



Comportamento ao fogo de lajes mistas aço-betão

Novas evidências experimentais



- **Objetivos dos novos ensaios ao fogo**
- **Ensaio ao fogo à escala real no âmbito dos projetos:**
 - FRACOF (Ensaio 1 - fogo padrão ISO)
 - COSSFIRE (Ensaio 2 - fogo padrão ISO)
 - FICEB (Ensaio 3 – fogo natural e vigas alveoladas)
- **Set-up do ensaio**
- **Resultados experimentais**
 - Temperaturas
 - Deslocamentos
- **Observações e análises**
- **Comparação com os métodos de cálculo simplificados**
- **Conclusão**



Justificação da realização de mais ensaios ao fogo



Objetivos

Set-up do ensaio

Resultados experimentais e observações

Comparação com o método de cálculo simplificado

Conclusão

- **Justificação**
 - Ensaio ao fogo de Cardington
 - Excelente desempenho ao fogo sob condições de incêndio natural
 - Max θ do aço ≈ 1150 °C, duração do incêndio ≈ 60 min (> 800 °C)
 - Detalhes construtivos do Reino Unido
- **Objetivos**
 - Confirmar o bom desempenho sob incêndios de longa duração (pelo menos 90 minutos de fogo padrão – ISO)
 - Investigar o impacto dos diferentes detalhes construtivos, assim como da rede de armadura e da proteção ao fogo de vigas de bordo
 - Validar as diferentes ferramentas de segurança contra incêndio



- **Ensaio 1 (FRACOF)**

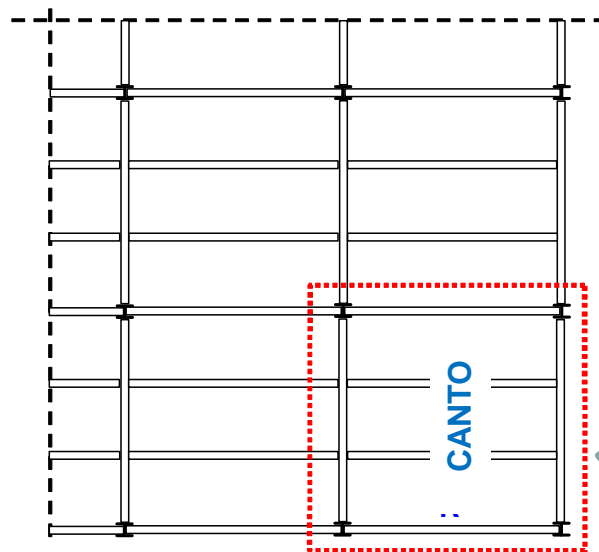
Objetivos

Set-up do ensaio

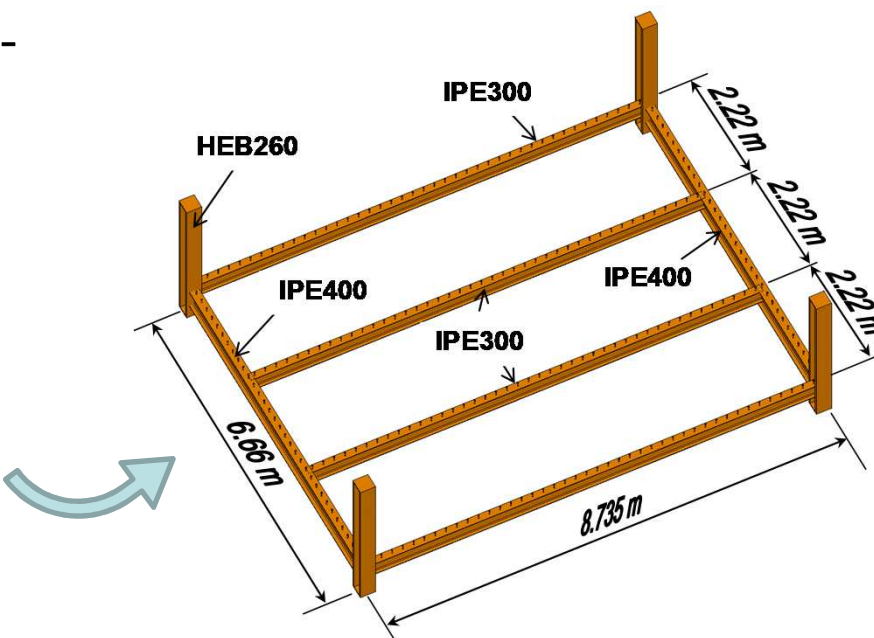
Resultados experimentais e observações

Comparação com o método de cálculo simplificado

Conclusão



Grelha estrutural de um edifício real



Estruturas de aço adotadas para o ensaio ao fogo número 1



- **Ensaio 2 (COSSFIRE)**

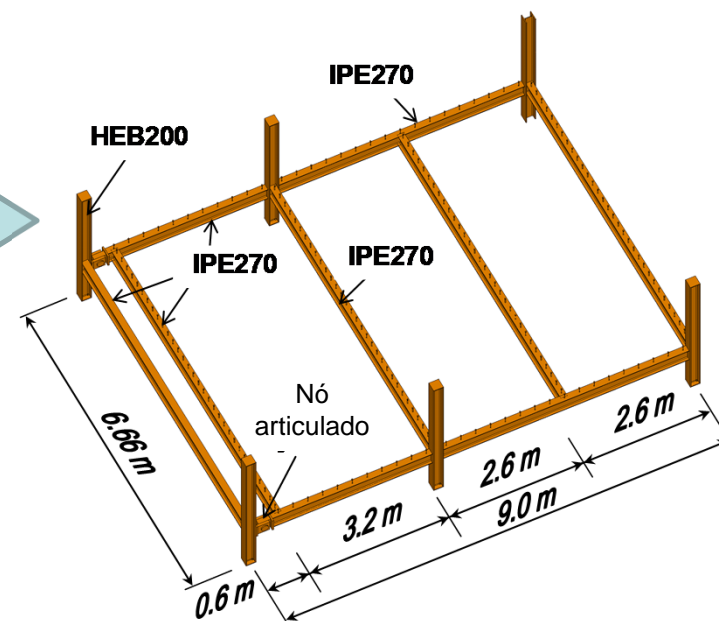
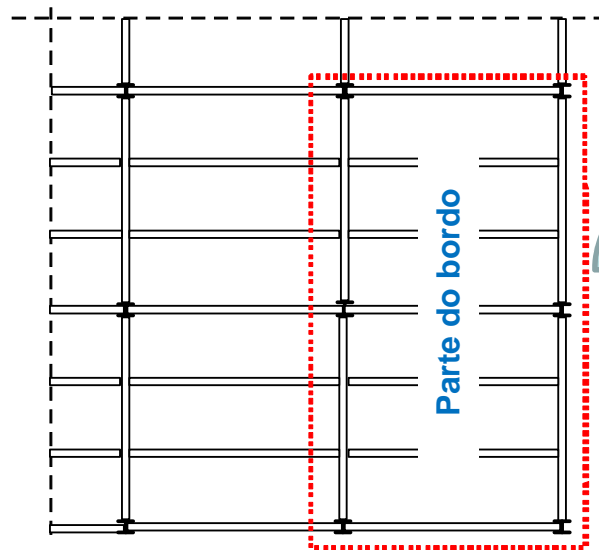
Objetivos

Set-up do ensaio

Resultados experimentais e observações

Comparação com o método de cálculo simplificado

Conclusão



Grelha estrutural de um edifício real

Estruturas de aço adotadas para o ensaio ao fogo número 2



- **Sistemas de pavimentos mistos finais**

Objetivos

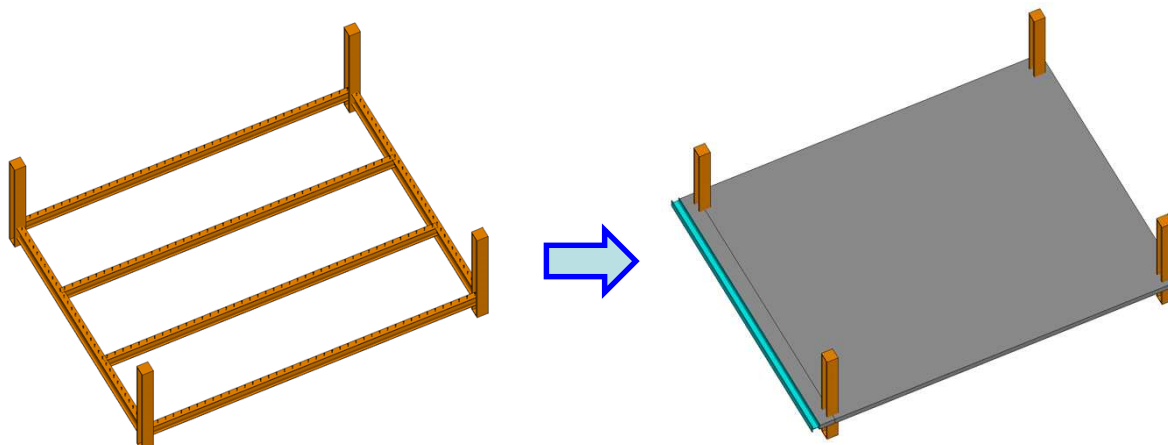
Set-up do ensaio

Resultados
experimentais e
observações

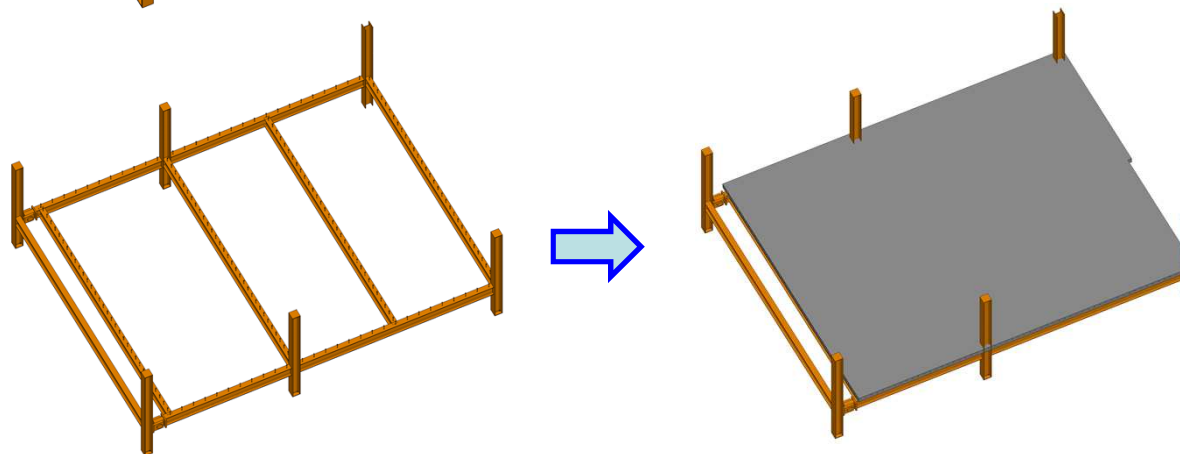
Comparação com o
método de cálculo
simplificado

Conclusão

Ensaio 1



Ensaio 2





Objetivos

- **Estrutura de aço**

- Vigas mistas de aço e betão

- **De acordo com a Parte 1-1 do Eurocódigo 4 (EN 1994-1-1)**

- Pequenos pilares de aço

Set-up do ensaio

Resultados
experimentais e
observações

- **Laje mista**

- Altura total

- **De acordo com a Parte 1-2 do Eurocódigo 4 (EN 1994-1-2)**

- Rede de armadura

- **Baseada nas regras de cálculo simplificado**

Comparação com o
método de cálculo
simplificado

Conclusão

- **Ligações de aço**

- Ligações usadas normalmente: cantoneira dupla e chapa de extremidade

- **De acordo com a Parte 1-8 do Eurocódigo 3 (EN 1993-1-8)**



- **Disposição dos pernos de cabeça ao longo das vigas de aço**

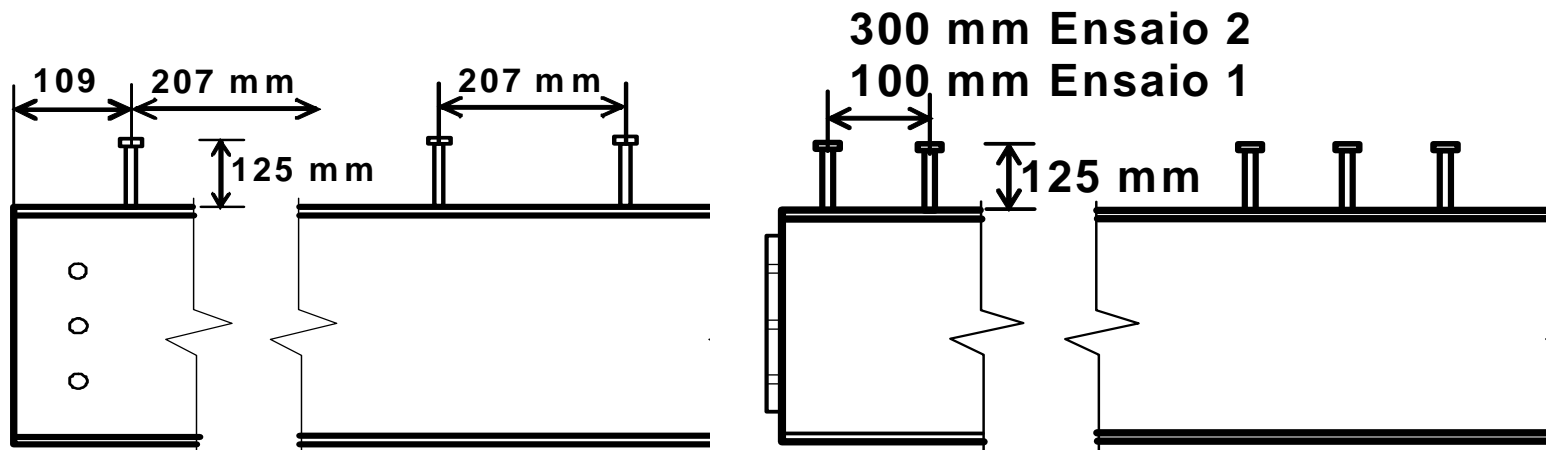
Objetivos

Set-up do ensaio

Resultados
experimentais e
observações

Comparação com o
método de cálculo
simplificado

Conclusão



Vigas secundárias

Vigas principais

- **Tipo de pernos de aço**
 - TRW Nelson KB 3/4" – 125 ($\Phi = 19\text{mm}$; $h = 125\text{ mm}$; $f_y = 350\text{ N/mm}^2$; $f_u = 450\text{ N/mm}^2$)



Ligações de aço



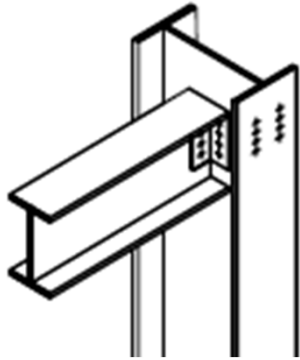
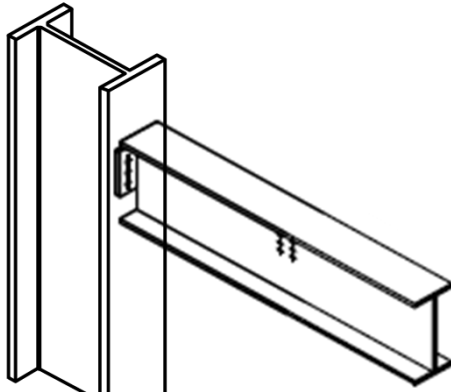
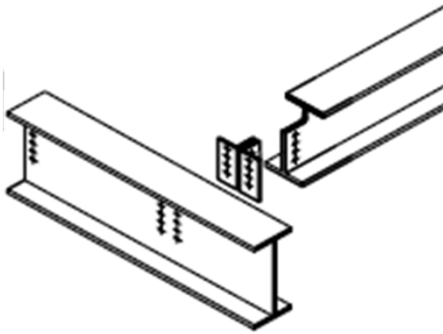
Objetivos

Set-up do ensaio

Resultados experimentais e observações

Comparação com o método de cálculo simplificado

Conclusão

Viga-pilar		Viga-viga
Viga secundária	Viga principal	
Cantoneiras de apoio da alma	Chapas de extremidade flexíveis	Cantoneiras de apoio da alma
		

Classe dos parafusos de aço: 8.8

Diâmetro dos parafusos de aço: 20 mm



Dimensões dos elementos estruturais



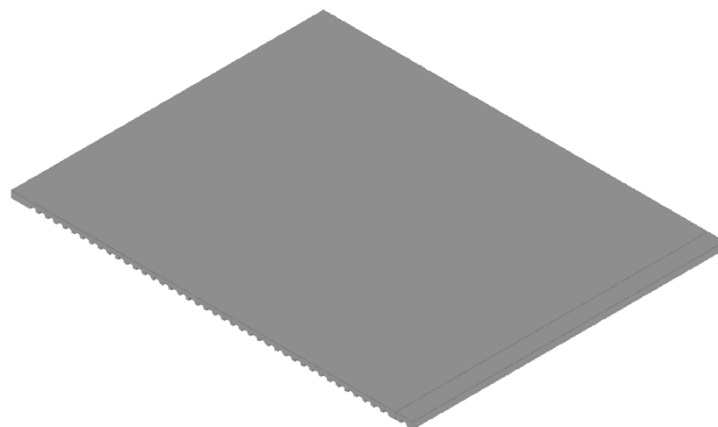
Objetivos

Set-up do ensaio

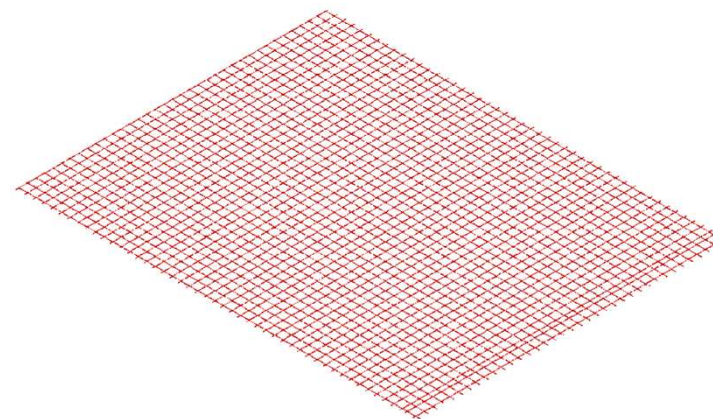
Resultados experimentais e observações

Comparação com o método de cálculo simplificado

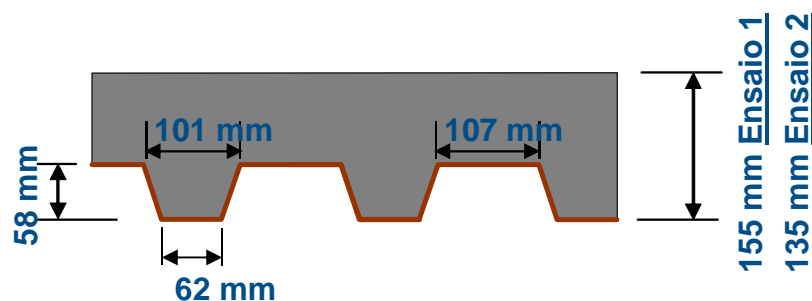
Conclusão



Laje mista



Rede de armadura



Chapa de aço perfilada:
COFRAPLUS60 – 0.75 mm

Classe de betão: C30/37

Dimensão da rede: 150x150

Diâmetro: 7 mm

Classe de aço: S500

Distância do eixo ao topo da laje:

• 50 mm Ensaio 1

• 35 mm Ensaio 2



Condições de carregamento mecânico



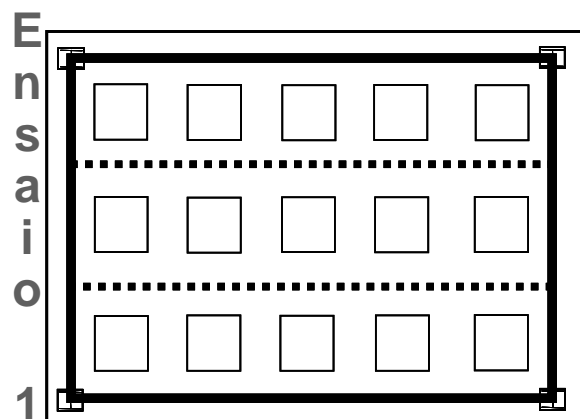
Objetivos

Set-up do ensaio

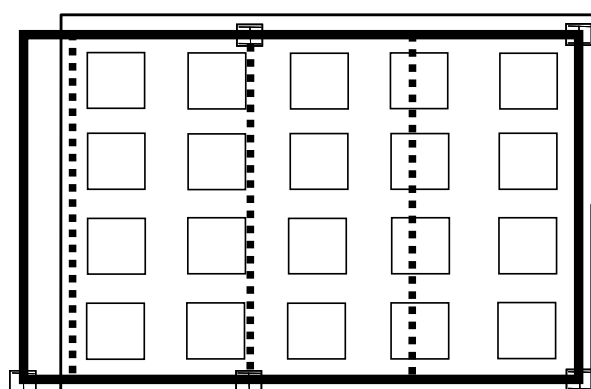
Resultados experimentais e observações

Comparação com o método de cálculo simplificado

Conclusão



15 sacos de areia de 1512 kg
Carga uniforme equivalente:
390 kg/m²



Ensaio 2



20 sacos de areia de 1098 kg
Carga uniforme equivalente:
393 kg/m²



Preparação do ensaio ao fogo 2



Objetivos

Set-up do ensaio

Resultados
experimentais e
observações

Comparação com o
método de cálculo
simplificado

Conclusão

1 →



2 →



3 →



4 →





Comportamento do pavimento durante o incêndio



Objetivos

Set-up do ensaio

Resultados experimentais e observações

Comparação com o método de cálculo simplificado

Conclusão



Depois do ensaio



Antes do ensaio



Vigas secundárias não protegidas

Laje mista



Estrutura do ensaio 3 (FICEB)



Objetivos

Set-up do ensaio

Resultados
experimentais e
observações

Comparação com o
método de cálculo
simplificado

Conclusão





Estrutura do ensaio 3



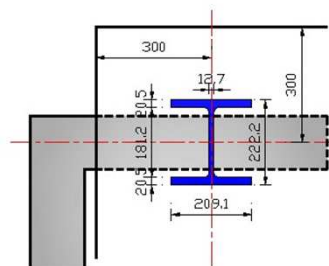
Objetivos

Set-up do ensaio

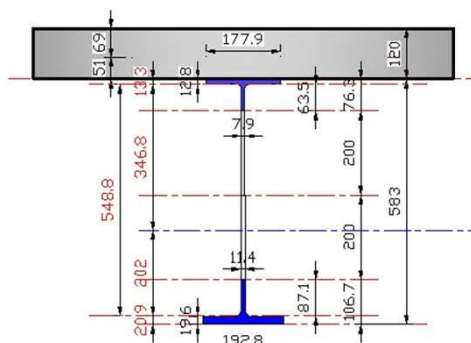
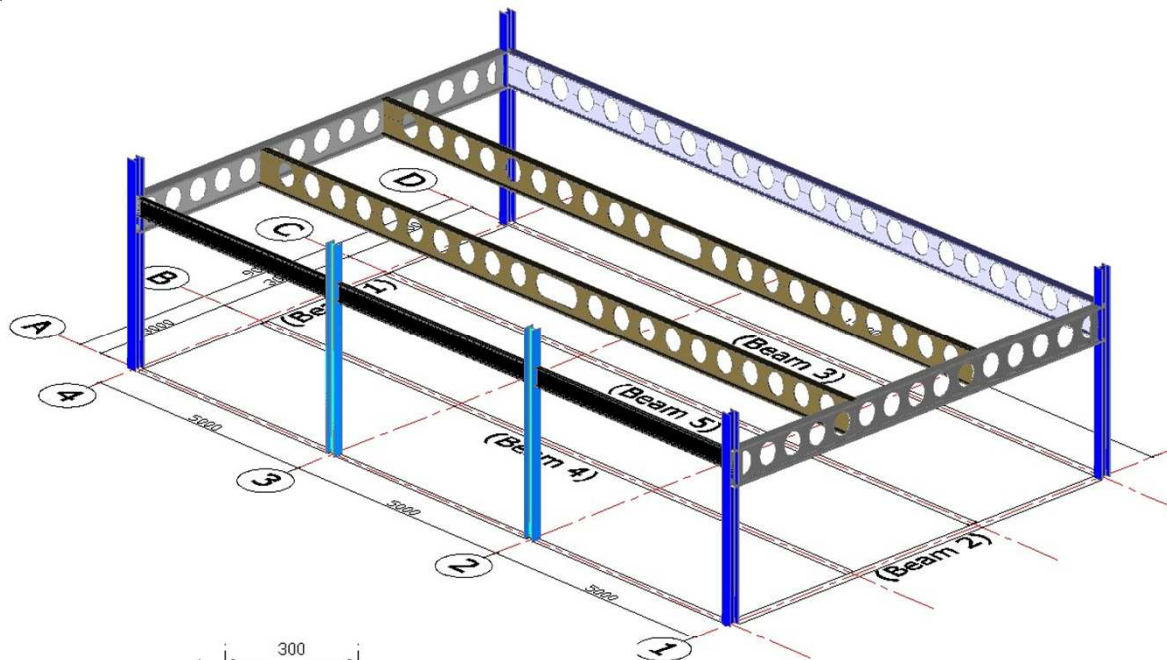
Resultados experimentais e observações

Comparação com o método de cálculo simplificado

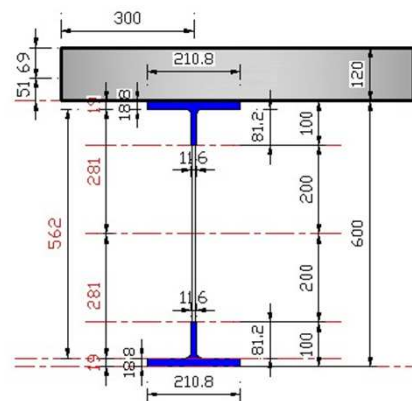
Conclusão



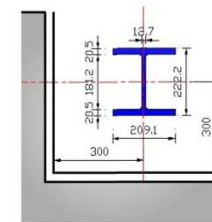
(Pilar GL-A)



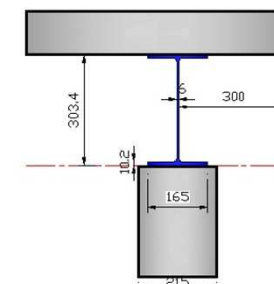
(Viga 3/4/5)



(Viga 1/2)



(Pilar GL-D)



(Viga de secção transversal cheia)



Estrutura do ensaio 3



Ligações viga-viga

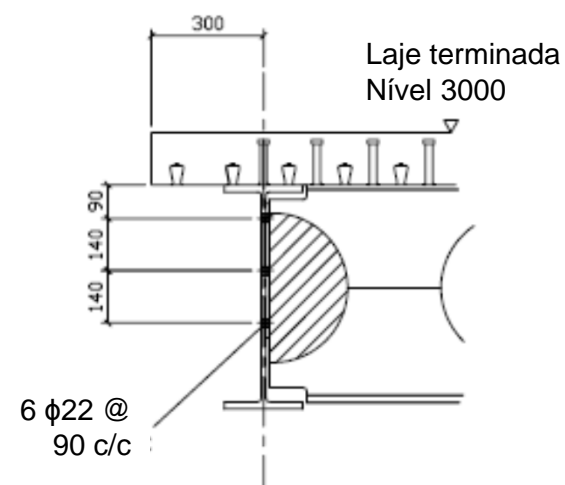
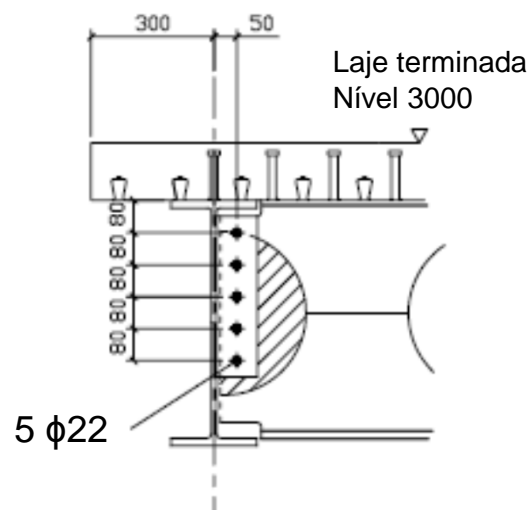
Objetivos

Set-up do ensaio

Resultados experimentais e observações

Comparação com o método de cálculo simplificado

Conclusão





Estrutura do ensaio 3



Ligações viga-pilar

Objetivos

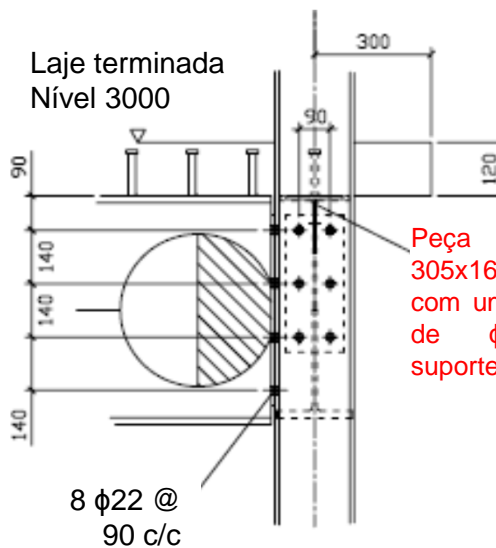
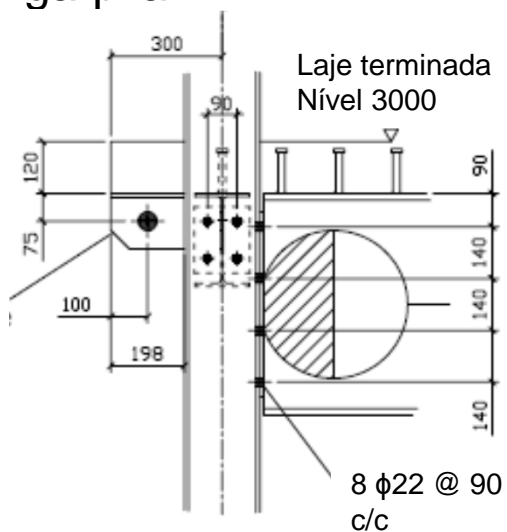
Set-up do ensaio

Resultados experimentais e observações

Comparação com o método de cálculo simplificado

Conclusão

Peça em T de 305x165x40 UB com uma abertura de $\phi 22$ para suporte CHS



Peça em T de 305x165x40 UB com uma abertura de $\phi 22$ para suporte CHS





Estrutura do ensaio 3



Objetivos

Set-up do ensaio

Resultados
experimentais e
observações

Comparação com o
método de cálculo
simplificado

Conclusão



Rede de armadura A393 , diâmetro 10mm



Interação total: entre laje e vigas, conseguida através de conectores de corte, diâmetro 19 mm, $h=95\text{mm}$
São adicionados varões em forma de U para assegurar um reforço correto da laje.



Estrutura do ensaio 3



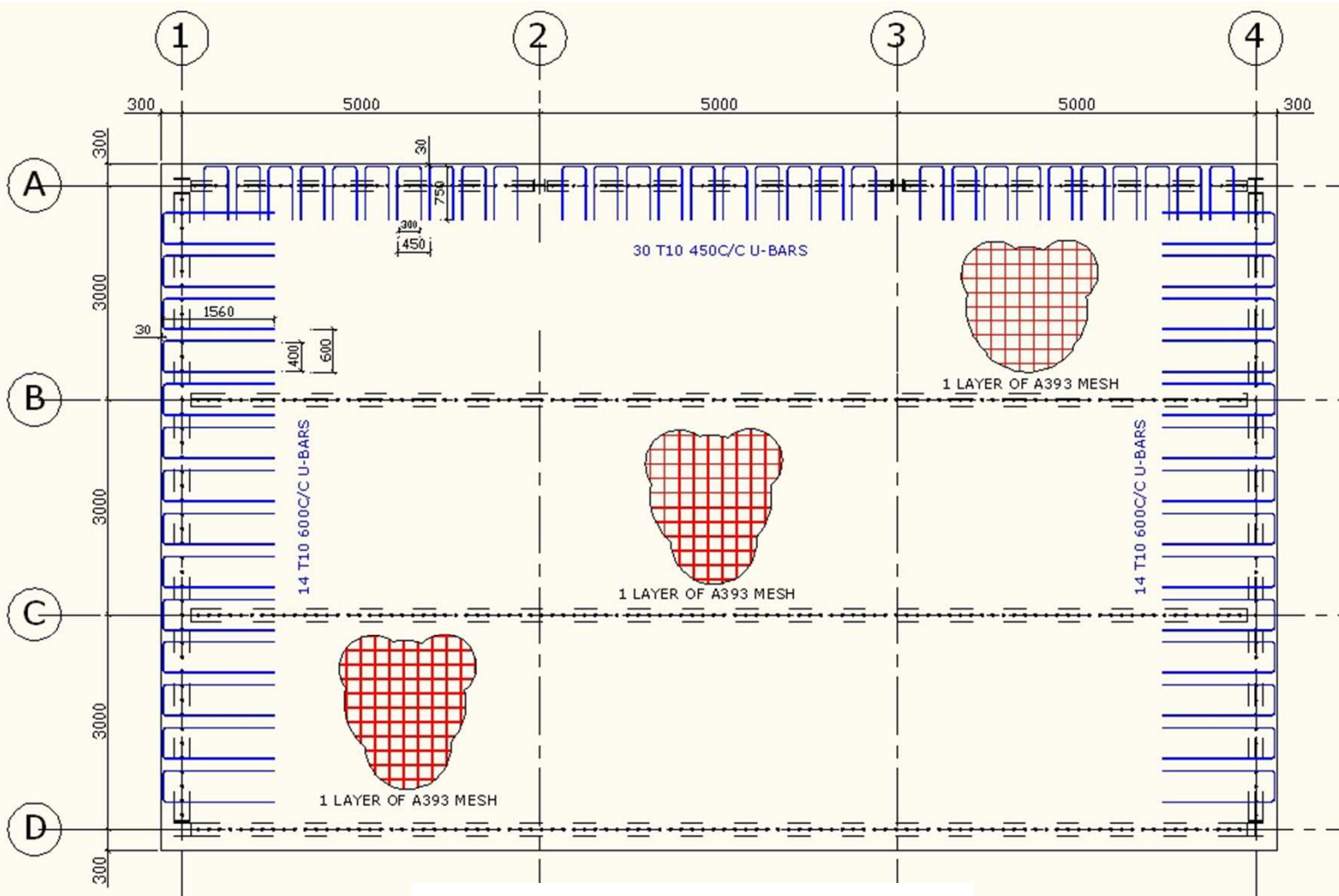
Objetivos

Set-up do ensaio

Resultados experimentais e observações

Comparação com o método de cálculo simplificado

Conclusão



Vista do topo da laje



Estrutura do ensaio 3



Objetivos

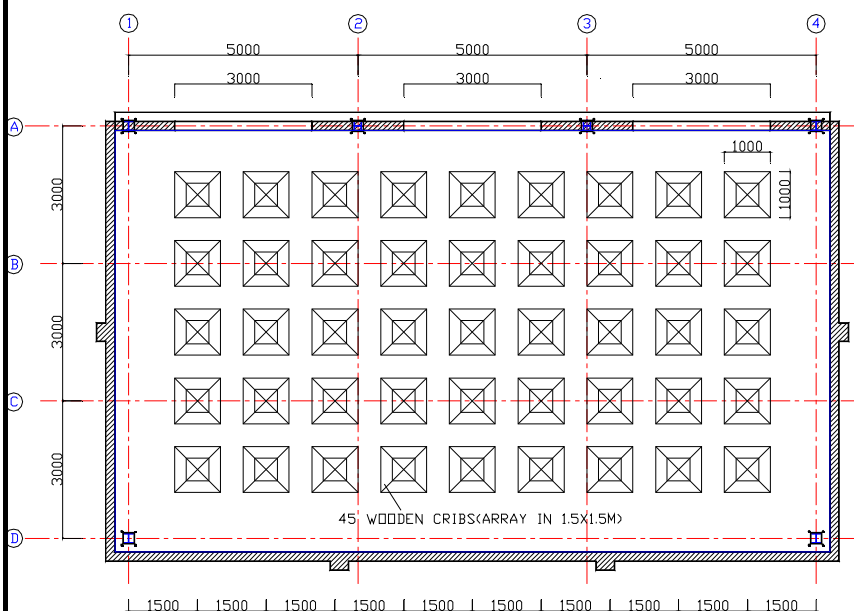
Densidade de carga de incêndio de valor igual a 700MJ/m^2
A carga de incêndio foi obtida usando 45 paletes de madeira (1m x 1m x 0.5 m) distribuídas uniformemente por todo o compartimento (9.0m x 15.0m).

Set-up do ensaio

Resultados experimentais e observações

Comparação com o método de cálculo simplificado

Conclusão



Localização das paletes de madeira





Resultados experimentais



Objetivos

Set-up do ensaio

**Resultados
experimentais e
observações**

Comparação com o
método de cálculo
simplificado

Conclusão

- **Evolução da temperatura**
- **Aquecimento de vigas de aço não protegidas**
- **Aquecimento de elementos de aço protegidos**
- **Aquecimento da laje mista**
- **Deformação do piso**
- **Observações sobre o comportamento dos sistemas de pavimento misto**
 - Fissuração e esmagamento do betão
 - Rotura da rede de armadura durante o ensaio
 - Colapso das vigas de bordo



- **Evolução da temperatura**

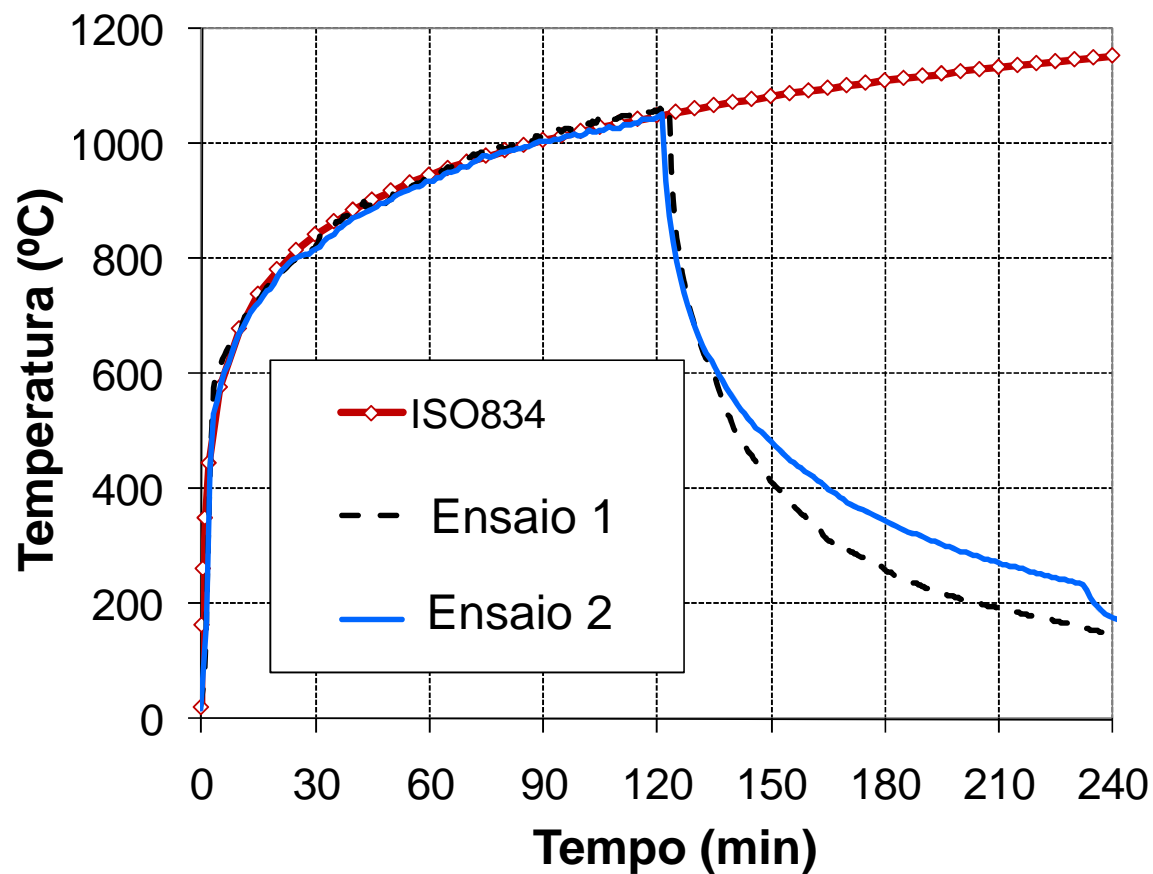
Objetivos

Set-up do ensaio

Resultados experimentais e observações

Comparação com o método de cálculo simplificado

Conclusão





Resultados experimentais



Objetivos

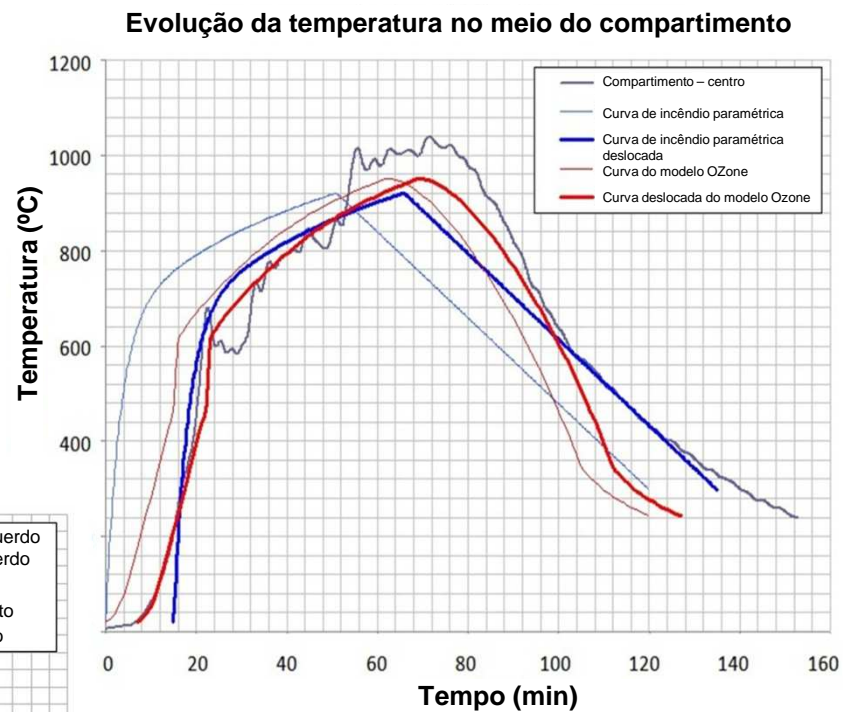
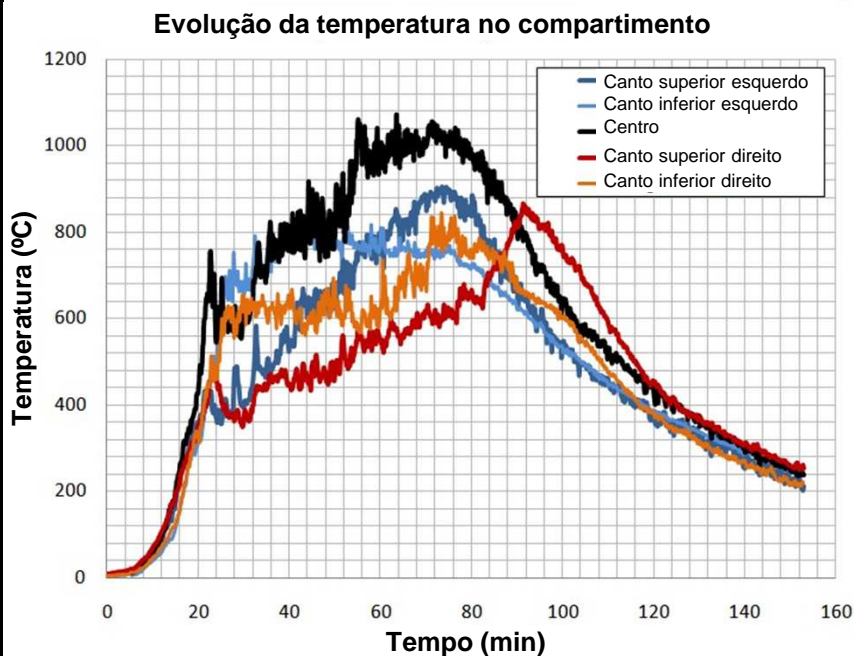
Set-up do ensaio

Resultados experimentais e observações

Comparação com o método de cálculo simplificado

Conclusão

- **Ensaio 3: evolução da temperatura**





- **Aquecimento de vigas de aço não protegidas**

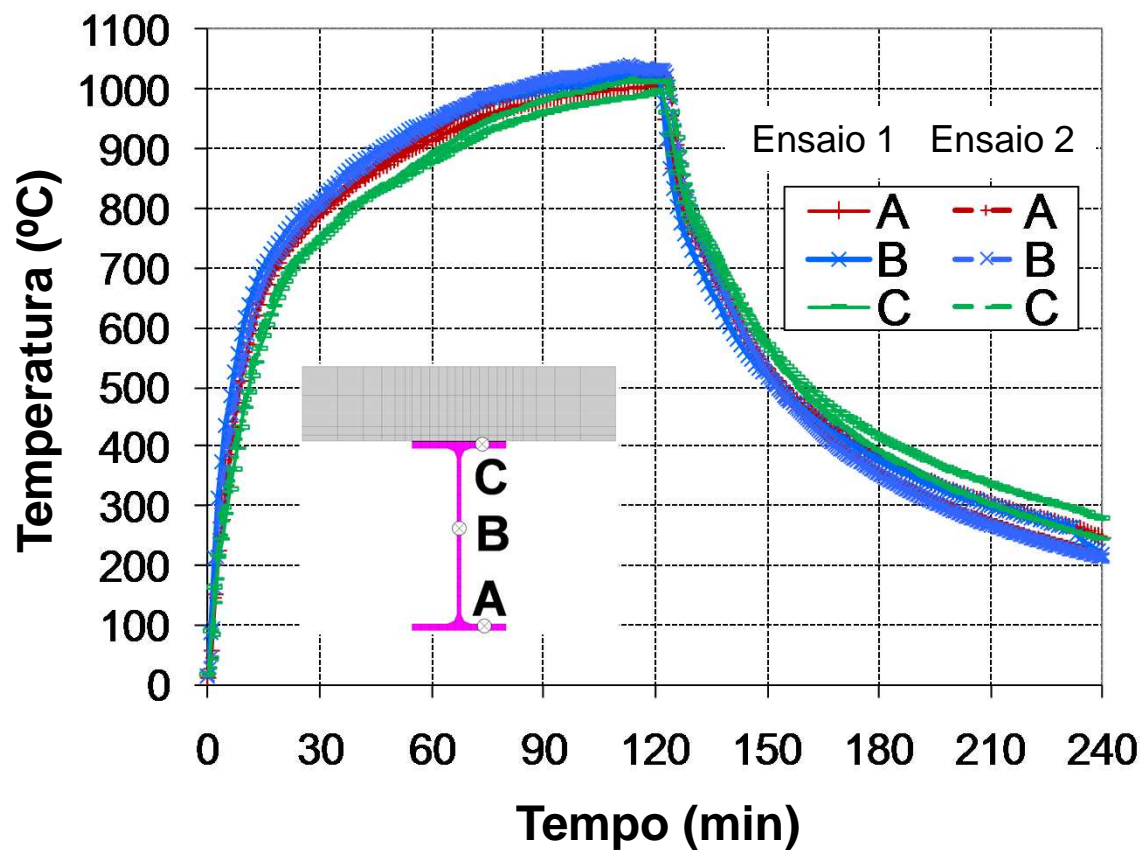
Objetivos

Set-up do ensaio

Resultados experimentais e observações

Comparação com o método de cálculo simplificado

Conclusão





- **Ensaio 3: aquecimento de vigas de aço não protegidas**

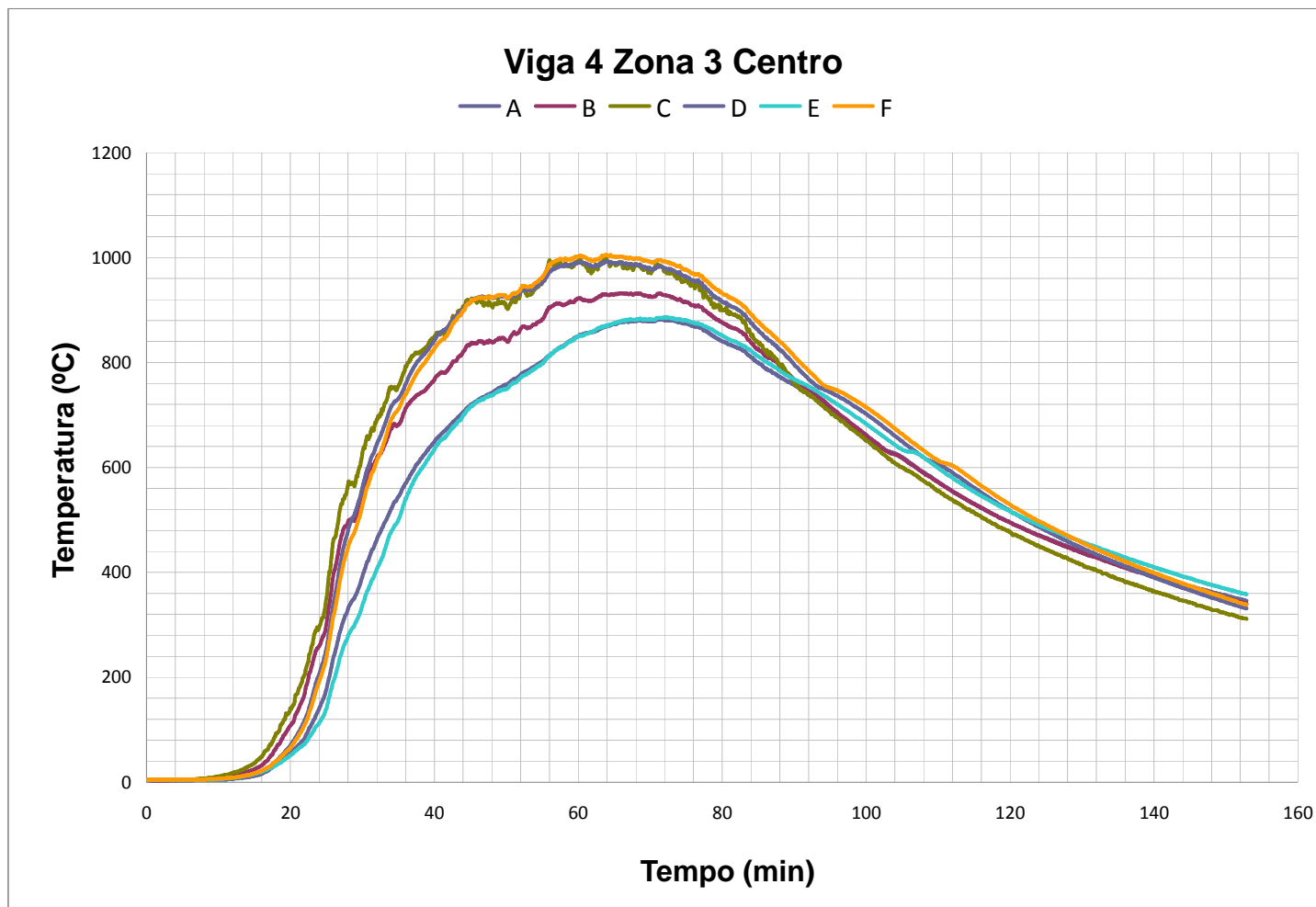
Objetivos

Set-up do ensaio

Resultados experimentais e observações

Comparação com o método de cálculo simplificado

Conclusão





• Aquecimento de vigas de aço protegidas

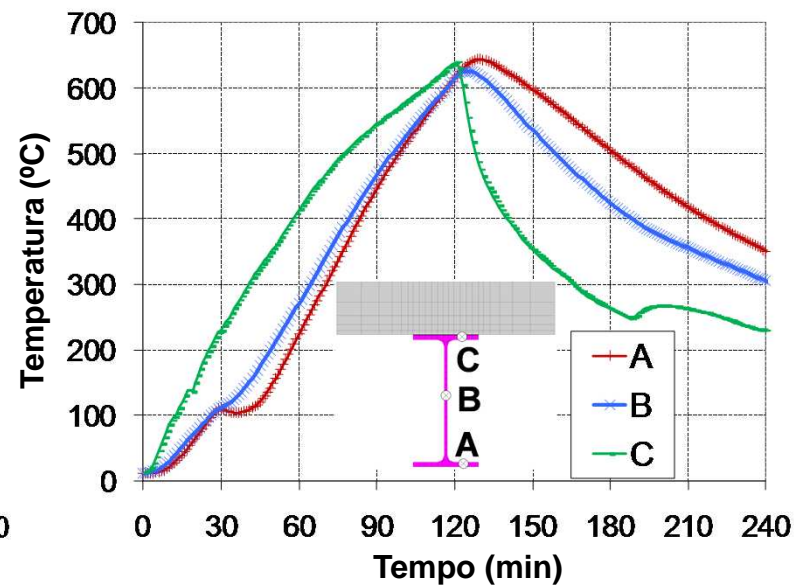
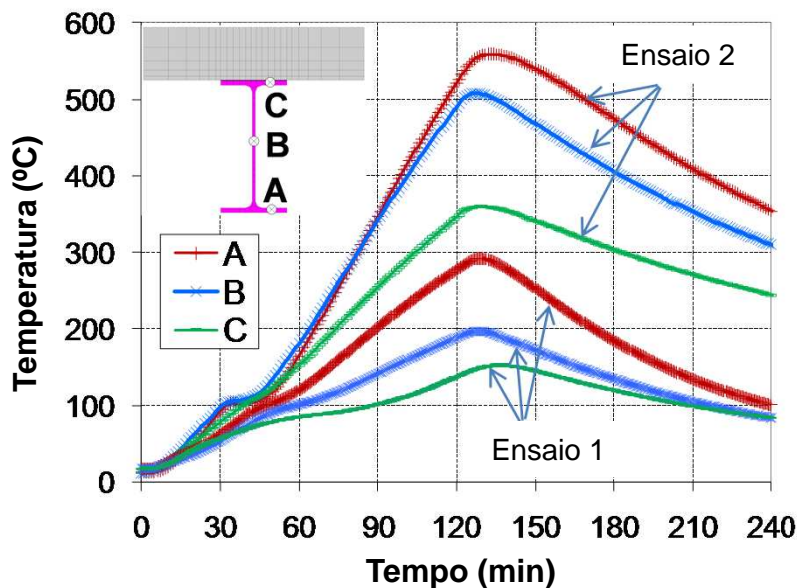
Objetivos

Set-up do ensaio

Resultados experimentais e observações

Comparação com o método de cálculo simplificado

Conclusão



• Observação

- Vigas muito mais quentes no ensaio 2 ≈ 550 °C e uma viga secundária de bordo aqueceu até mais de 600 °C



Resultados experimentais



- Aquecimento da laje mista

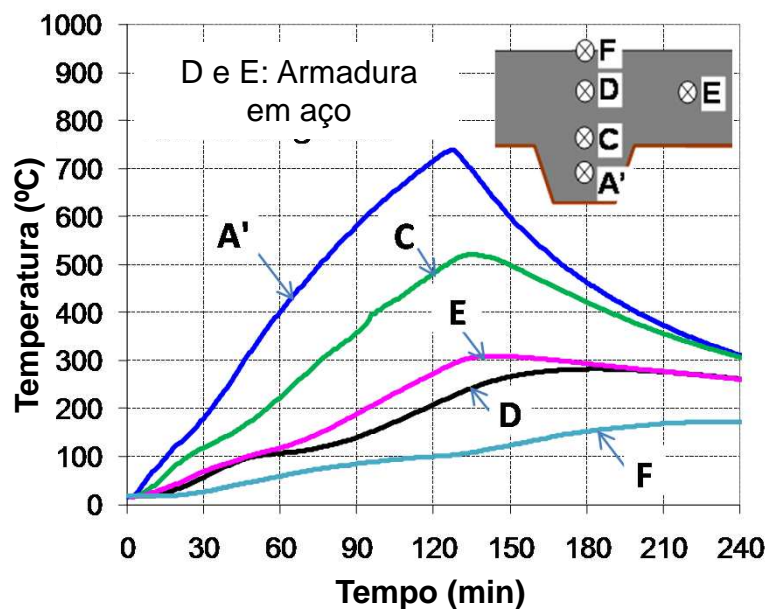
Objetivos

Set-up do ensaio

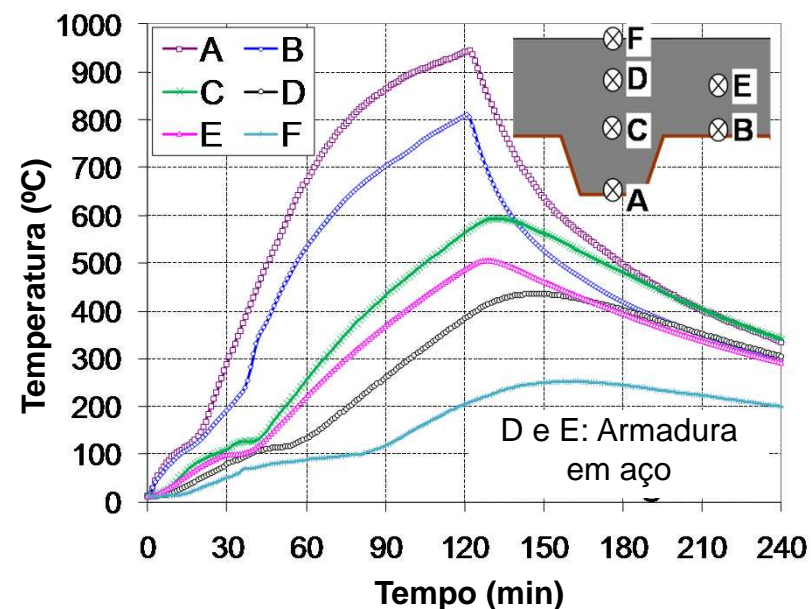
Resultados experimentais e observações

Comparação com o método de cálculo simplificado

Conclusão



Ensaio 1



Ensaio 2



Resultados experimentais



- **Ensaio 3: aquecimento da laje mista**

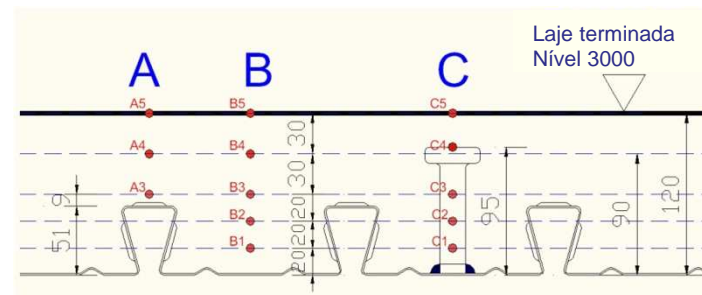
Objetivos

Set-up do ensaio

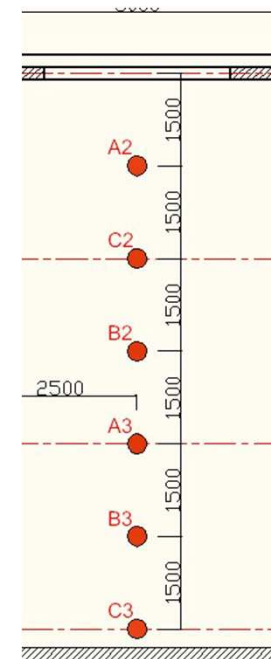
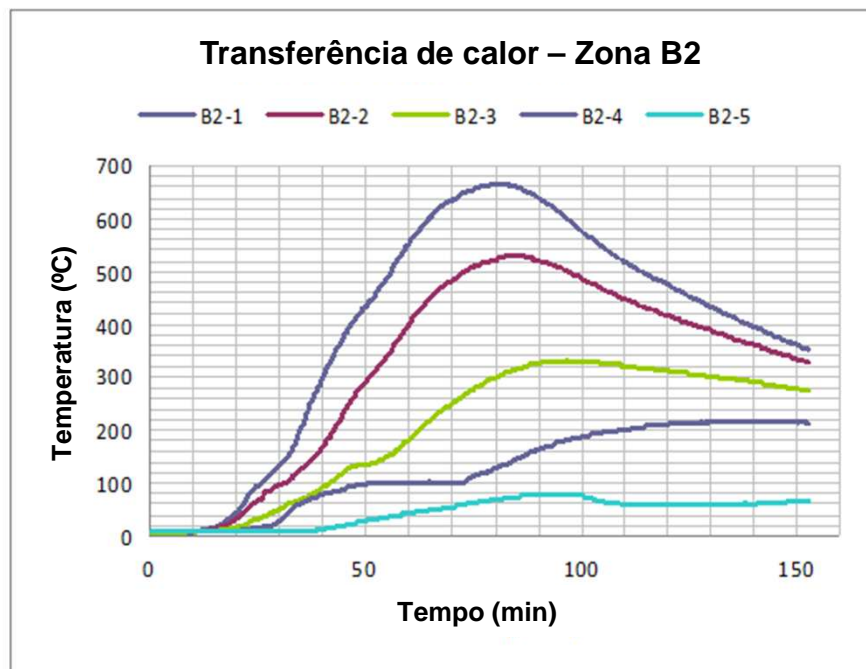
Resultados experimentais e observações

Comparação com o método de cálculo simplificado

Conclusão



T/C na laje / Conector de corte





- Transdutores de deslocamento para deformação

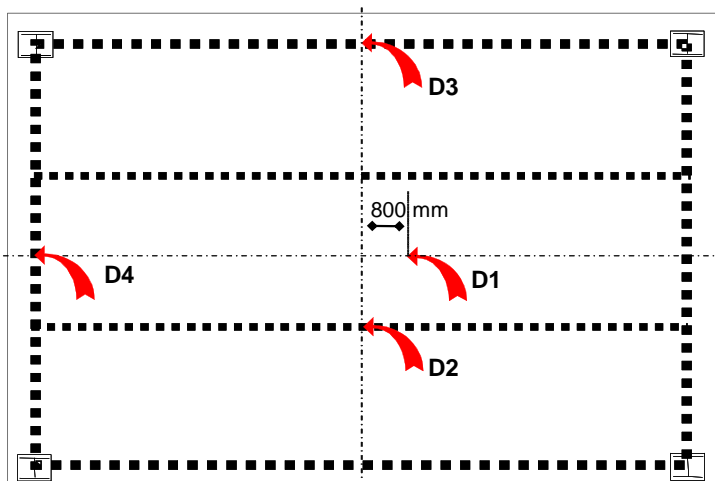
Objetivos

Set-up do ensaio

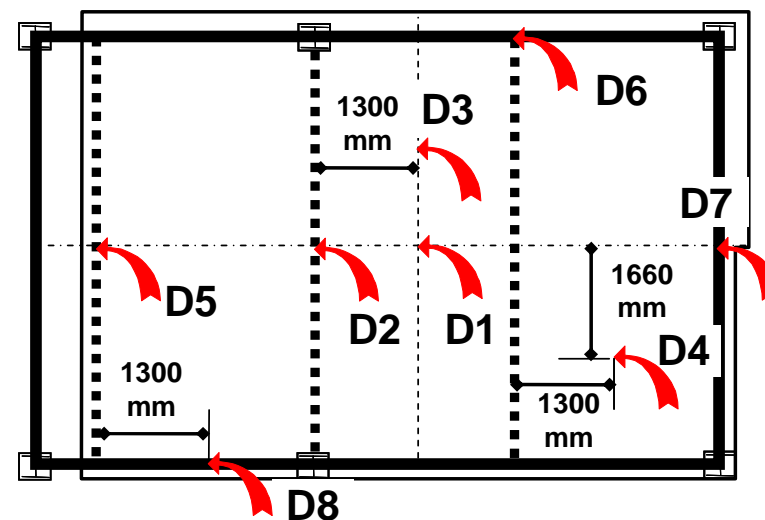
Resultados experimentais e observações

Comparação com o método de cálculo simplificado

Conclusão



Ensaio 1



Ensaio 2



Resultados experimentais



- **Deformação dos pavimentos**

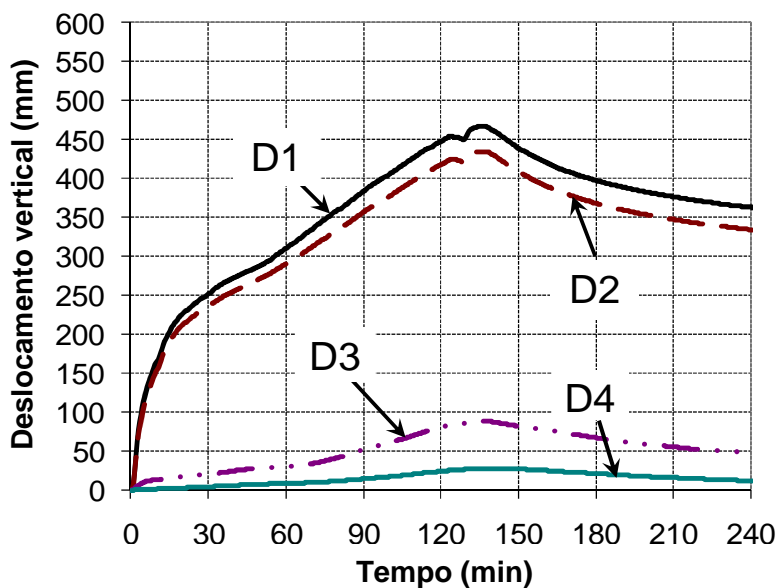
Objetivos

Set-up do ensaio

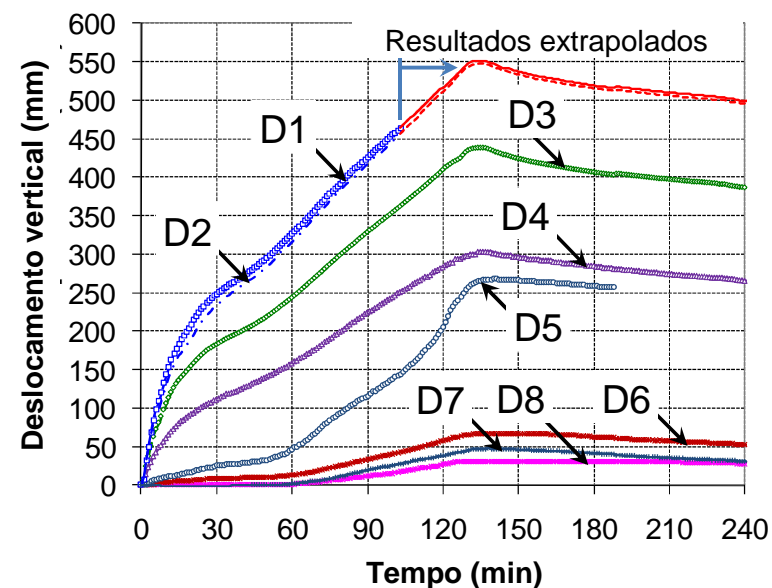
Resultados experimentais e observações

Comparação com o método de cálculo simplificado

Conclusão



Ensaio 1



Ensaio 2



Resultados experimentais



- **Ensaio 3: Transdutores de deslocamento para deformação**

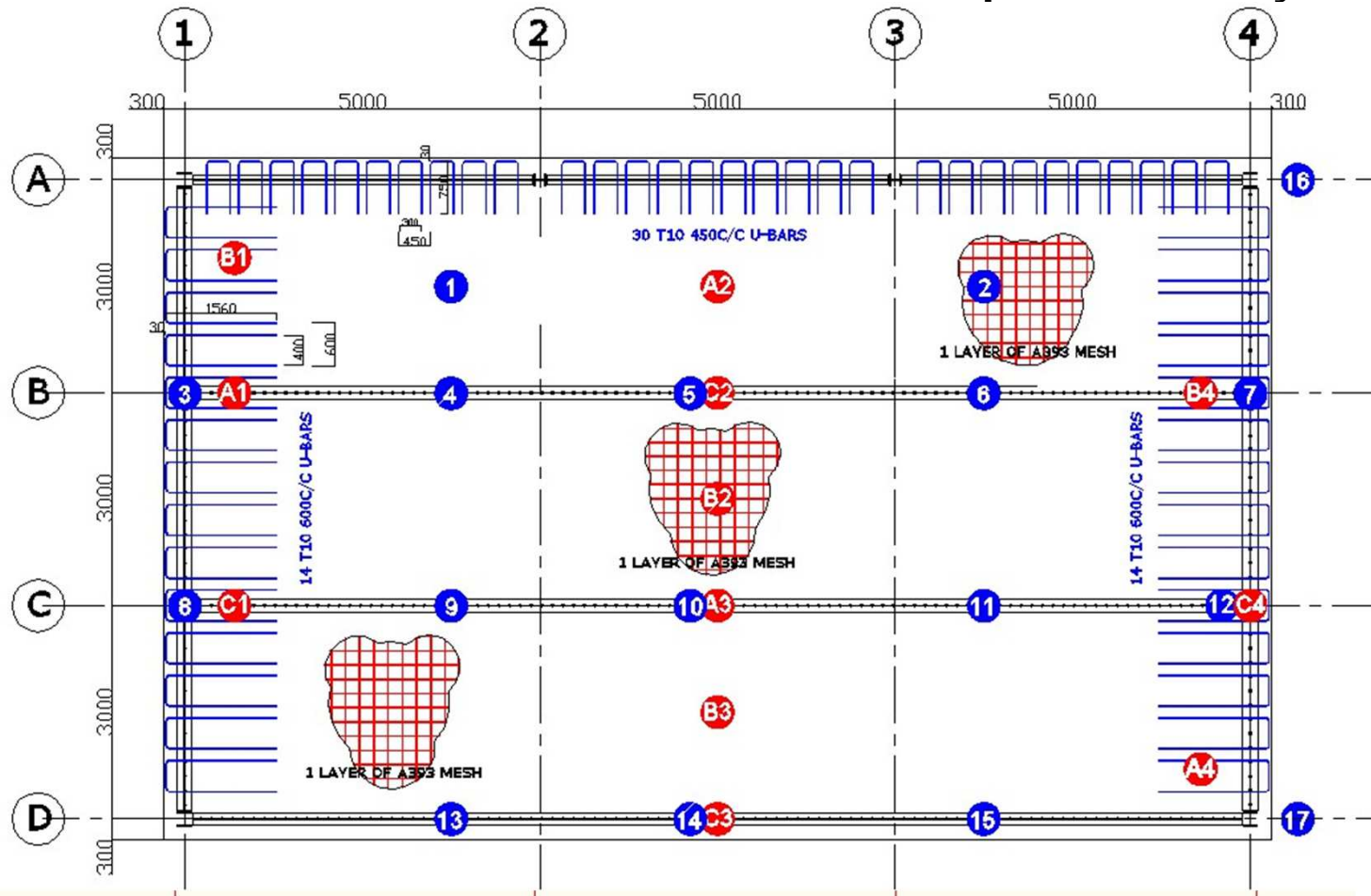
Objetivos

Set-up do ensaio

Resultados experimentais e observações

Comparação com o método de cálculo simplificado

Conclusão



LOCALIZAÇÃO DOS APARELHOS DE MEDIDA (T/C & LVDT)



- **Ensaio 3: Deformação do pavimento**

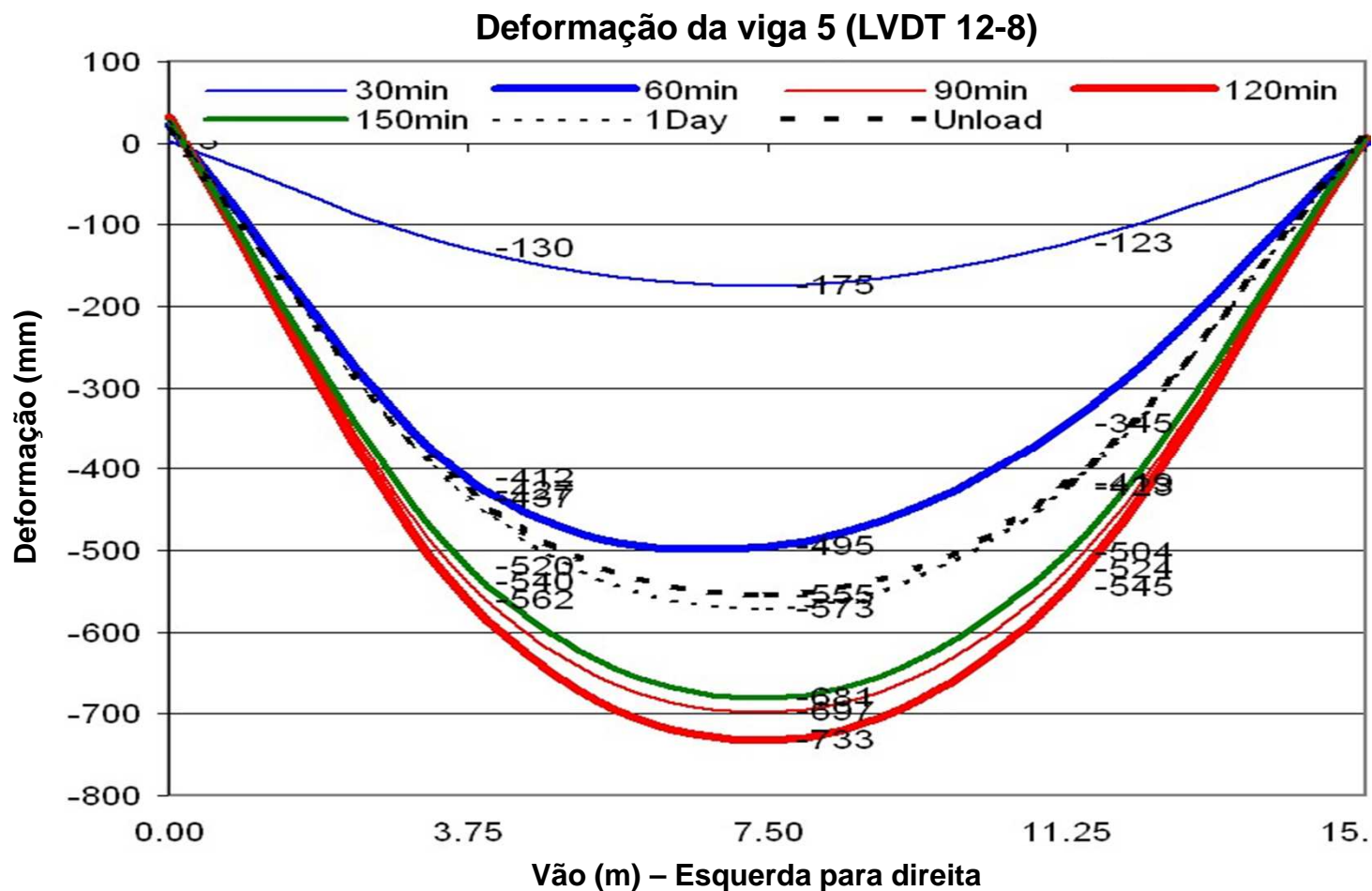
Objetivos

Set-up do ensaio

Resultados experimentais e observações

Comparação com o método de cálculo simplificado

Conclusão





- **Fissuração do betão (Ensaio 1)**

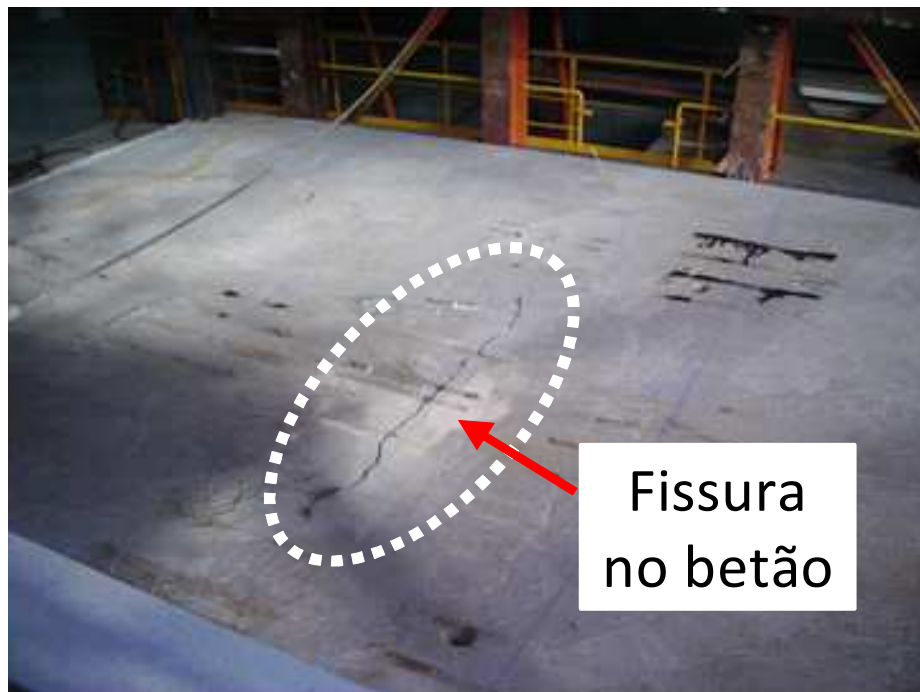
Objetivos

Set-up do ensaio

Resultados experimentais e observações

Comparação com o método de cálculo simplificado

Conclusão



- **Observação**

- Excelente estabilidade global do pavimento apesar da rotura da rede da armadura



- **Fissuração do betão (Ensaio 3)**

Objetivos

Set-up do ensaio

**Resultados
experimentais e
observações**

Comparação com o
método de cálculo
simplificado

Conclusão



- **Observação**

- Excelente estabilidade global do pavimento apesar do aparecimento da fissura



- **Instabilidade da alma da viga (Ensaio 3)**

Objetivos

Set-up do ensaio

**Resultados
experimentais e
observações**

Comparação com o
método de cálculo
simplificado

Conclusão





- **Esmagamento do betão (Ensaio 2)**

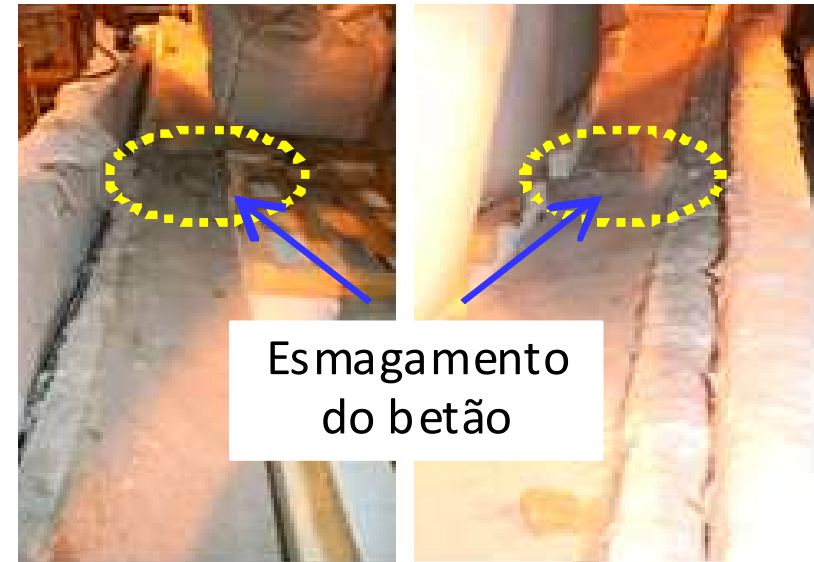
Objetivos

Set-up do ensaio

Resultados experimentais e observações

Comparação com o método de cálculo simplificado

Conclusão



- **Observação**

- A estabilidade global do pavimento manteve-se adequada apesar da rotura de uma viga de bordo



Comparação com as regras de dimensionamento simplificado



Objetivos	Ensaio 1		Ensaio 2		
	Ensaio	Métodos de cálculo simplificado	Ensaio	Métodos de cálculo simplificado	
Set-up do ensaio					
Resultados experimentais e observações					
Comparação com o método de cálculo simplificado					
	Classificação ao fogo (min)	> 120	120	> 120	96
	Deformação (mm)	450	366^(*)	510	376^(*)

Conclusão

- **Observação**
 - Resultados experimentais:
 - **Classe de resistência ao fogo > 120 minutos**



Objetivos

Set-up do ensaio

Resultados
experimentais e
observações

Comparação com o
método de cálculo
simplificado

Conclusão

- **Conclusões gerais relativas aos novos ensaios ao fogo**
 - Excelente desempenho dos sistemas de pavimento misto comportando-se sob ação de membrana durante a exposição ao fogo padrão ISO (>120 minutos);
 - **Nível elevado de robustez do sistema de pavimento misto apesar de algumas falhas locais;**
 - Deve prestar-se especial atenção aos detalhes construtivos, nomeadamente à rede da armadura, de forma a assegurar um bom desempenho no que diz respeito ao critério de estanquidade;
 - **O método de cálculo simplificado está do lado da segurança em comparação com os resultados dos ensaios;**
 - Não houve nenhum sinal de rotura dos sistemas de pavimento misto durante a fase de arrefecimento.