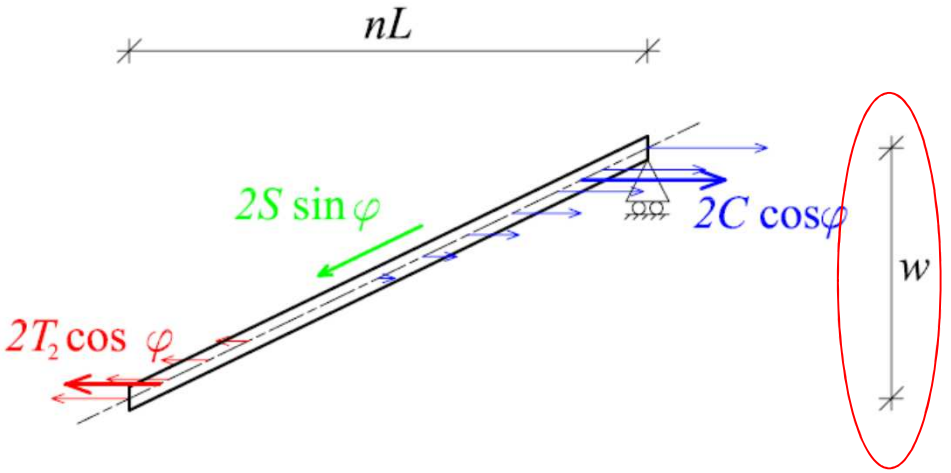

**Vista lateral das forças de membrana resultantes sob uma deformação igual a *w***

# Método de cálculo simplificado de lajes de betão reforçadas a 20 °C

- **Contribuição da ação membrana (2)**
  - **Elemento 2**




**Vista em planta das forças de membrana resultantes**




**Vista lateral das forças de membrana resultantes sob uma deformação igual a *w***

# Método de cálculo simplificado de lajes de betão reforçadas a 20 °C



- **Contribuição das ações de membrana (3)**
  - **Fator de majoração para cada elemento**

$e_{i,\ i=1,2}$ = { $e_{im}$ : majoração devido às forças de membrana no elemento i + $e_{ib}$ : majoração devido ao efeito esforços de membrana na resistência à flexão.

$$e_1 = e_{1m} + e_{1b}$$
$$e_2 = e_{2m} + e_{2b}$$

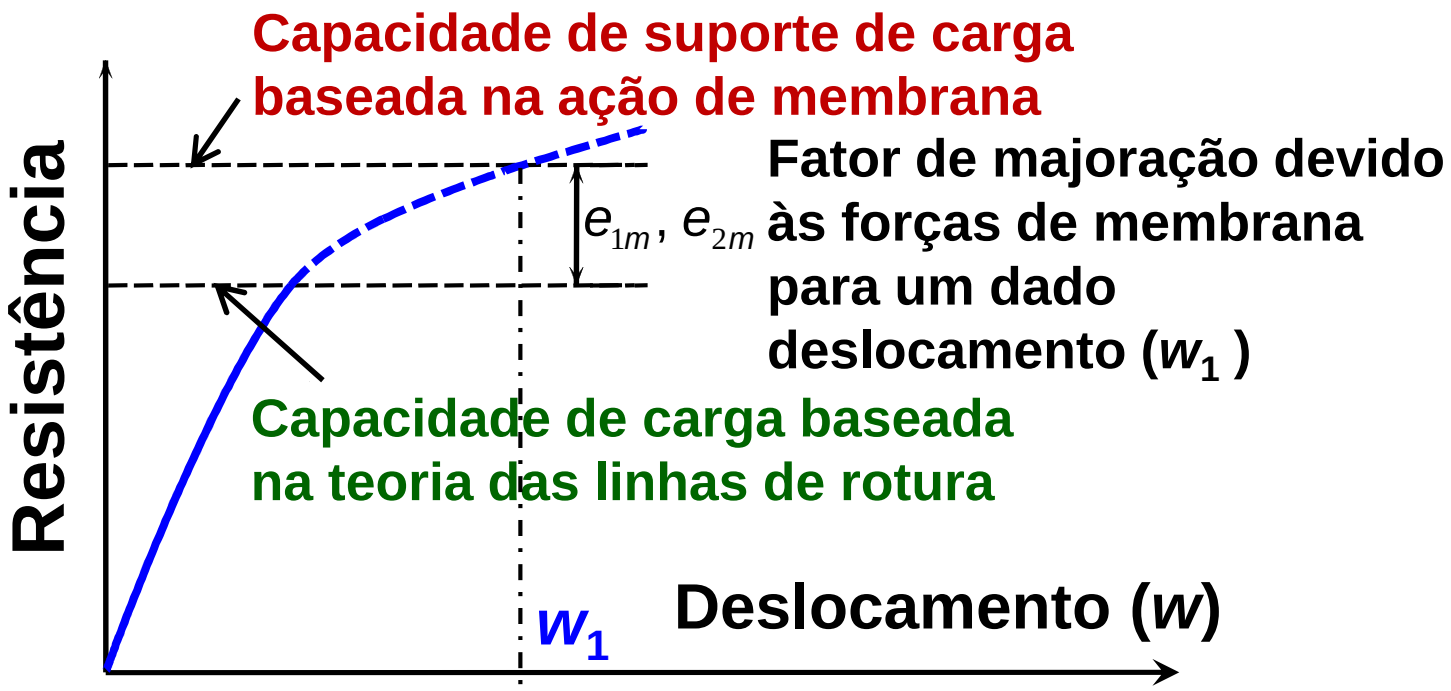
**Devido à deformação *w***

**Devido aos esforços no plano, $KT_0$ or $T_0$**

# Método de cálculo simplificado de lajes de betão reforçadas a 20 °C



- **Contribuição da ação de membrana (4)**

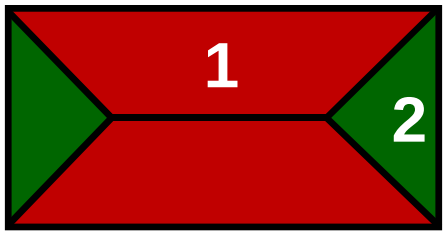


# Método de cálculo simplificado de lajes de betão reforçadas a 20 °C

- **Contribuição das ações de membrana (5)**
  - **Fator de majoração para cada elemento**

$$e_1 = e_{1m} + e_{1b}$$

$$e_2 = e_{2m} + e_{2b}$$




Devido aos esforços no plano

Devido à deformação *w*

  - **Majoração total**

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

**A capacidade de carga da laje tendo em conta o efeito de membrana:**

$$q_{Rd,laje} = e \times q_{Rd}$$

Teoria das linhas de rotura

# Método de cálculo simplificado a elevadas temperaturas

Comportamento mecânico de pavimentos mistos

Método de cálculo simplificado a 20°C

**Método de cálculo simplificado a elevadas temperaturas**

- **Modelo da laje de pavimento a elevadas temperaturas (1)**
  - **Semelhante ao modelo à temperatura ambiente**
  - **Consideração dos efeitos da temperatura nas propriedades dos materiais.**

# Método de cálculo simplificado a elevadas temperaturas

- **Modelo da laje de pavimento a elevadas temperaturas (2)**
  - **Considerando a curvatura térmica da laje devido ao gradiente de temperatura em profundidade, que é igual a:**

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

onde:

**h** é a altura efetiva da laje

**ℓ** é o menor vão da laje

**α** é o coeficiente de dilatação térmica linear do betão

Para betão leve, a EN 1994-1-2 apresenta o seguinte valor

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

Para betão de massa volúmica normal, é tido em consideração um valor conservativo

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

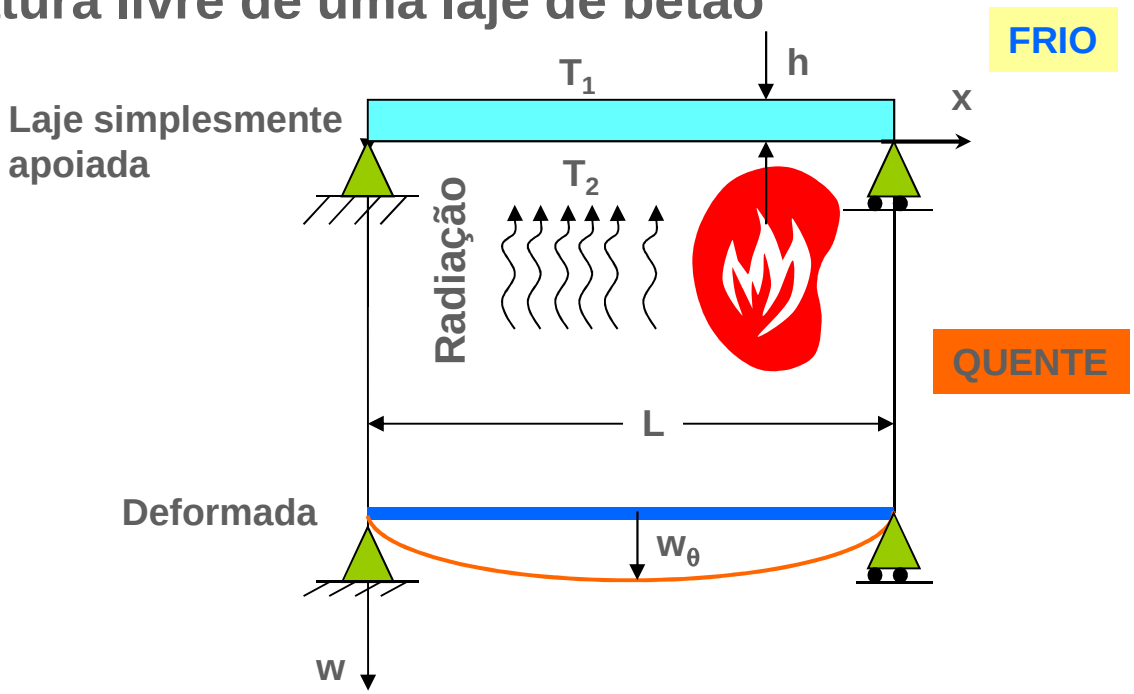
$T_2$ é a temperatura da parte inferior da laje (lado exposto ao fogo)

$T_1$ é a temperatura da parte superior da laje (lado não exposto ao fogo)

# Método de cálculo simplificado a elevadas temperaturas

- **Modelo da laje de pavimento a elevadas temperaturas (3)**

## Curvatura livre de uma laje de betão




$$w_\theta = \frac{\alpha L^2}{8}\frac{(T_2 - T_1)}{h} \times \frac{1}{2.4}$$ (Por segurança) $$w_\theta = \frac{\alpha L^2}{19.2}\frac{(T_2 - T_1)}{h}$$

A curvatura é causada pela diferença de temperatura $\Delta T = T_2 - T_1$ ou Gradiente $\Delta T/d$

# Método de cálculo simplificado a elevadas temperaturas



- **Modelo da laje de pavimento a elevadas temperaturas (4)**
  - **Assumindo uma deformação média correspondente a uma tensão igual a metade da tensão de rotura à temperatura normal**
  - **Deformação da laje com base numa forma parabólica da deformação da laje devido à carga transversal:**

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

onde:

**$E_s$** é o módulo de elasticidade da armadura a 20℃

**$f_{sy}$** é a tensão de cedência da armadura a 20℃

**L** é o maior vão da laje

# Método de cálculo simplificado a elevadas temperaturas



- **Modelo da laje de pavimento a elevadas temperaturas (4)**
  - **Assim, a deformação máxima da laje de pavimento é:**

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

  - **Contudo, a deformação máxima da laje de pavimento está limitada a:**

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

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

# Método de cálculo simplificado a elevadas temperaturas



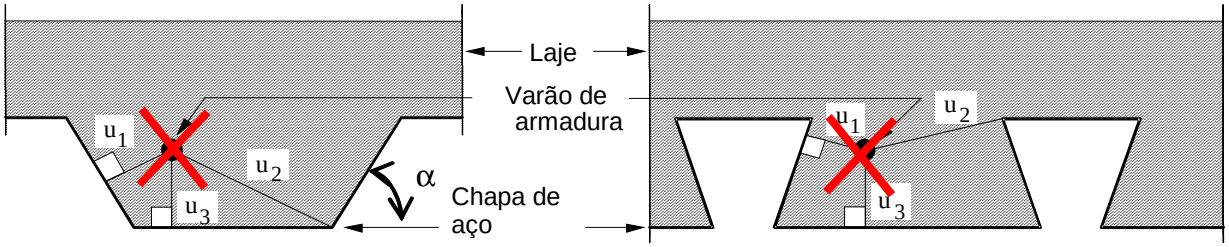
- **Conservadorismo do modelo da laje de pavimento a elevadas temperaturas**
  - **Os deslocamentos verticais usados devido à curvatura térmica são subestimados quando comparados com os valores teóricos**
  - **A deformação térmica é calculada com base no menor vão da laje**
  - **É ignorada qualquer contribuição da chapa de aço perfilada**
  - **O aumento da ductilidade da rede de armadura com o aumento de temperatura é ignorado**

# Método de cálculo simplificado a elevadas temperaturas



- **Campo de aplicação (1)**
  - **A metodologia aqui apresentada deve aplicar-se apenas a lajes mistas aço-betão com chapa metálica perfilada que não exceda 80 mm de espessura;**
  - **As vigas devem ser dimensionadas como vigas mistas;**
  - **Devem considerar-se apenas estruturas contraventadas (sem deslocamentos horizontais) com pilares metálicos ou mistos;**
  - **As "Zonas de dimensionamento" devem ser delimitadas por vigas protegidas de acordo com a resistência ao fogo exigida regulamentarmente para o edifício, e as vigas secundárias internas não devem ser protegidas. Os cantos devem possuir pilares para $R \geq 60$.**
  - **A laje mista deve ser dimensionada de acordo com a EN 1994-1-1 e a sua espessura de modo a garantir isolamento térmico deve respeitar a EN 1994-1-2.**

- **Campo de aplicação (2)**
  - **Os pilares devem ser protegidas de acordo com a resistência ao fogo exigida regulamentarmente para o edifício;**
  - **A armadura da laje mista deve ser constituída por uma rede metálica;**
  - **Não deve ser usada um armadura de reforço suplementar nas nervuras.**



# Método de cálculo simplificado a elevadas temperaturas



- **Capacidade de suporte de carga do modelo da laje de pavimento melhorada na presença de vigas de aço não protegidas (1)**
  - **A ação catenária das vigas não protegidas é desprezada**
  - **O momento fletor resistente de vigas não protegidas é tido em conta com os seguintes pressupostos:**
    - Apoios simples em ambas as extremidades
    - O aquecimento da secção transversal do perfil de aço é calculado de acordo com o ponto 4.3.4.2 da EN 1994-1-2, considerando o efeito de sombra
    - As propriedades térmicas e mecânicas do aço e do betão são dadas na EN 1994-1-2

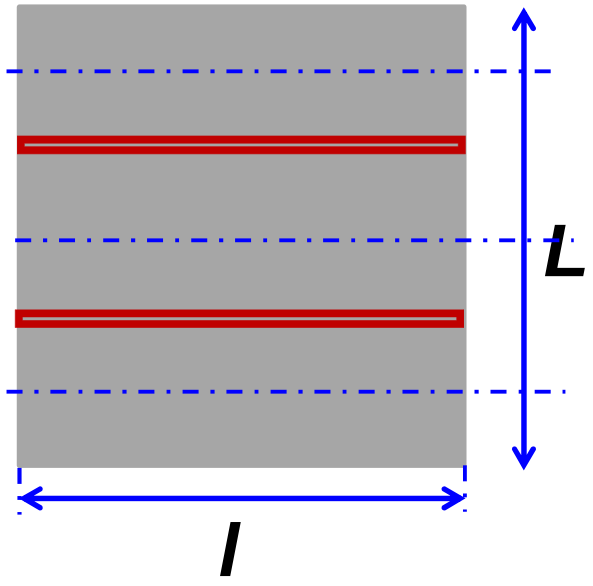
# Método de cálculo simplificado a elevadas temperaturas

- **Capacidade de suporte de carga do modelo da laje de pavimento melhorada na presença de vigas de aço não protegidas (2)**
  - **O aumento da capacidade de suporte de carga da laje devido às vigas não protegidas é:**

$$M_{fi,Rd} = \frac{p_{fi}\ell^2}{8} \Rightarrow p_{fi,viga} = \frac{8M_{fi,Rd}}{\ell^2}$$

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

$$\frac{L}{1+n_{ub}}$$




onde:

**$n_{ub}$** é o número de vigas não protegidas

**$M_{fi,Rd}$** é o momento resistente de cada viga mista não protegida

# Método de cálculo simplificado a elevadas temperaturas

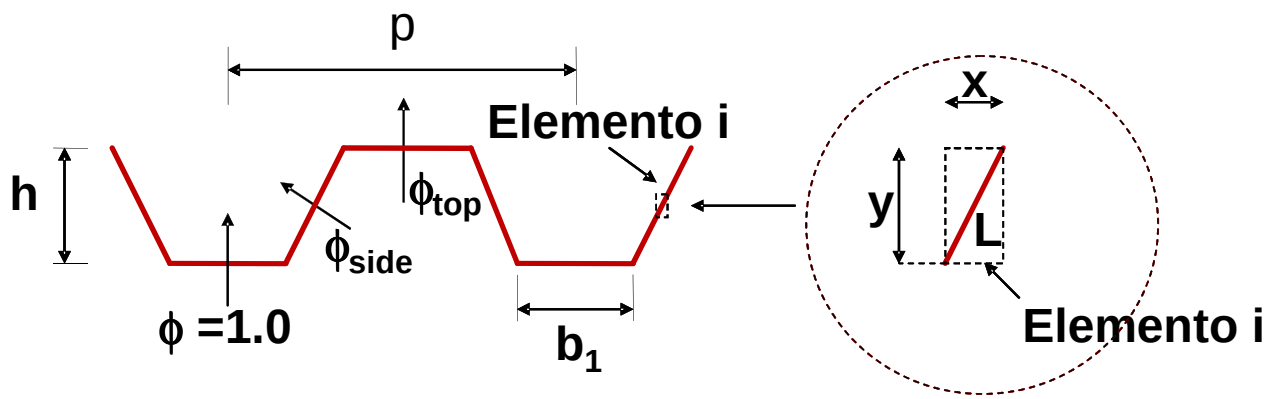


- **Capacidade de suporte de carga TOTAL do modelo da laje de paviment0:**

$$q_{fi,Rd,laje} = e \times q_{fi,Rd} + p_{fi,Rd}$$

- $p_{fi,Rd}$ → **Devido às vigas secundárias**
- $q_{fi,Rd}$ → **Teoria das linhas de rotura**
- $e$ → **Majoração devido ao efeito de membrana**

- **Cálculo da temperatura da laje mista**
  - **Baseado nos modelos de cálculo avançados**
    - Método de diferenças finitas 2D
    - Propriedades térmicas dos materiais obtidas a partir da Parte 1-2 do Eurocódigo 4 para aço e betão
    - Foi tido em consideração o efeito de sombra para lajes mistas



# Método de cálculo simplificado a elevadas temperaturas



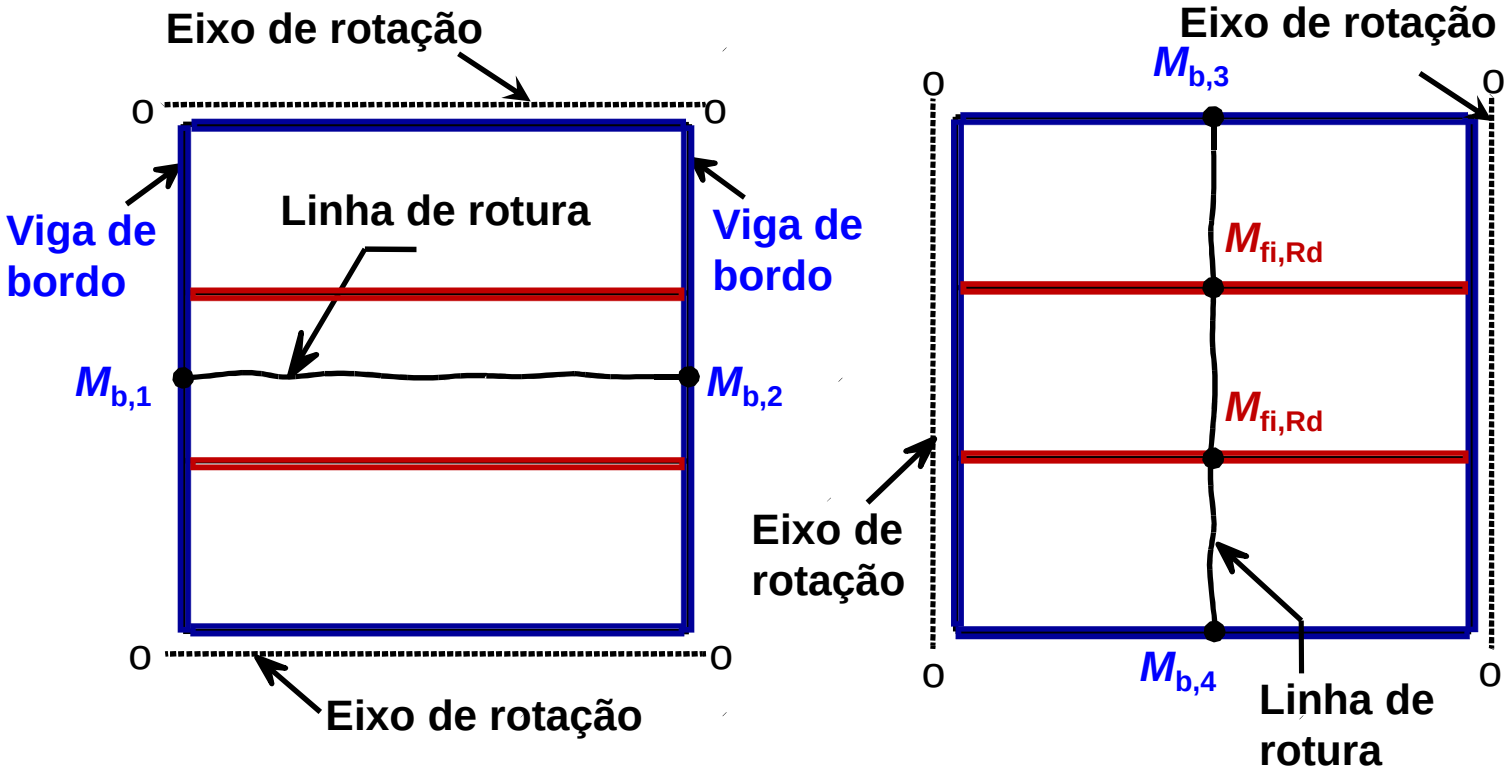
- **Capacidade de suporte de carga de vigas periféricas protegidas**
  - **Mecanismo global plástico do pavimento com base na resistência da viga**
  - **Grau de utilização em situação de incêndio**
    - Cargas adicionais em vigas protegidas periféricas
  - **Método de cálculo simplificado da temperatura crítica de acordo com a EN 1994-1-2**

# Método de cálculo simplificado a elevadas temperaturas

- **Momento resistente das vigas periféricas**

- Mecanismos plásticos em que as linhas de rotura assumem um padrão diferente do utilizado para a consideração do efeito de membrana (pelo lado da segurança)

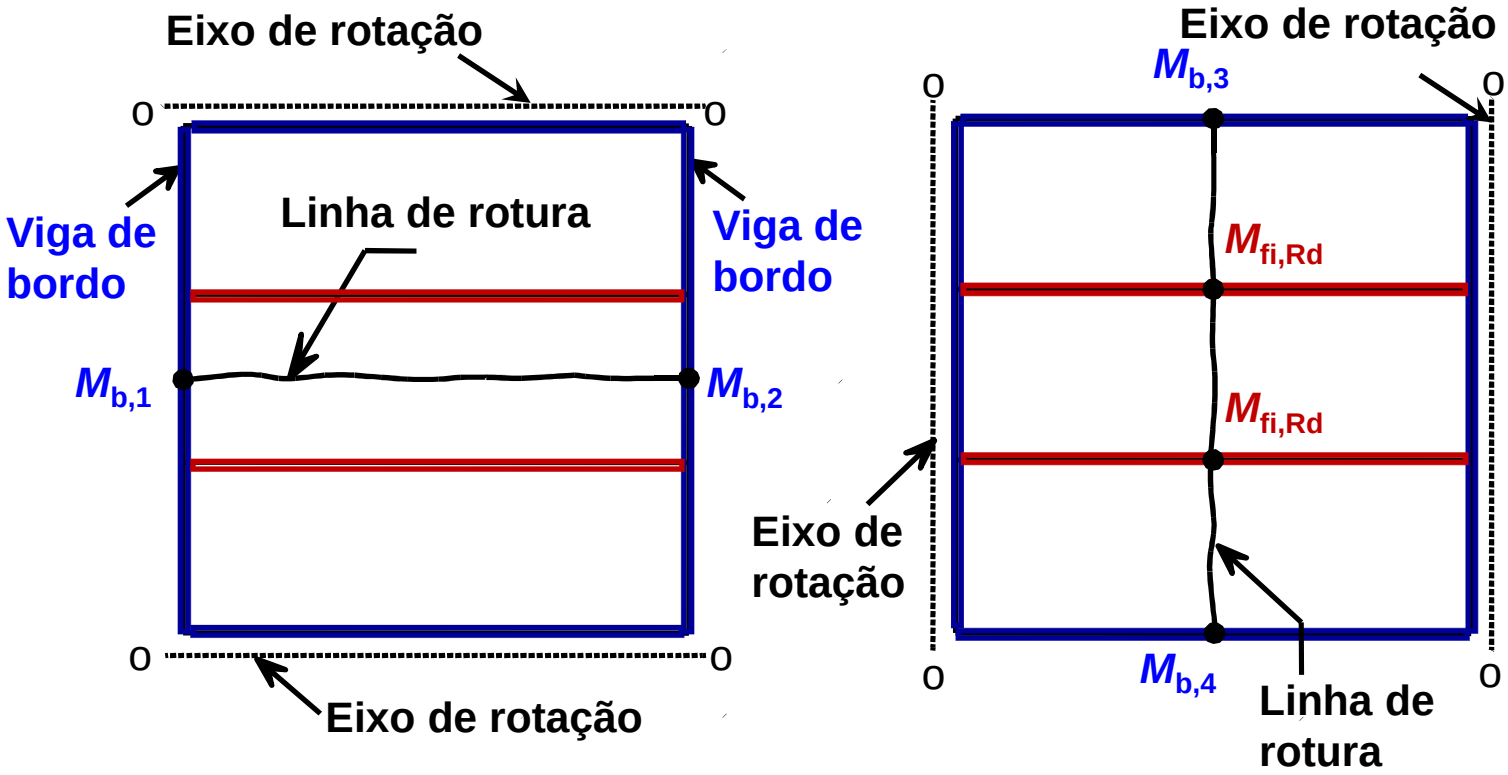
- Princípio dos trabalhos virtuais



# Método de cálculo simplificado a elevadas temperaturas



- **Momento resistente das vigas periféricas**




**Calculados os momentos resistentes nas vigas periféricas pode calcular-se a sua temperatura crítica e se necessário utilizar proteção passiva.**

# Validação em comparação com resultados de ensaios

Comportamento mecânico de pavimentos mistos

Método de cálculo simplificado a 20°C

**Método de cálculo simplificado a elevadas temperaturas**

**7 Ensaios de Cardington à escala real**

**1 Ensaio BRE de grande escala**

**10 Ensaios a temperatura normal realizados nos anos 1960/1970**

**15 Ensaios de pequena escala realizados pela Universidade de Sheffield em 2004**

**44 Ensaios de pequena escala à temperatura normal e em situação de incêndio realizados pela Universidade de Manchester**

**Ensaios ao fogo padrão FRACOF e COSSFIRE**

**Ensaios à escala real realizados pela Universidade de Ulster em 2010.**

# Comportamento experimental de pequena escala e dimensionamento de lajes de pavimento de betão

Comportamento mecânico de pavimentos mistos

Método de cálculo simplificado a 20°C

**Método de cálculo simplificado a elevadas temperaturas**

**22 Ensaios a frio e 22 ensaios a quente idênticos (rede da armadura com ambos aço macio e aço inoxidável)**

# Resultados obtidos aplicando a metodologia

Comportamento mecânico de pavimentos mistos

Método de cálculo simplificado a 20°C

**Método de cálculo simplificado a elevadas temperaturas**

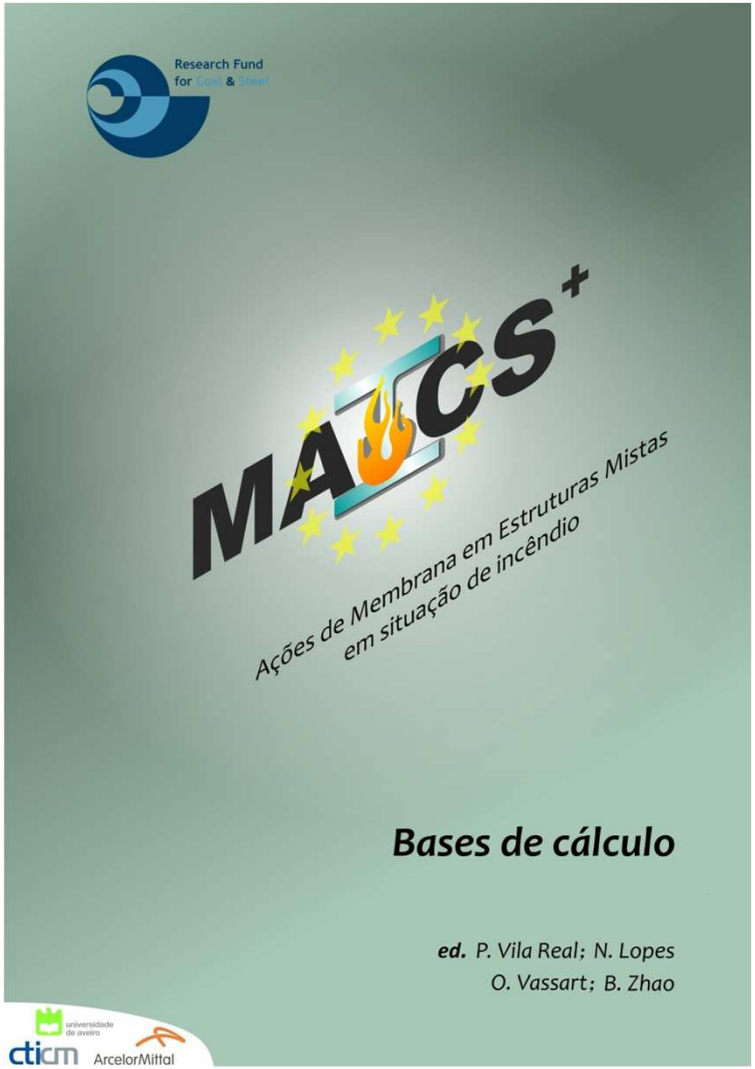
***40 a 55% das vigas podem ser deixadas sem proteção colocando proteção onde ela é realmente necessária.***

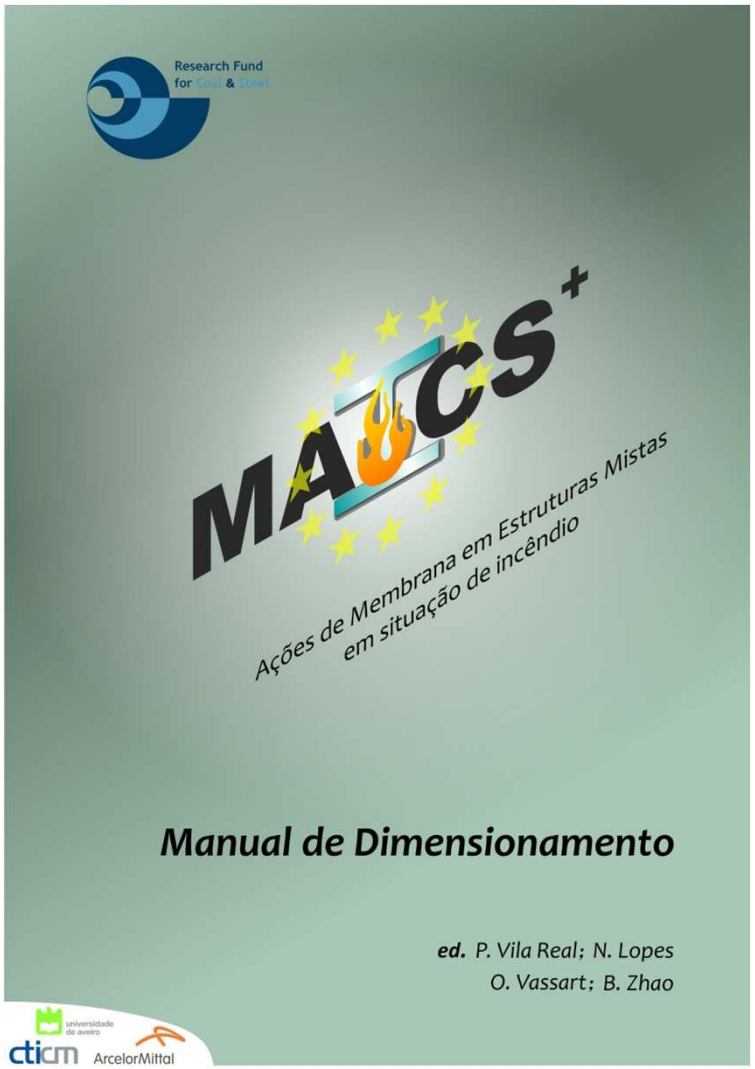
# Documentos disponíveis

Comportamento mecânico de pavimentos mistos

Método de cálculo simplificado a 20°C

**Método de cálculo simplificado a elevadas temperaturas**



# Obrigado pela Vossa atenção