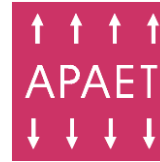


APAET: TERTÚLIAS SOBRE EXPERIMENTAÇÃO – Coimbra ISEC, 13 de Dezembro de 2018



INSTITUTO
SUPERIOR DE
ENGENHARIA
DE COIMBRA



UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Resistência ao Fogo de Elementos de Estruturas

Paulo Piloto

Departamento de Mecânica Aplicada, Instituto Politécnico de Bragança



Paulo A. G. Piloto^{a(*)}

^a Instituto Politécnico de Bragança (IPB), Portugal
LAETA-INEGI Portugal

(*) ppiloto@ipb.pt



OBJETIVO

- Divulgação de alguns ensaios experimentais realizados no Instituto Politécnico de Bragança (projetos de investigação e de programas de formação avançada).
- Apresentação sumária de cada tipo de ensaios e descritos os procedimentos utilizados para validação numérica.
- Importante conhecer com detalhe:
 - As propriedades dos materiais;
 - As condições limites (espaço e tempo);
 - A geometria do conjunto e os detalhes construtivos dos elementos ou parte de estruturas com influência nos resultados;
 - As condições de solicitação (térmica e mecânica);
 - O modo esperado de comportamento do material ou elemento.



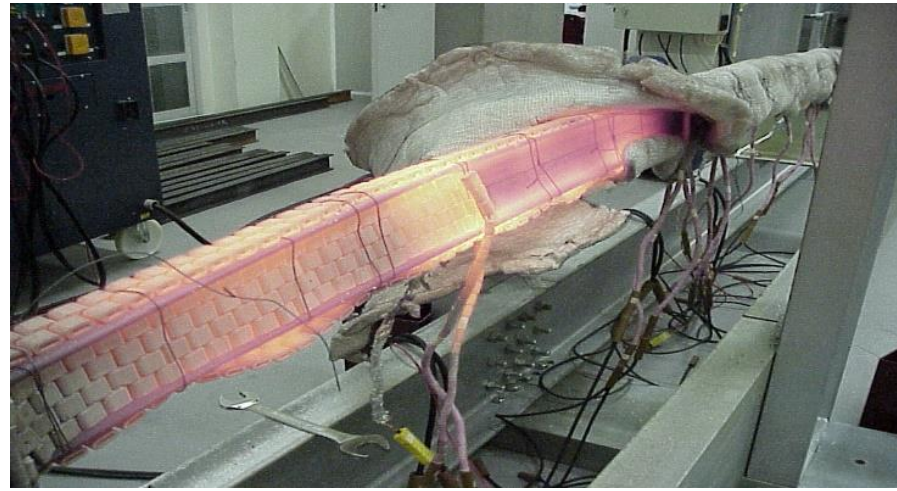
SUMÁRIO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

- Flexão de vigas em aço a temperaturas elevadas (domínio da resistência).
- Flexão de vigas em aço a temperaturas elevadas (domínio da temperatura).
- Adesão aço betão em elementos parcialmente embebidos com betão.
- Análise térmica de um forno de resistência ao fogo.
- Flexão de vigas protegidas com tinta intumescente a temperaturas elevadas.
- Flexão de vigas parcialmente embebidas com betão submetidas ao fogo.
- Flexão de vigas parcialmente embebidas com betão sujeitas a temperaturas elevadas.
- Reação ao fogo de tinta intumescente (micro, média e escala real).
- Resistência ao fogo de vigas com e sem proteção de tinta intumescente (escala real com carga).
- Durabilidade da tinta intumescente.
- Resistência ao fogo de lajes em madeira (Isolamento).
- Resistência ao fogo de paredes em tabique (Isolamento).
- Resistência ao fogo de paredes não portantes de aço enformado a frio (Isolamento).



FLEXÃO DE VIGAS EM AÇO A TEMPERATURAS ELEVADAS (EXPERIMENTAL)

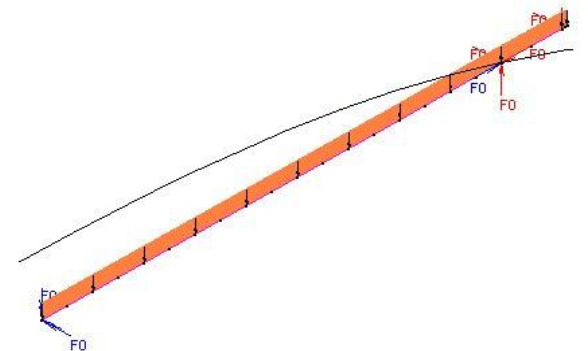
- 120 ensaios de resistência à flexão em quatro pontos.
- Procedimento térmico: aumento e estabilização da temperatura a diferentes níveis
- Procedimento mecânico: carga incremental para determinação da resistência.
- Repetibilidade de 3 ensaios para cada condição do elemento (temp. e comprimento).
- Um tipo de secção reta (IPE100).
- Comprimentos variáveis : L=0.5 até L=6.0
- Material: propriedades mecânicas caracterizadas (medição).
- Imperfeição: geométrica e tensões residuais (medição).
- Critério de paragem do ensaio: limite deslocamento ou taxa de variação de deslocamento.
- Outras medições: Deslocamentos a meio vão e forças (aplicadas e reativas)



Temp. [°C]	L= 0.5 [m]	L= 1.5 [m]	L= 2.5 [m]	L= 3.5 [m]	L= 4.5 [m]	L= 5.5 [m]	L= 6.5 [m]
20	P31	P33	P36	P01	P20	P22	P11
20	P31	P33	P35	P02	P17	P23	P17
20	P31	P33	P36	P07	P20	P27	P12
200	P31	P33	P38	P38	P23	-	P19
200	P31	P34	P41	P38	P21	-	P20
200	P04	P33	P39	P39	P30	-	P14
300	P05	P33	P38	P41	P28	-	P15
300	P02	P34	P37	P39	P24	-	P16
300	P31	P34	P36	P40	P25	-	P13
400	P07	P20	P40	P40	P15	P25	P18
400	P06	P09	P46	P37	P25	P08	P10
400	P31	P08	P44	P41	P26	P09	P02
500	P31	P43	P43	P06	P16	P29	P05
500	P31	P42	P42	P04	P14	P27	P07
500	P10	P44	P45	P05	P18	P26	P06
600	P03	P46	P42	P10	P13	P28	P01
600	P01	P45	P43	P09	P12	P30	P03
600	P31	P43	P46	P03	P19	P22	P04

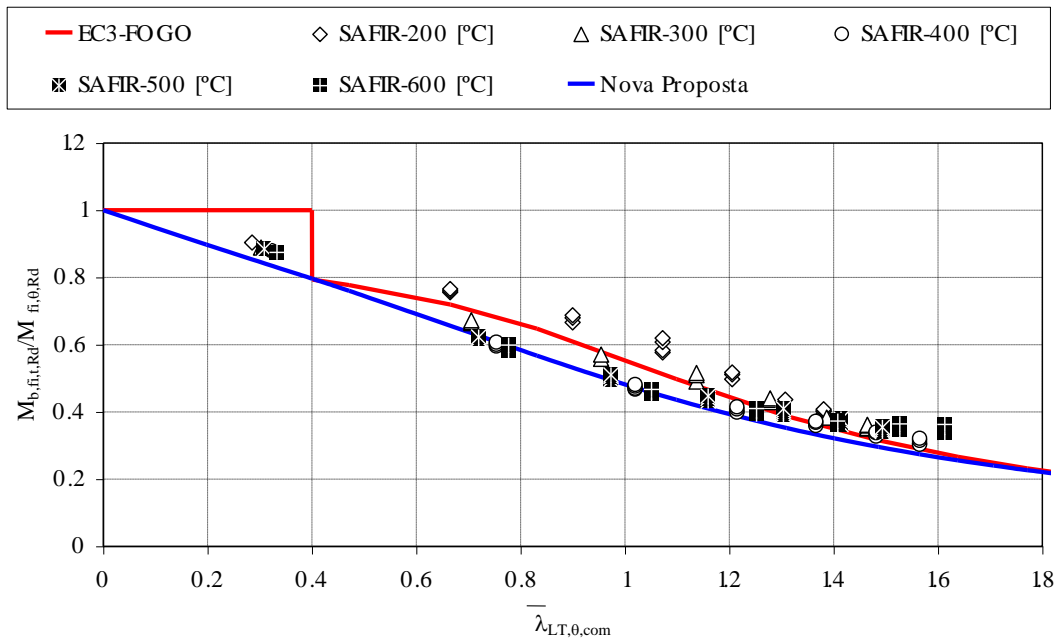
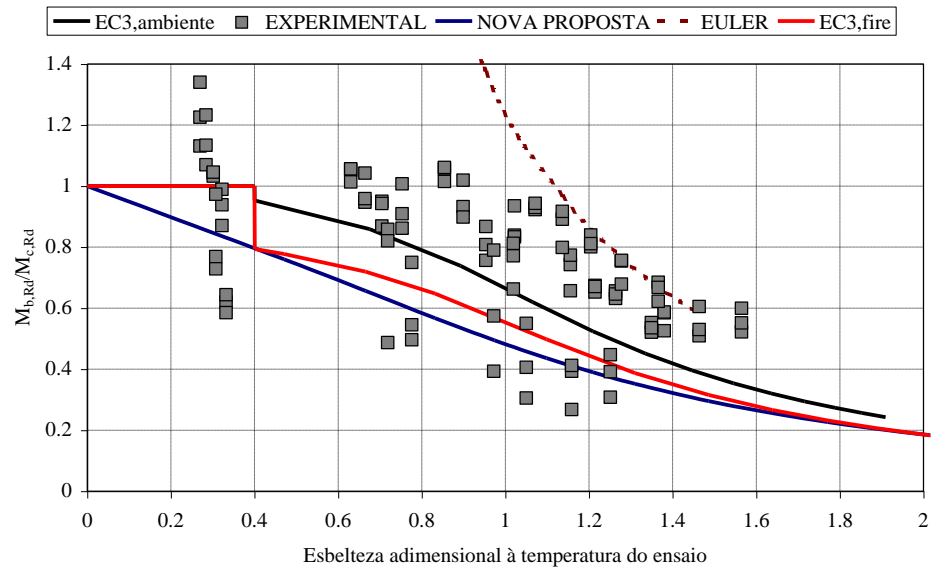
FLEXÃO DE VIGAS EM AÇO A TEMPERATURAS ELEVADAS (NUMÉRICO)

- Modelo de elementos finitos simples (SAFIR: viga 3D com 3 nós e 15 GDL).
- Funções de interpolação são polinomiais de 3º e 2º grau.
- Modelo térmico e mecânico desacoplado.
- Modelo térmico: método das fibras, com solução 2D secção reta.
- Modelo mecânico: teoria de Euler-Bernoulli 3D.
- Método de solução é incremental e iterativo.
- Critério de convergência: incremento de energia realizado pelas forças interiores.



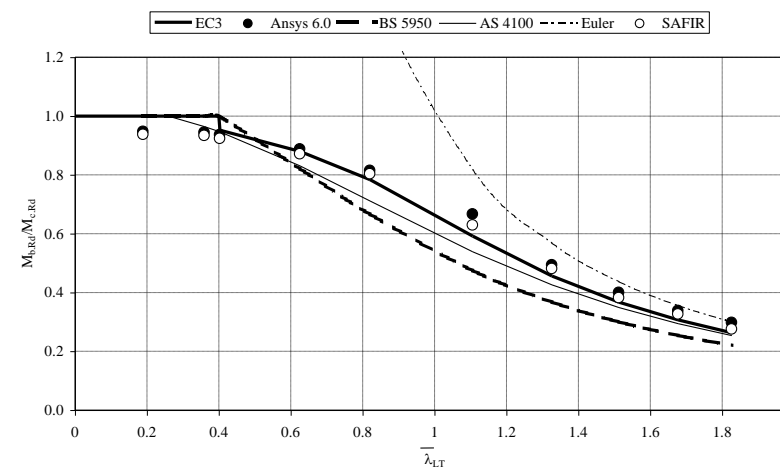
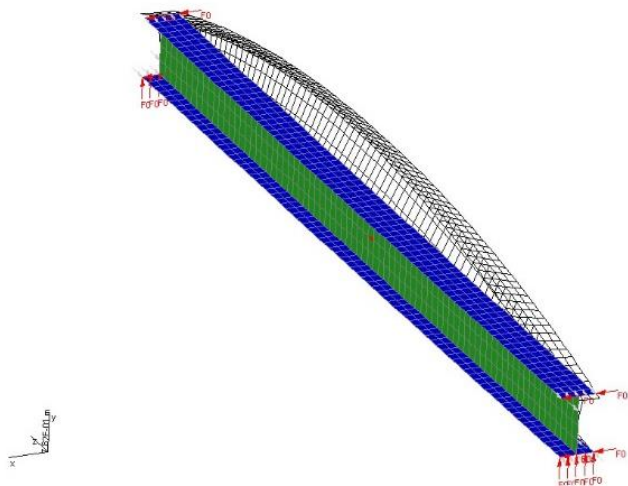
FLEXÃO DE VIGAS EM AÇO A TEMPERATURAS ELEVADAS (EXPERIMENTAL VS NUMÉRICO)

- Resultados numéricos estão compilados em termos de resistência última.
- Apresentada uma nova proposta de cálculo simples no Eurocódigo 3, parte 1.2 (ELT)



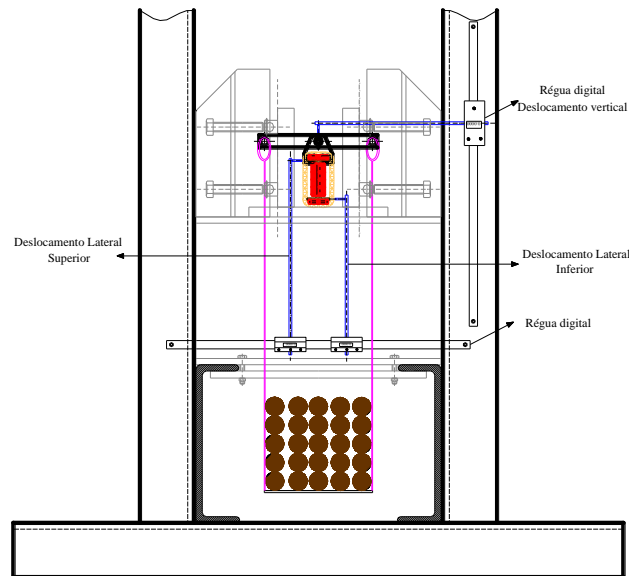
FLEXÃO DE VIGAS EM AÇO À TEMPERATURA AMBIENTE (OUTROS MODELOS NUMÉRICOS)

- Resistência de vigas metálicas foi comparada à temperatura ambiente, em flexão uniforme, com outros documentos normativos (BS 5950-1, AS 4100).
- Modelo de elementos finitos (SAFIR: casca, ANSYS: SHELL181, 4 nós e 24 GDL), Funções de interpolação são lineares.
- Material: comportamento mecânico de acordo EN1993-1-5.
- Imperfeição geométrica: harmônica com amp. Máxima L/1000.
- Tensões residuais: Não consideradas.



FLEXÃO DE VIGAS EM AÇO A TEMPERATURAS ELEVADAS (EXPERIMENTAL)

- 15 ensaios experimentais de flexão em 3 pontos em vigas de aço.
- Repetibilidade de 3 ensaios para cada condição do elemento (carga e comprimento).
- Carga aplicada no banzo superior constante (G.U. de 60%), para determinação da temperatura crítica.
- Procedimento mecânico: carga constante para determinação da temperatura crítica.
- Procedimento térmico: Aquecimento incremental com HTC a 800 [°C/h].

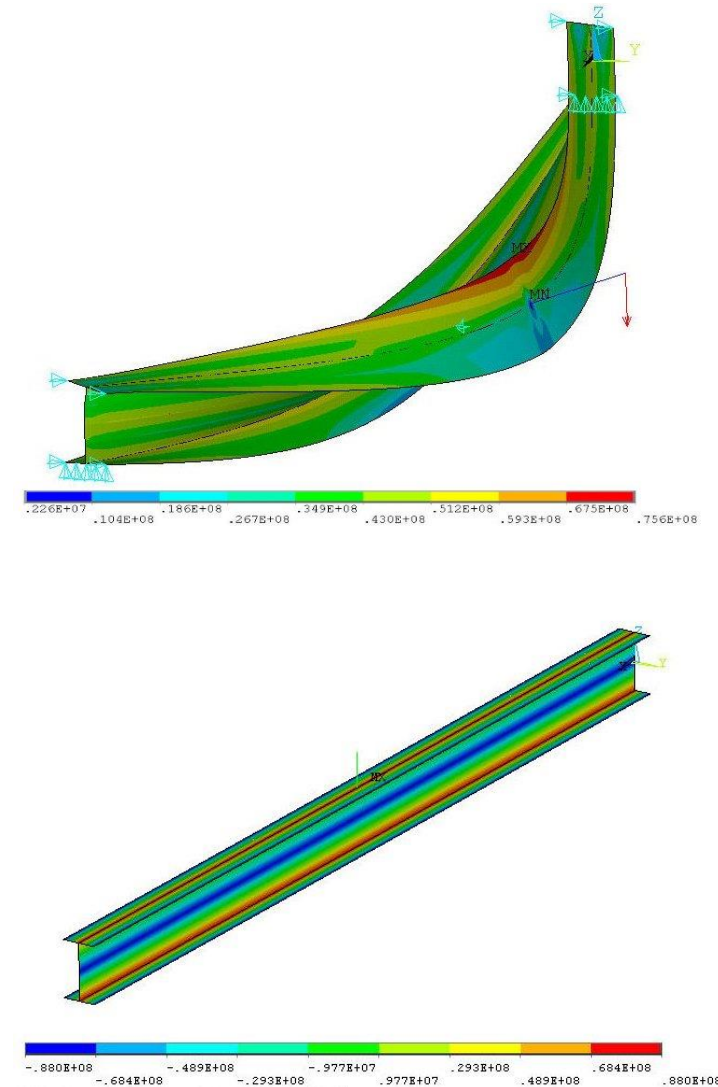


L [m]	Teste	T Crítica [°C]	T Crítica media / S.D.[°C]	Desl. Máximo (DV) [-]
1,5	L1.5-1	717	704 / 13,5	L/45
	L1.5-2	690		L/63
	L1.5-3	705		L/137
2,0	L2.0-1	770	680 / 83,1	L/125
	L2.0-2	606		L/121
	L2.0-3	665		L/56
2,5	L2,5-1	732	737 / 4,6	L/71
	L2,5-2	740		L/73
	L2,5-3	740		L/63
3,5	L3,5-1	744	717 / 25,6	L/69
	L3,5-2	693		L/135
	L3,5-3	715		L/109
4,5	L4,5-1	732	748 / 14,2	L/70
	L4,5-2	757		L/65
	L4,5-3	756		L/96



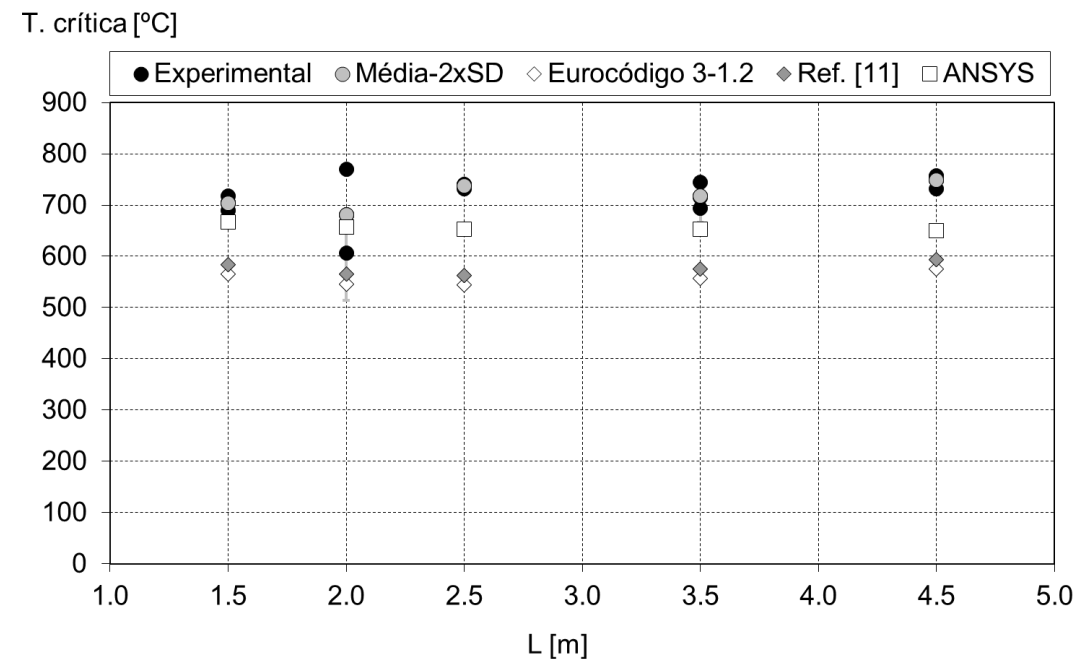
FLEXÃO DE VIGAS EM AÇO A TEMPERATURAS ELEVADAS (NUMÉRICO)

- Modelo de elementos finitos (ANSYS: SHELL181 com 4 nós e 24 GDL).
- Formulação baseada na teoria de cascas finas.
- Modelo: Elemento BEAM188 de interface com elevada rigidez (sistema de aplicação de carga).
- A seção definida pelo plano médio.
- Material: Relações elíticas elasto-plásticas do EN1993-1-2, valores característicos das propriedades obtidas experimentalmente.
- Imperfeição geométrica e material: harmónica com amp. Máxima $L/1000$ e distribuição de tensões residuais (valor máximo = 30 % do valor da tensão de cedência).



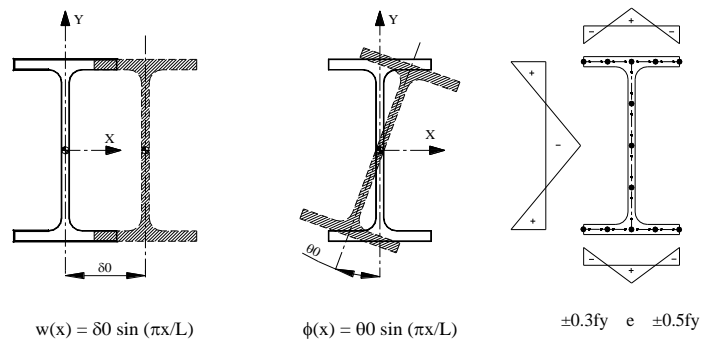
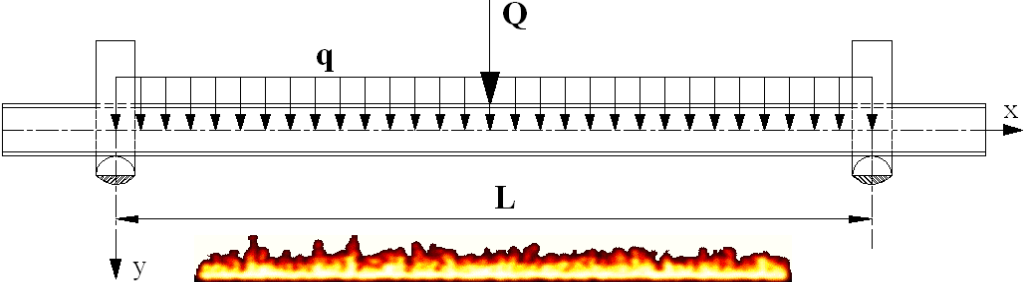
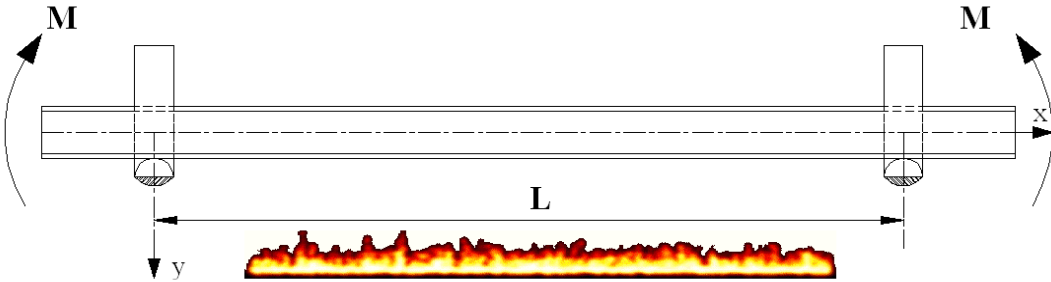
FLEXÃO DE VIGAS EM AÇO A TEMPERATURAS ELEVADAS (EXPERIMENTAL VS NUMÉRICO)

- Modelo térmico e mecânico desacoplado.
- Método de solução é incremental e iterativo.
- Modelo térmico: Temperatura uniforme no elemento e incremental.
- Critério de convergência: incremento de energia realizado pelas forças interiores.



FLEXÃO DE VIGAS EM AÇO A TEMPERATURAS ELEVADAS – OUTROS MODELOS NUMÉRICOS - INFLUÊNCIA DA IMPERFEIÇÃO

- Simulação do fenómeno de instabilidade associado à temperatura crítica do elemento.
- Modelo mecânico para dois casos de carga: Flexão uniforme e flexão 3 pontos (carga constante, GU=60 e 80%).
- Modelo térmico: Temperatura aplicada nos nós dos elementos, 800 [°C/h].



CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
$\delta_0 = L/1000.0$	$\delta_0 = L/1000.0$	$\delta_0 = L/1000.0$ $\theta_0 = L/125.0$	$\delta_0 = L/400$	$\delta_0 = L/1000.0$
$\sigma_{resid} = 0.3f_y$	$\sigma_{resid} = 0.5f_y$	$\sigma_{resid} = 0.3f_y$		



FLEXÃO DE VIGAS EM AÇO A TEMPERATURAS ELEVADAS – OUTROS MODELOS NUMÉRICOS - INFLUÊNCIA DA IMPERFEIÇÃO

- Resultados:

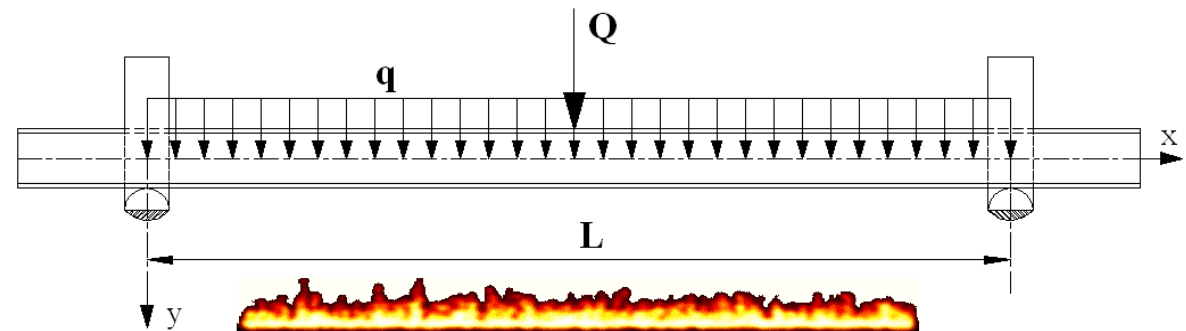
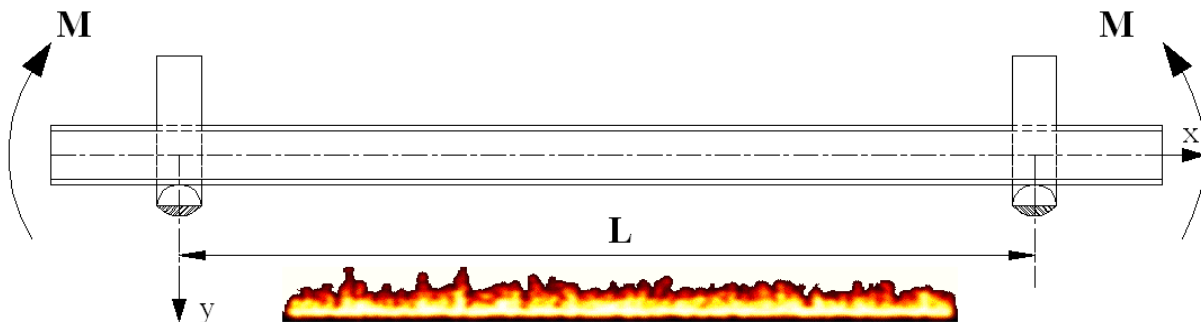
- Na ausência das tensões residuais, a temperatura crítica aumenta com a imperfeição (casos 1,3 vs caso 4,5).
- A temperatura crítica diminui com o aumento da esbelteza do elemento.
- Um aumento na amplitude das tensões residuais produz uma maior diminuição da temperatura crítica, em vigas de maior comprimento (caso 1 vs caso 2).
- Quando a imperfeição geométrica de rotação da secção é considerada, caso 3, existe uma diminuição da temperatura crítica (caso 1 vs caso 3).
- A imperfeição geométrica equivalente (caso 4) proporciona valores da Temperatura crítica superiores à situação em que é combinada a influência da geometria e do material, caso 1).

Grau	60%	60%	60%	60%	60%		80%	80%	80%	80%	80%
L [m]	60% Caso 1	60% Caso 2	60% Caso 3	60% Caso 4	60% Caso 5		80% Caso 1	80% Caso 2	80% Caso 3	80% Caso 4	80% Caso 5
1.0	603.8	599.4	598.7	602.6	609.1		570.0	567.0	566.0	569.0	574.2
1.5	600.2	595.2	596.0	602.2	608.7		568.8	564.0	564.0	569.0	574.3
2.0	598.6	592.2	594.1	601.9	608.6		567.6	561.2	562.0	569.0	574.5
2.5	597.5	589.3	592.5	602.1	608.8		566.6	558.9	560.3	569.0	574.9
3.0	596.1	586.4	590.7	602.0	608.8		565.3	556.4	558.8	569.0	575.1
3.5	594.6	583.5	588.5	602.1	609.8		563.9	553.6	556.9	569.0	575.9



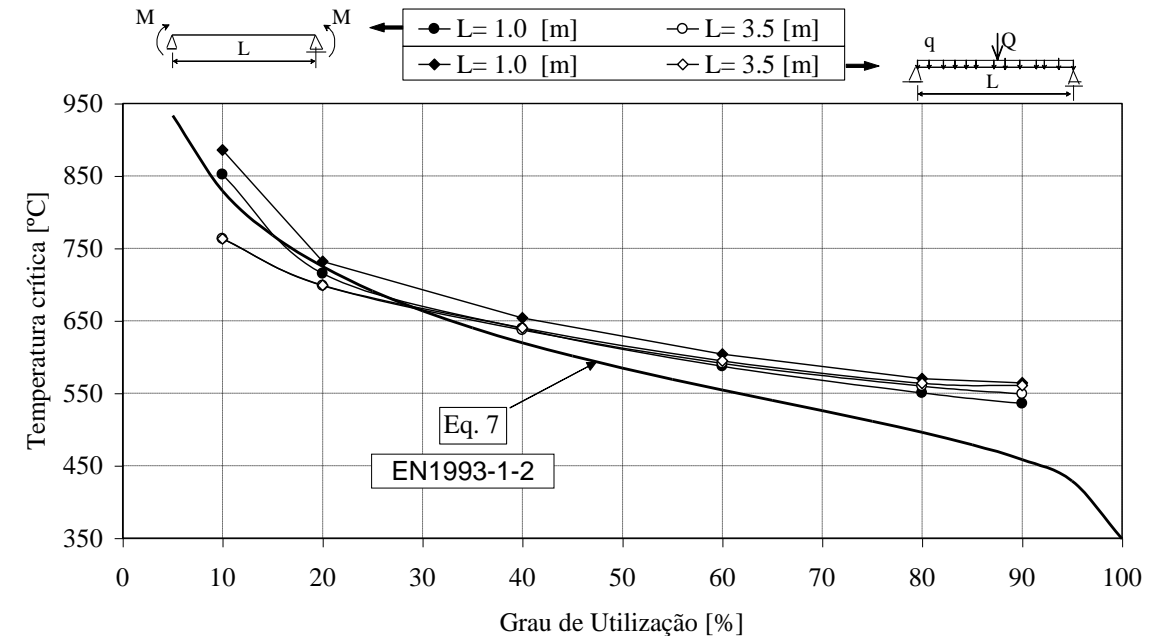
VIGAS METÁLICAS A TEMPERATURAS ELEVADAS (DOMÍNIO DA TEMPERATURA) – OUTROS MODELOS NUMÉRICOS – INFLUÊNCIA DO NÍVEL DE CARREGAMENTO

- Simulação do fenómeno de instabilidade associado à temperatura crítica do elemento.
- Modelo mecânico para dois casos de carga: Flexão uniforme e flexão 3 pontos.
- Modelo térmico: Temperatura aplicada nos nós dos elementos, $800 [^{\circ}\text{C}/\text{h}]$.
- Graus de utilização (20, 40, 60 e 80 %) para os dois casos de carga, tomando como referência a imperfeição caso 1.



VIGAS METÁLICAS A TEMPERATURAS ELEVADAS (DOMÍNIO DA TEMPERATURA) – OUTROS MODELOS NUMÉRICOS – INFLUÊNCIA DO NÍVEL DE CARREGAMENTO

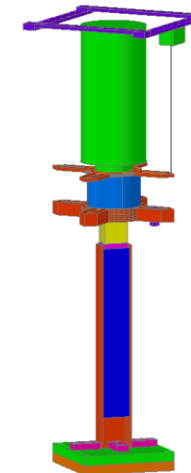
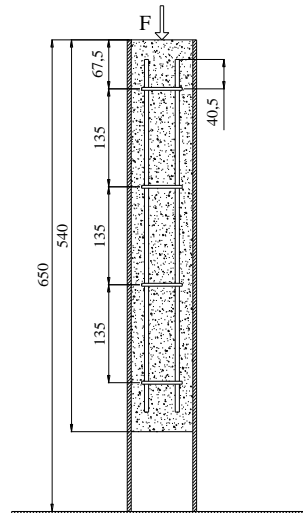
- Resultados:
 - A temperatura crítica diminui com o aumento do grau de utilização.
 - Caso de carga de flexão em 3 pontos, para baixos valores do grau de utilização, a temperatura crítica varia com o comprimento da viga. Este efeito desaparece com o aumento do grau de utilização.
 - A temperatura crítica é menor para o caso de carga de flexão uniforme.
 - O método de cálculo simplificado do EN1993-1-2 é inseguro e conservativo para alguns valores de grau de utilização.



ADESÃO AÇO BETÃO EM ELEMENTOS PARCIALMENTE EMBEBIDOS COM BETÃO (EXPERIMENTAL)

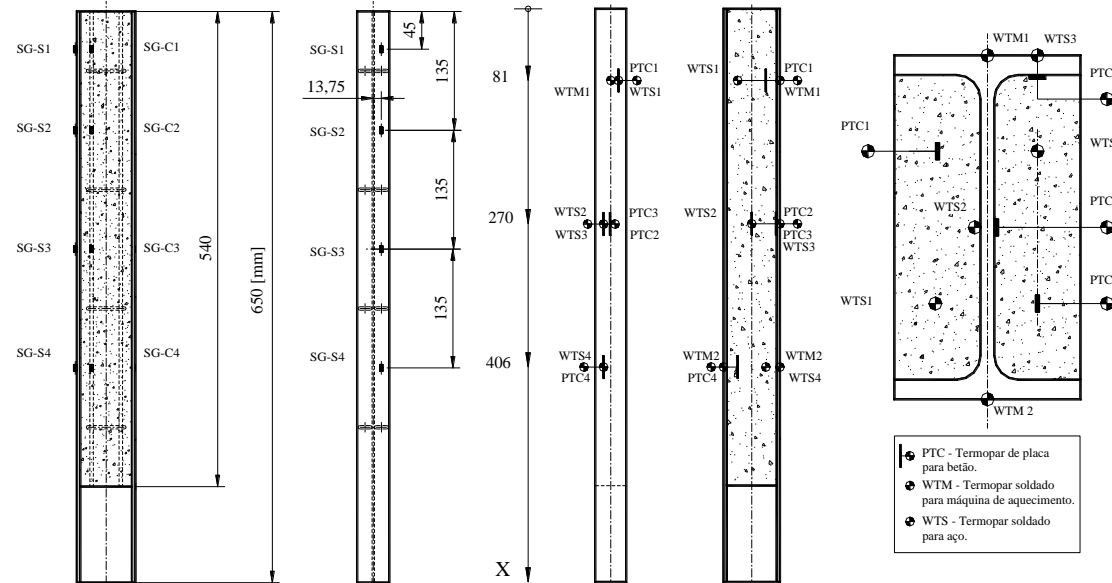
- 9 Ensaios do tipo “push-out” para determinação da tensão de adesão.
- A tensão de adesão é definida pela tensão de corte máxima entre estes materiais.
- Resultados para a Temp. ambiente e a Temp. elevadas (400 [°C]), através de curvas de força (F) vs deslocamento.
- Repetibilidade de 3 ensaios para cada condição de adesão.
- Procedimento térmico: Aquecimento incremental com HTC a 400 [°C/h] e estabilização da temperatura.
- Procedimento mecânico: Deslocamento incremental para determinação da reação no apoio.

Série	Amostra	Temperatura	Estribos
1	E-01	ambiente	NW
	E-02		
	E-03		
2	E-04	ambiente	W
	E-05		
	E-06		
3	E-10	400 °C	NW
	E-11		
	E-12		



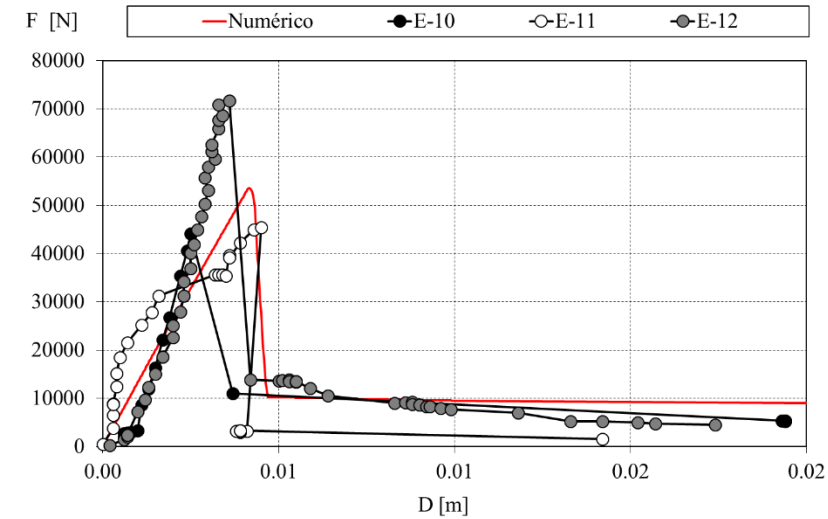
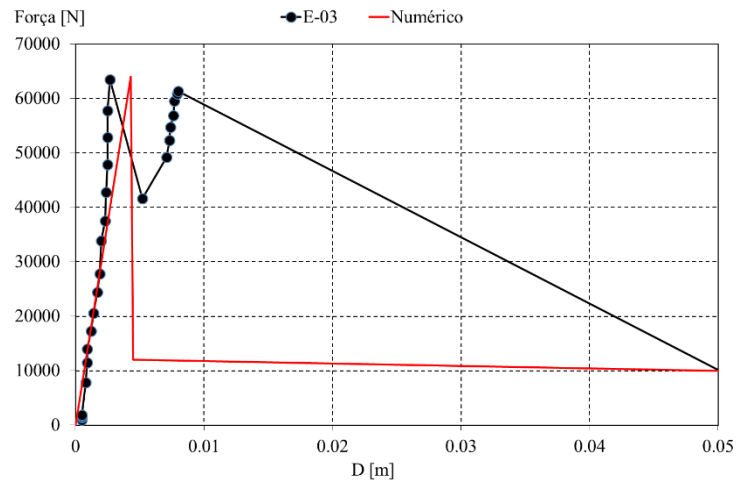
ADESÃO AÇO BETÃO EM ELEMENTOS PARCIALMENTE EMBEBIDOS COM BETÃO (EXPERIMENTAL)

- Rugosidade da superfície do aço: média aritmética igual a 3,22 [μm].
- Instrumentação com: extensómetros (transferência das deformações) e termopares (Temp.).
- Instrumentação com: transdutor de deslocamento potenciométrico (deslocamento relativo betão).
- Instrumentação com: duas células de carga (cilindro e reação na base).
- Temp. ambiente: Procedimento de deslocamento incremental para determinação da tensão de adesão.
- Temp. Elevadas: Aquecimento a 400 [$^{\circ}\text{C}/\text{h}$], estabilização e posterior descolamento incremental.



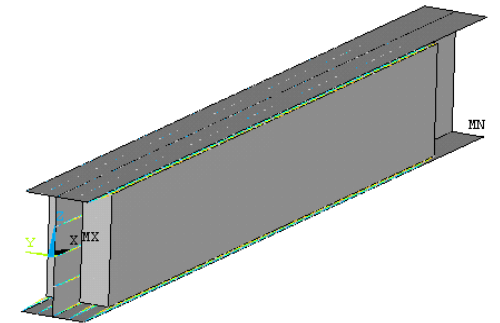
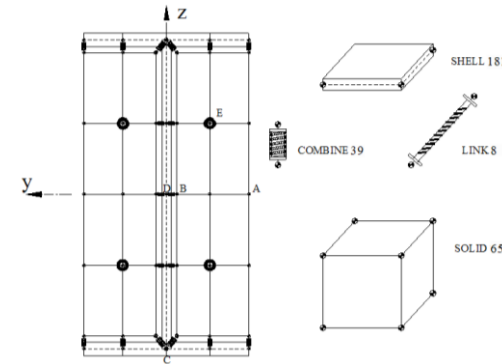
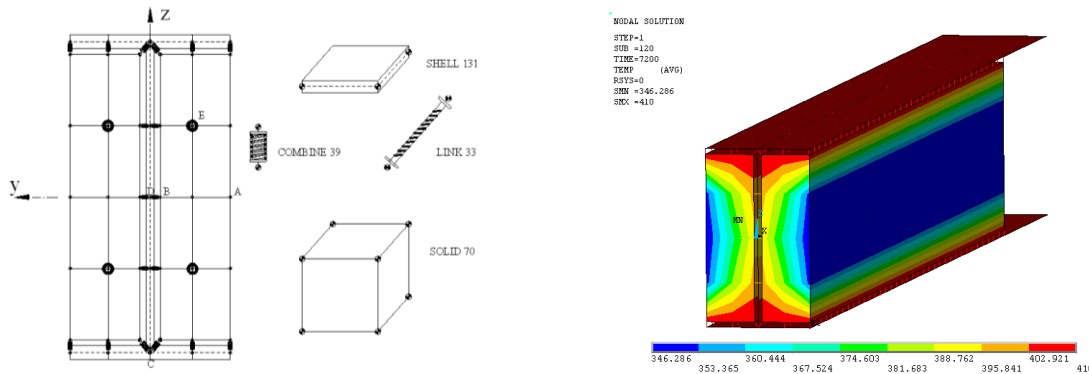
ADESÃO AÇO BETÃO EM ELEMENTOS PARCIALMENTE EMBEBIDOS COM BETÃO (EXPERIMENTAL)

- Valor médio da tensão de adesão a 400 °C, 0.354 [MPa].



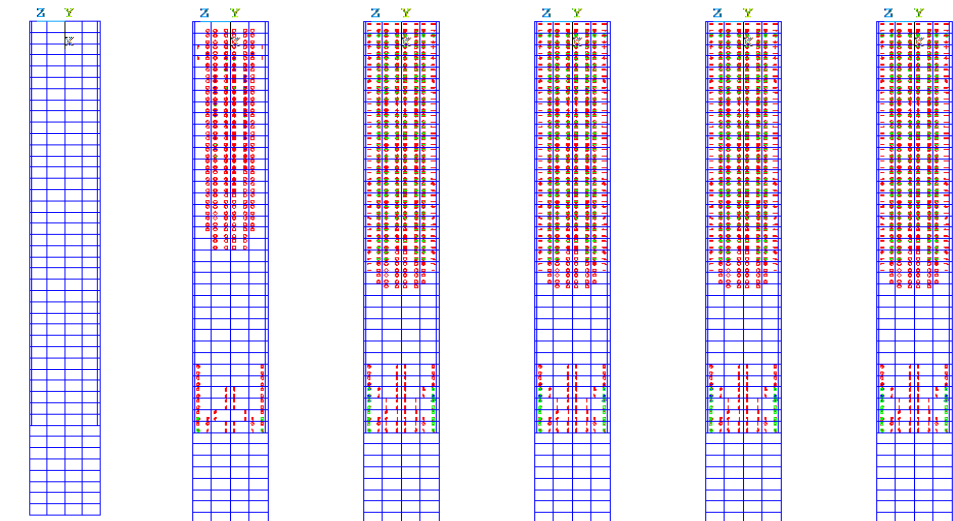
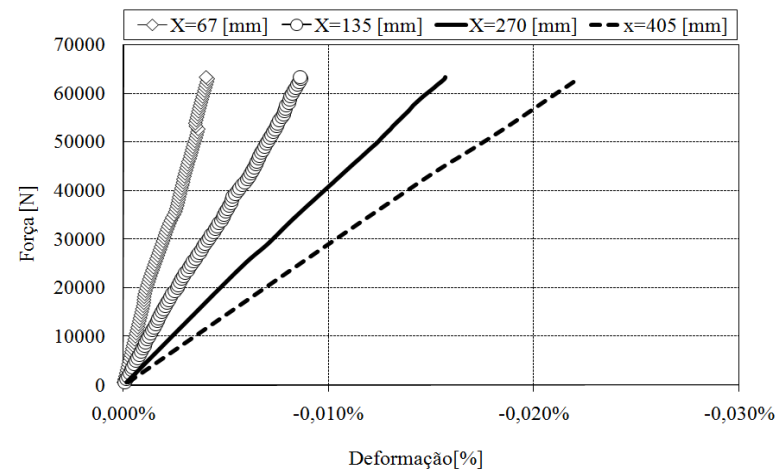
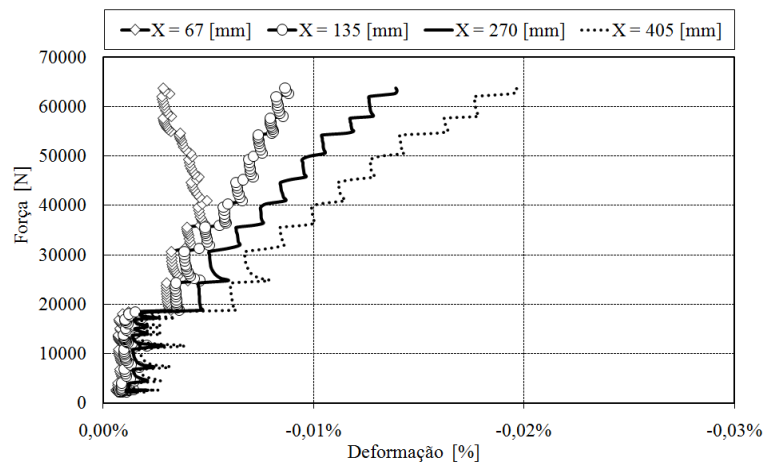
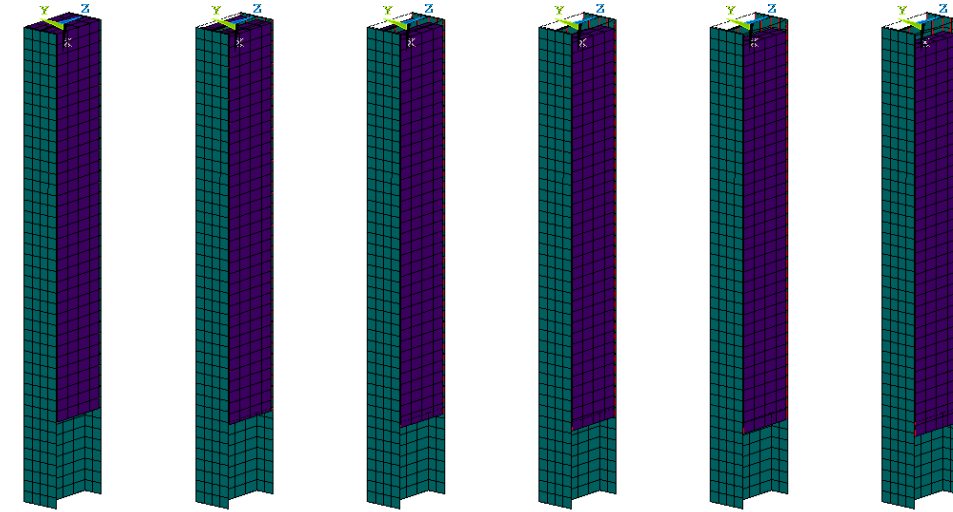
ADESÃO AÇO BETÃO EM ELEMENTOS PARCIALMENTE EMBEBIDOS COM BETÃO – NUMÉRICO

- Modelos do comportamento dos materiais: adaptados a partir dos Eurocódigos.
- O betão: Critério de rotura, baseado num parâmetro de tensão.
- Modelo térmico ANSYS: SOLID70, LINK33, SHELL131 e COMBIN39
 - Métodos de solução não lineares, utilizando a condutância térmica na interface aço-betão.
- Modelo mecânico ANSYS: SOLID65, LINK8, SHELL181 e COMBIN39
 - Método de solução geométrica e material não lineares, para simular grandes deslocamentos com carregamentos incrementais e métodos de solução iterativos.



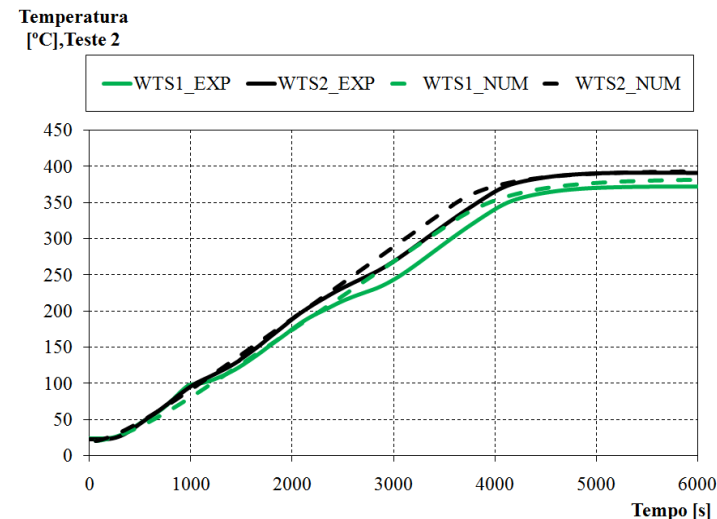
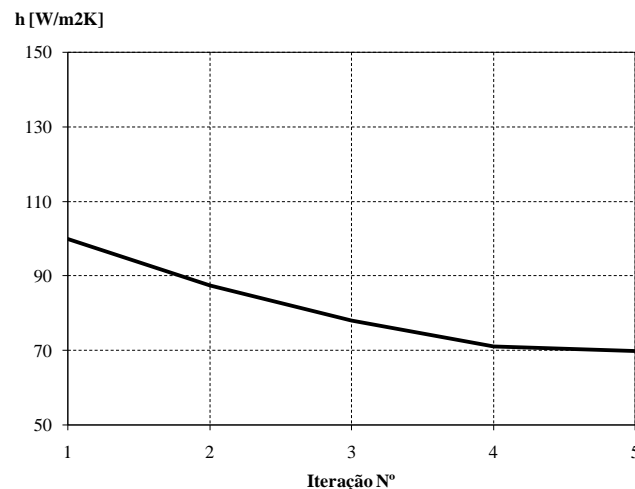
ADESÃO AÇO BETÃO EM ELEMENTOS PARCIALMENTE EMBEBIDOS COM BETÃO –À TEMP. AMBIENTE (EXPERIMENTAL VS NUMÉRICO)

- Dano progressivo causado no betão (série 2).
- Semelhança nos resultados das deformações:
 - Validam o comportamento do modelo elemento de mola não linear.



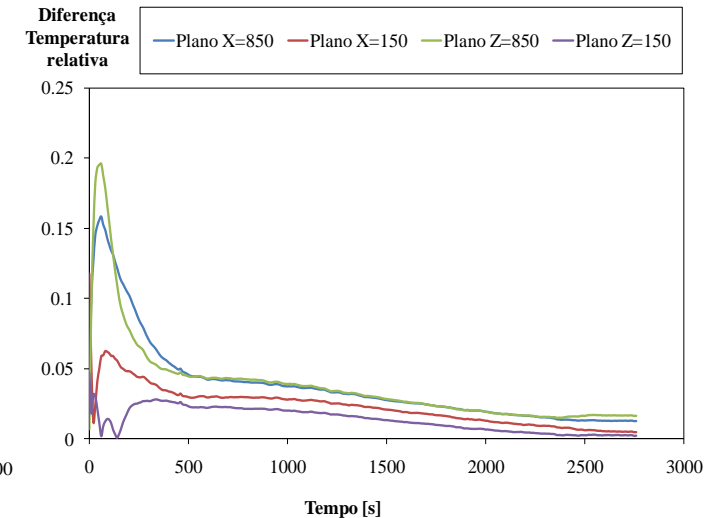
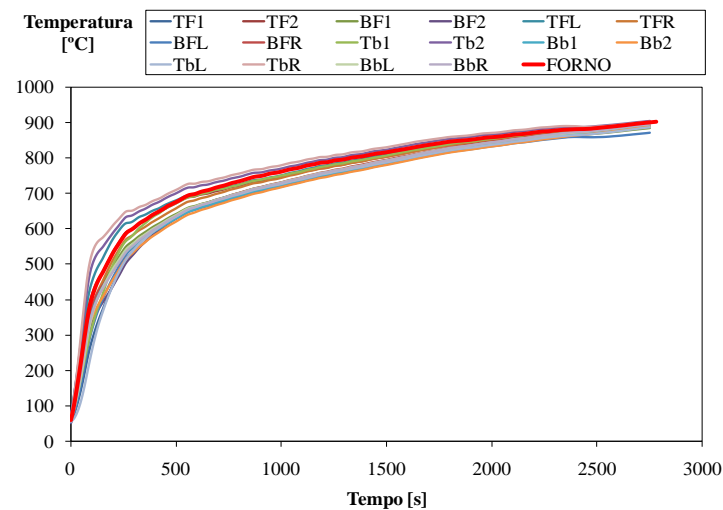
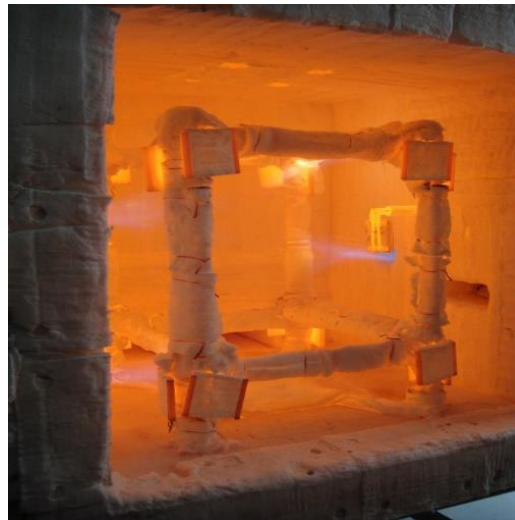
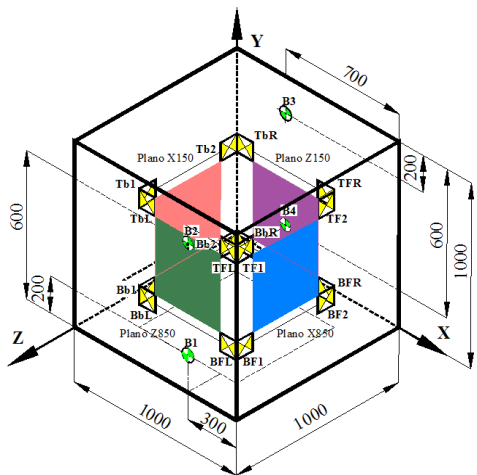
ADESÃO AÇO BETÃO EM ELEMENTOS PARCIALMENTE EMBEBIDOS COM BETÃO - OUTROS MODELOS NUMÉRICOS - DETERMINAÇÃO DA CONDUTÂNCIA TÉRMICA

- Objetivo: Determinação da condutância da interface de contacto (aço-betão).
- Método de solução: método inverso de análise não linear de transferência de calor, com otimização de 1ª ordem.
- Função objetivo: Definida no tempo e no espaço, através da minimização do erro relativo quadrático, entre as temperaturas experimentais e numéricas.
- Método de solução: uma série de ciclos de análise, avaliação e modificação da variável de projeto (condutância).

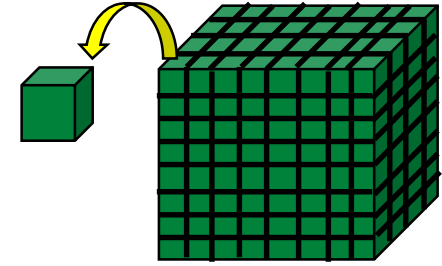


ANÁLISE TÉRMICA DE UM FORNO DE RESISTÊNCIA AO FOGO - EXPERIMENTAL

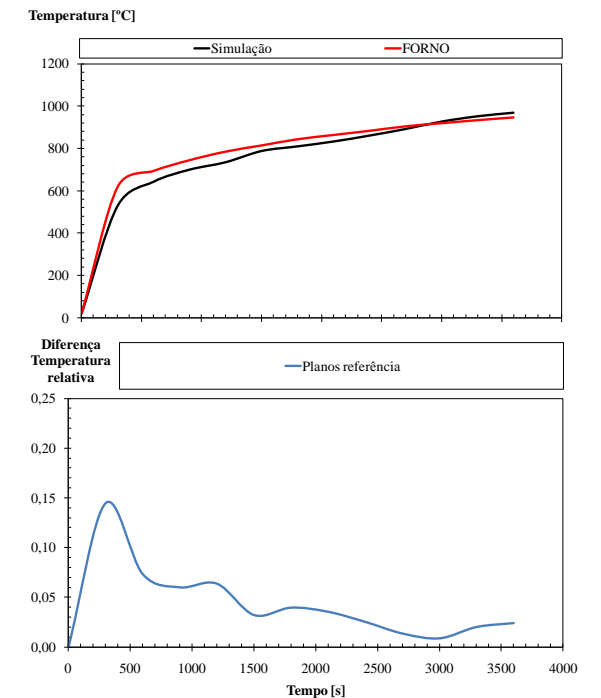
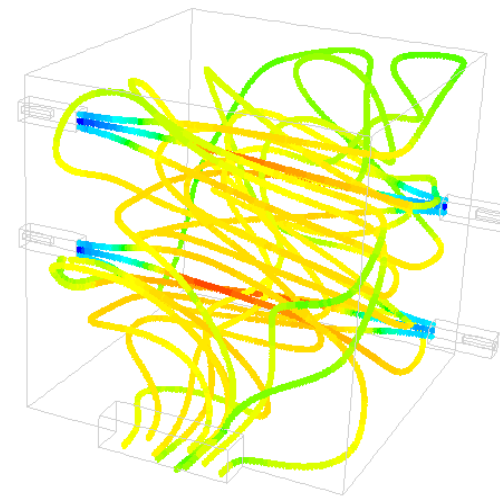
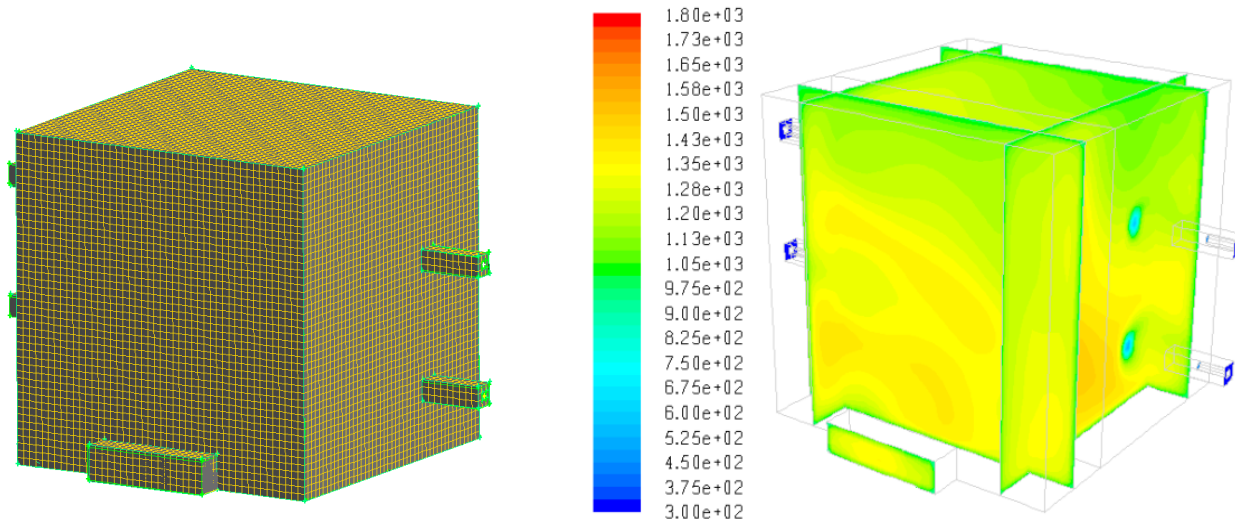
- Objetivo: verificação do campo de temperatura no interior de um forno com curva ISO834 (IPB).
- 3 Ensaios experimentais: Medição da temperatura em 16 pontos (termopares de placa).
- O forno em análise cumpre os requisitos definidos na norma EN 1363-1 (desvios máximos admissíveis da temperatura), no pressuposto de uma distribuição de temperatura quase uniforme.
- Foram definidos 4 planos de medição (X150, X850, Z150 e Z850).



ANÁLISE TÉRMICA DE UM FORNO DE RESISTÊNCIA AO FOGO - NUMÉRICO



- Modelo numérico: 125840 volumes finitos de fluido (20 mm³) FLUENT.
- Resolução das equações diferenciais de:
 - Conservação da massa, momento e energia.
 - Utilizando modelos de dissipação de vórtices, EDM, para a combustão da mistura de propano com ar.
 - Modelo viscoso “K-Epsilon” com duas equações.
 - Modelo de radiação de superfícies, assumindo uma emissividade paredes do forno (0.7).

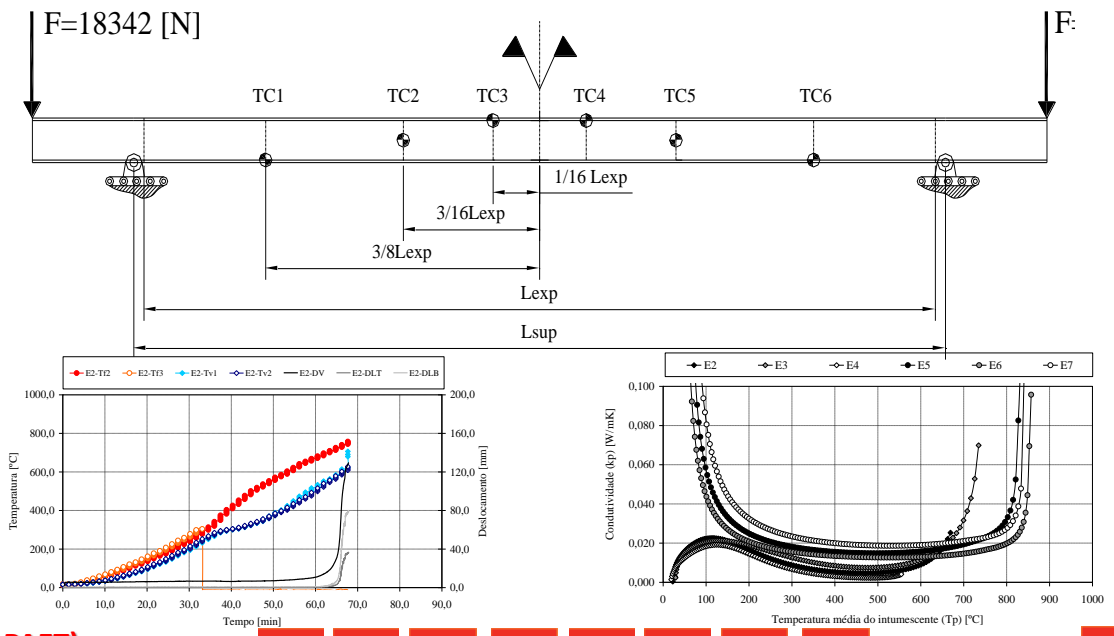


FLEXÃO DE VIGAS PROTEGIDAS COM TINTA INTUMESCENTE A TEMPERATURAS ELEVADAS- EXPERIMENTAL

- 7 ensaios de flexão em 4 pontos de vigas submetidas a temperaturas elevadas, protegidos com tinta intumescente.
- Método de ensaio: Carga mecânica constante e posterior solicitação térmica 800 [°C/h].
- Instrumentação das vigas: De acordo com norma UNE 23820.
- UNE 23820: Permite determinar o valor da condutividade térmica efetiva do material de proteção.
 - A condutividade térmica do intumescente é aprox. constante no intervalo de 300 a 750 °C.

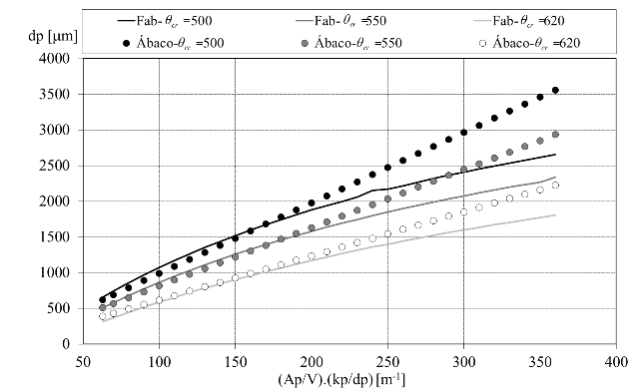
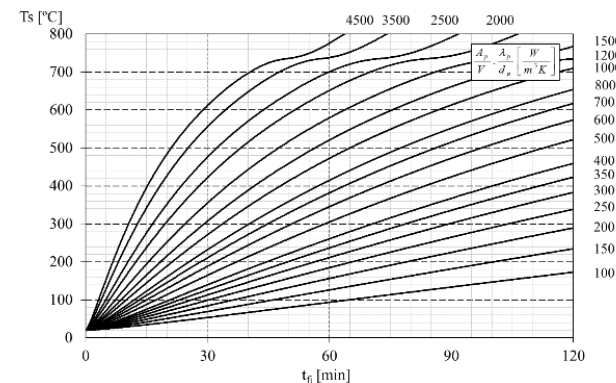
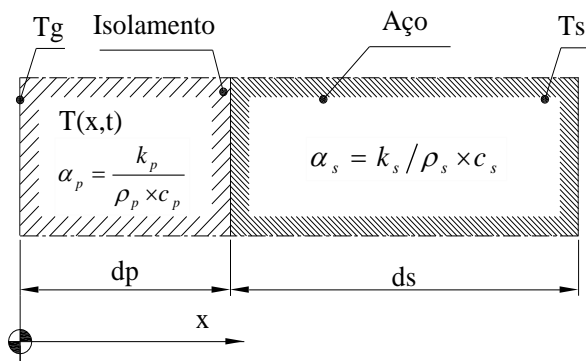


Ensaio	Secção 1	Secção 2	Secção 3	Secção 4	Secção 5	Média
E1	NP	NP	NP	NP	NP	NP
E2	440,50	468,38	435,75	418,88	408,00	434,30
E3	430,50	492,00	493,88	504,63	448,38	473,88
E4	487,25	544,63	491,13	502,38	458,38	496,75
E5	1265,25	1327,47	1348,81	1363,06	1291,56	1319,23
E6	1465,72	1506,41	1553,88	1558,47	1522,09	1521,31
E7	1410,56	1463,44	1488,94	1407,59	1434,38	1440,98



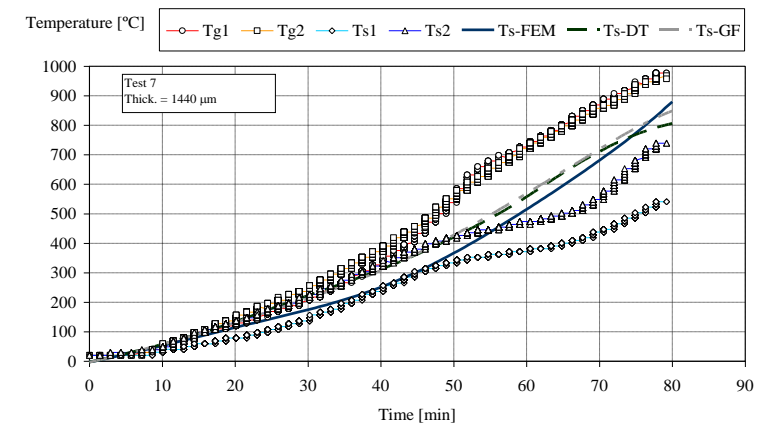
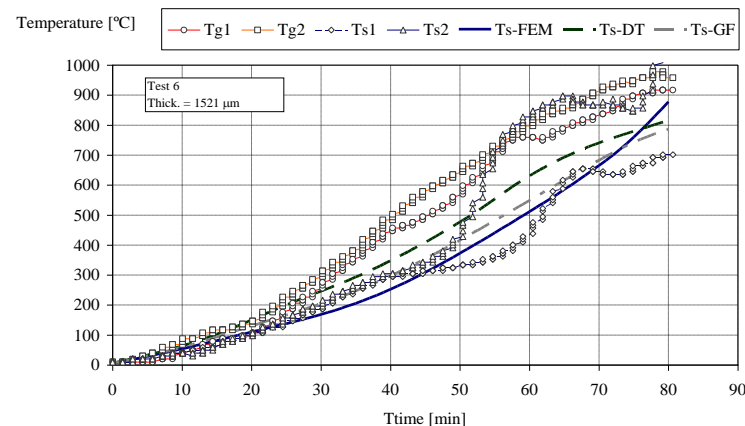
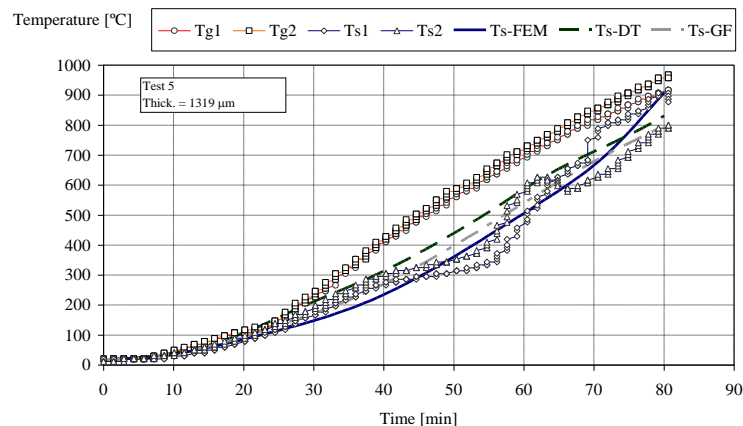
FLEXÃO DE VIGAS PROTEGIDAS COM TINTA INTUMESCENTE A TEMPERATURAS ELEVADAS- NUMÉRICO

- Modelo unidimensional de transferência de calor, com método de solução não linear:
 - Resolução da equação da energia no domínio da tinta intumescente, considerando a fronteira fixa, sem alteração da espessura (dp).
- Simplificação: aplicação da condição fronteira de Dirichlet na camada do intumescente em contacto com os gases (Tg).
- A condutibilidade da tinta intumescente, em cada instante, foi determinada para a temperatura média da proteção, entre Tg e Ts.
- Ábaco: Evolução da temperatura no aço em função do tempo de resistência ao fogo para diferentes valores do fator de massividade modificado.
- Gráfico: Comparação da proteção recomendada pelo fabricante e pelo modelo unidimensional.



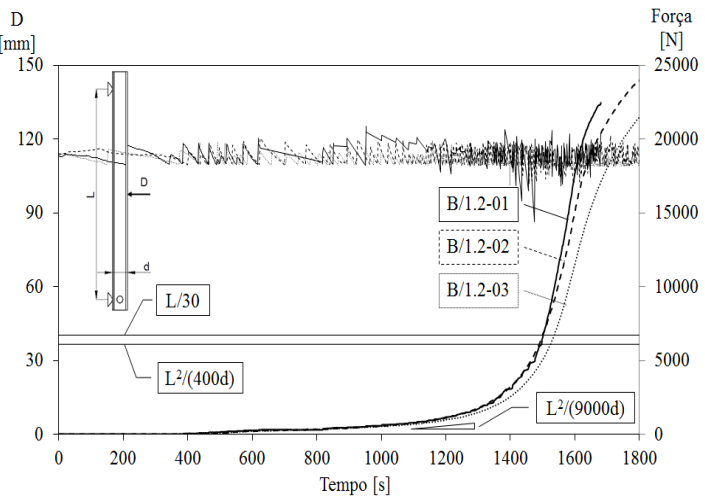
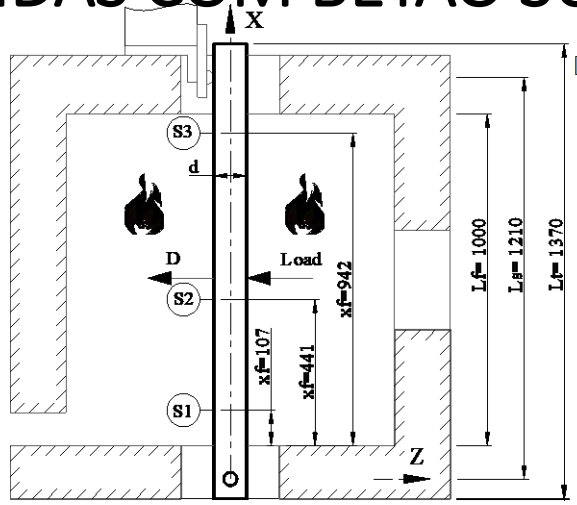
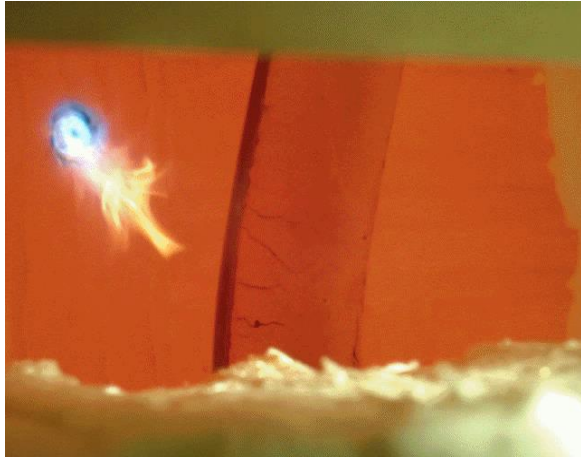
FLEXÃO DE VIGAS PROTEGIDAS COM TINTA INTUMESCENTE A TEMPERATURAS ELEVADAS- OUTROS MODELOS NUMÉRICOS - VALIDAÇÃO

- Objetivo: Comparação da temperatura do aço, determinada pelos resultados experimentais, resultados analíticos e numéricos.
- Propriedade térmica do material do intumescente: Variação da condutibilidade térmica efetiva apresentada.
- modelo numérico 1: Considera uma solução incremental no tempo, baseado no método das diferenças finitas para a frente.
- Modelo numérico 2: Solução bidimensional da equação da energia, baseado no método dos elementos finitos realizada utilizando a caixa PDEtool do software Matlab.



FLEXÃO DE VIGAS PARCIALMENTE EMBEBIDAS COM BETÃO SUBMETIDAS AO FOGO-EXPERIMENTAL

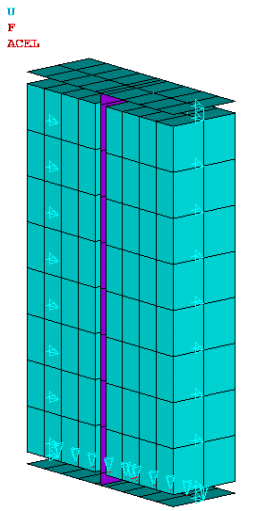
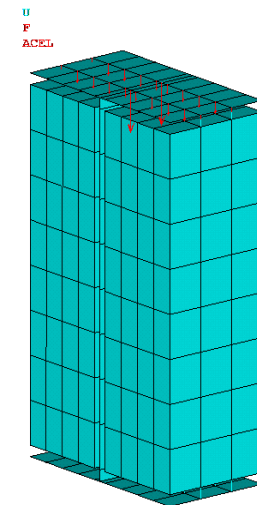
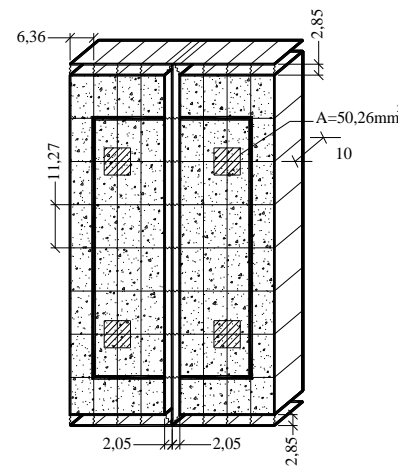
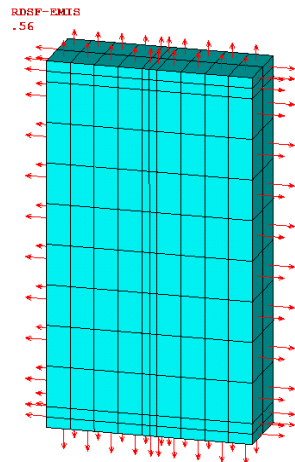
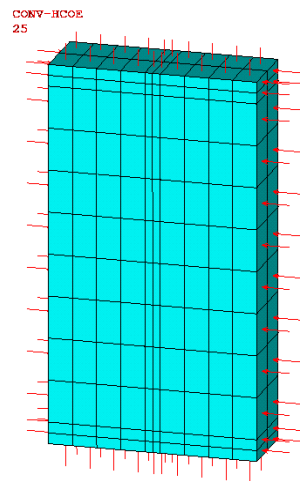
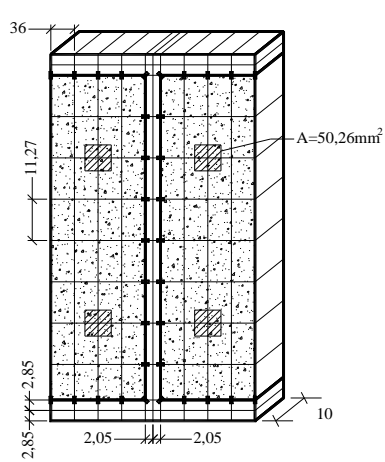
- 15 ensaios de flexão em 3 pontos.
- É avaliada a evolução da temperatura em três secções distintas e determinado o valor da temperatura crítica.
- Ensaios de resistência ao fogo ISO834:
 - Carga mecânica constante: 37, 56 e 74% do momento plástico da secção.
- Solução no domínio do tempo e temperatura.



Series	Id	Estribos W (soldados) NW (Não soldados)	Carga térmica	Nível de carga [%M _{pl}]	Imperfeição máxima [mm]	Imperfeição máxima [-]	dD/dt= L ² /9000d [s]	D= L ² /400d [s]	D= L/30 [s]	R [min]	T cri [°C]	Modo de deformada
1	B/1.2-01				1.0	L/1210	1296	1498	1501	25	585.3	Plastic hinge
	B/1.2-02	W	ISO834	37%	1.0	L/1210	1220	1489	1500	25	595.2	Plastic hinge
	B/1.2-03				1.0	L/1210	1311	1523	1537	25	596.4	Plastic hinge
2	B/1.2-04				1.0	L/1210	806	1090	1104	18	488.3	LT Buckling
	B/1.2-05	W	ISO834	74%	0.0	-	865	1123	1134	18	477.6	LT Buckling
	B/1.2-06				0.5	L/2420	888	1136	1148	19	489.5	LT Buckling
3	B/1.2-07				1.0	L/1210	889	1118	1129	18	489.4	LT Buckling
	B/1.2-08	NW	ISO834	74%	1.5	L/807	804	1084	1095	18	501.7	LT Buckling
	B/1.2-09				0.5	L/2420	806	1085	1098	18	475.8	LT Buckling
4	B/1.2-10				1.0	L/1210	1016	1211	1226	21	529.3	Plastic hinge
	B/1.2-11	W	ISO834	56%	1.0	L/1210	1017	1234	1244	20	531.5	Plastic hinge
	B/1.2-12				1.5	L/807	1016	1260	1270	21	542.9	Plastic hinge
5	B/1.2-13				1.0	L/1210						
	B/1.2-14	W	20°C	Incre.	0.0	-						
	B/1.2-15				1.0	L/1210						

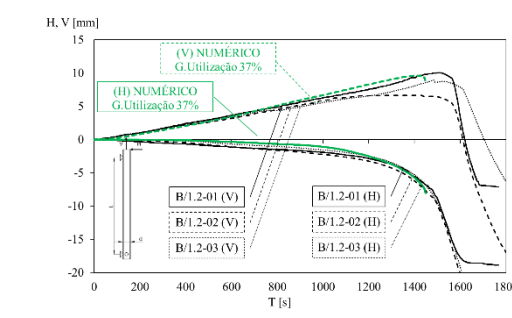
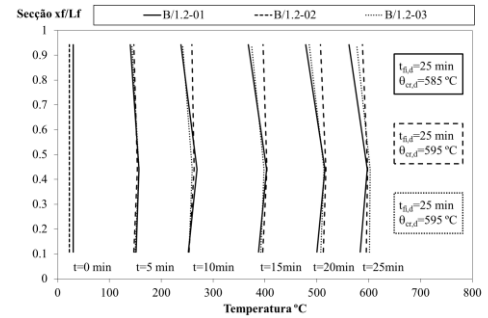
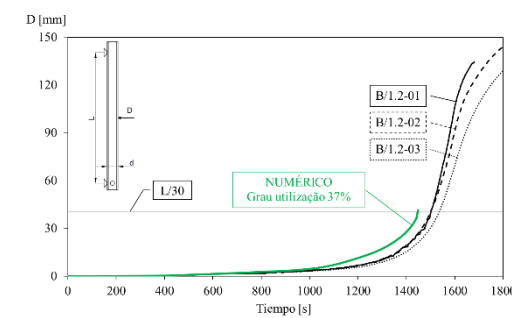
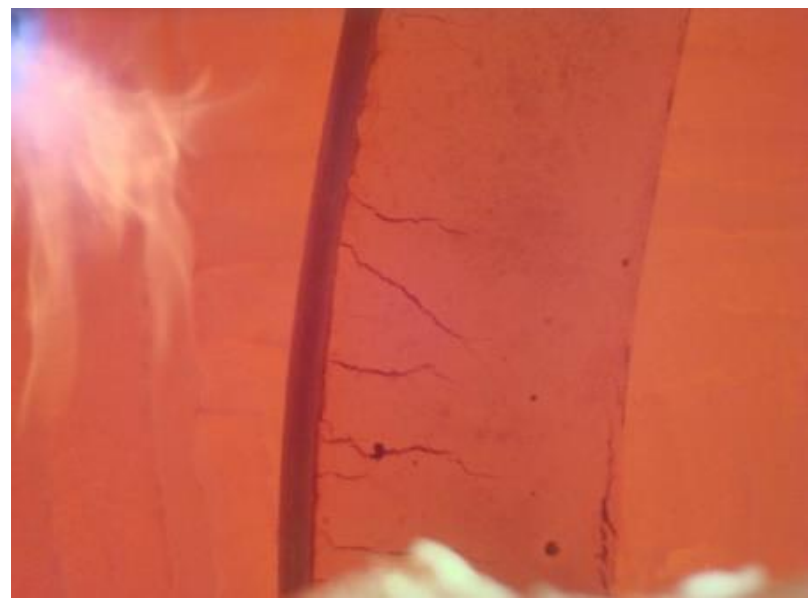
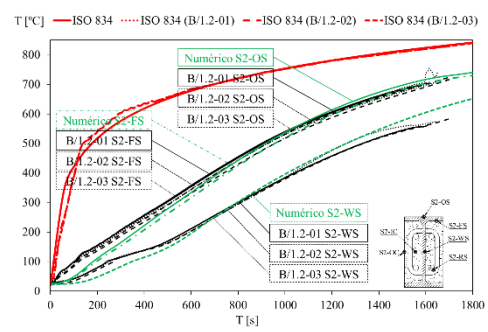
FLEXÃO DE VIGAS PARCIALMENTE EMBEBIDAS COM BETÃO SUBMETIDAS AO FOGO – VALIDAÇÃO NUMÉRICA

- Modelo térmico ANSYS: elementos SOLID70, COMBINE39 e LINK33.
 - O elemento de contacto (COMBINE39) não possui massa nem capacidade para armazenar calor, servindo apenas para simular uma resistência térmica de contacto entre os dois materiais. Neste modelo foi considerado um valor de condutância igual a 67 [kW/m²].
- Modelo mecânico ANSYS: elementos SHELL181, SOLID65, COMBINE39 e LINK8.



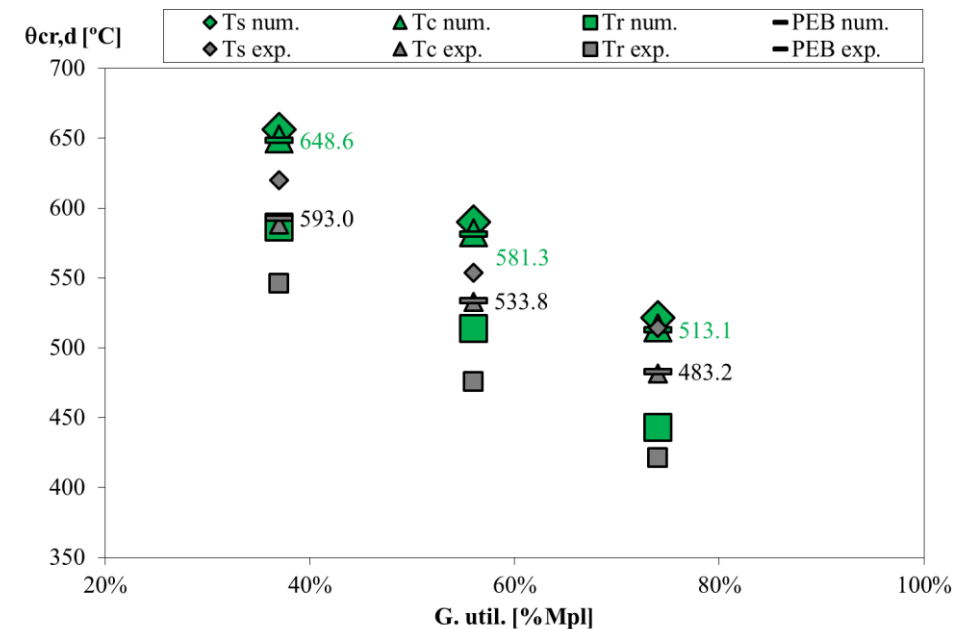
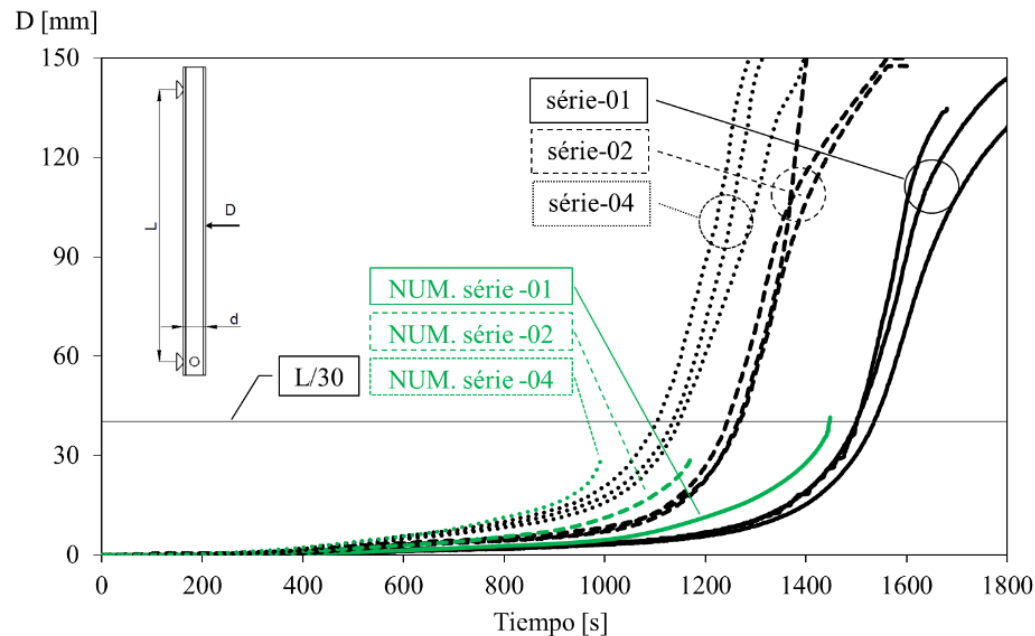
FLEXÃO DE VIGAS PARCIALMENTE EMBEBIDAS COM BETÃO SUBMETIDAS AO FOGO – EXPERIMENTAL VS NUMÉRICO

- A máxima diferença de temperatura crítica foi inferior a 3.2, 5.1, 6.3 e 11.2%, séries 1-4, respetivamente.
- A variação da temperatura no comprimento do elemento não é muito significativa.
- A temperatura registada em cada secção não é uniforme:
 - Existe uma diferença de 150 °C entre os valores medidos no exterior e interior das secção.
 - A oscilação inicial na evolução da temperatura é provocada pelo nível de humidade existente no betão.



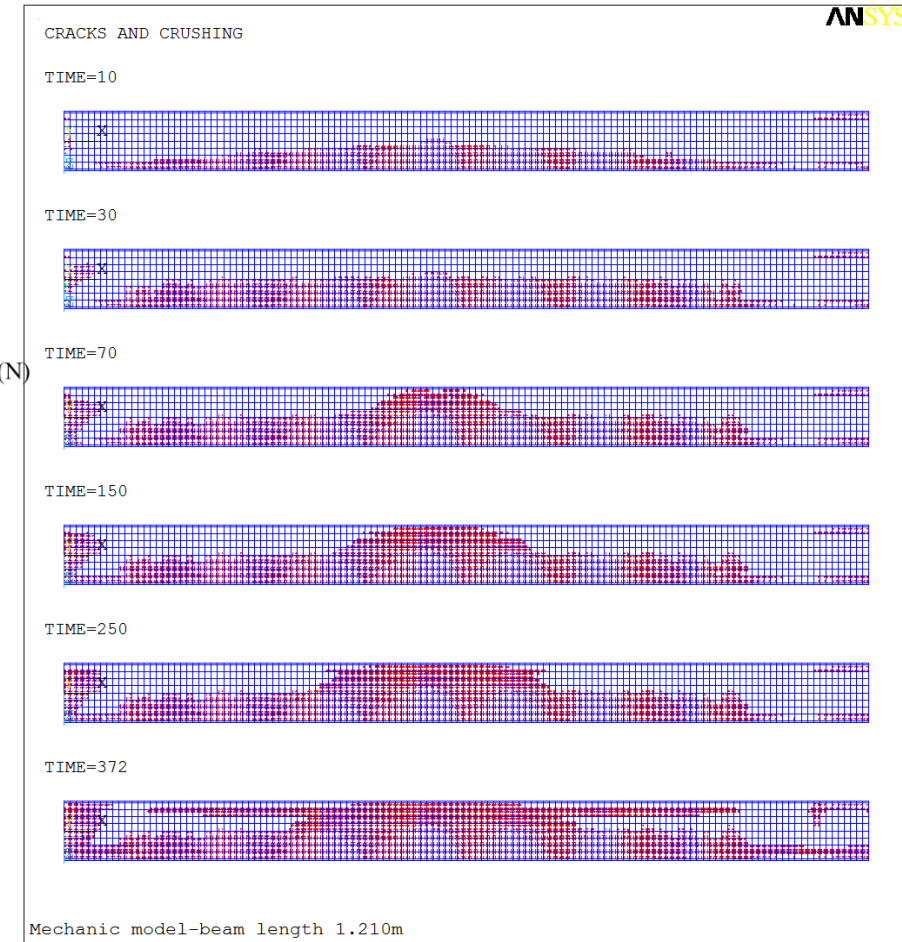
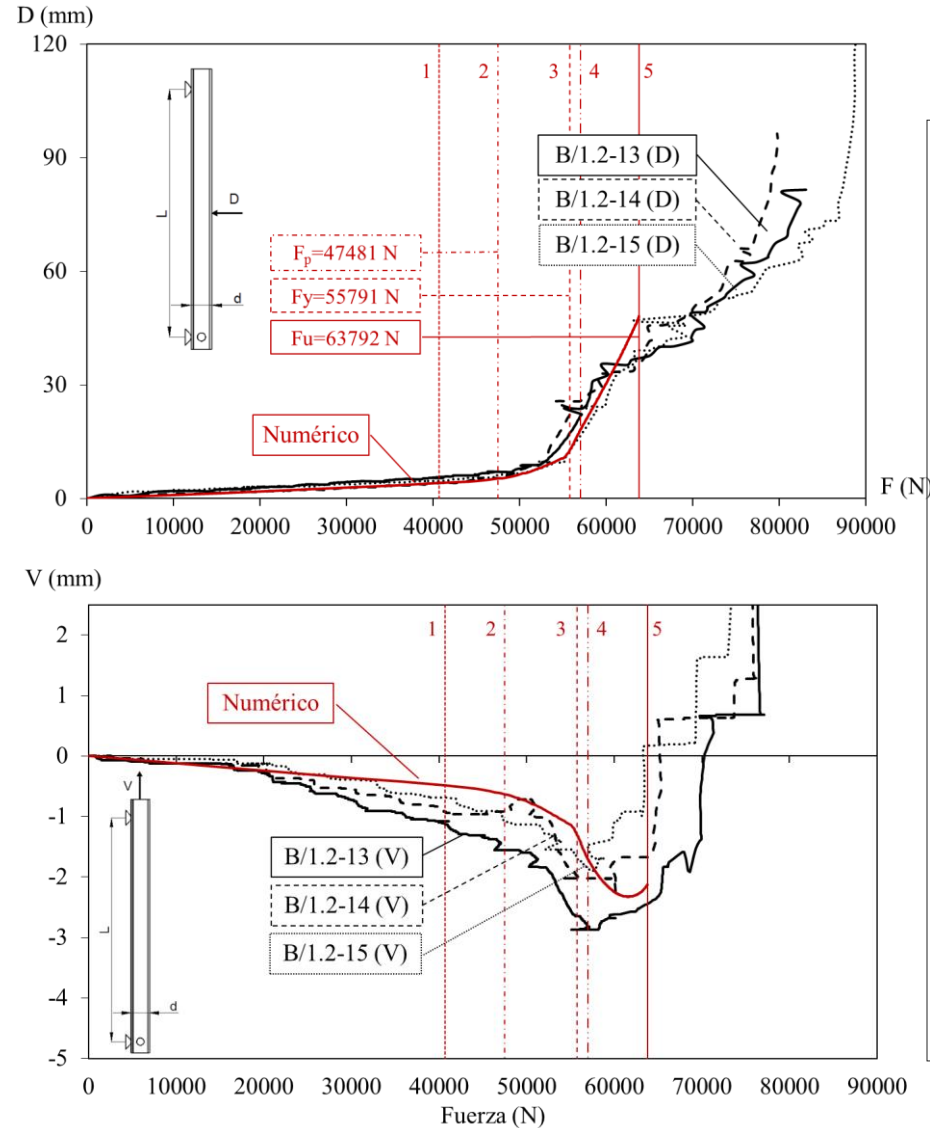
FLEXÃO DE VIGAS PARCIALMENTE EMBEBIDAS COM BETÃO SUBMETIDAS AO FOGO – VALIDAÇÃO NUMÉRICA

- Comparação dos valores médios das temperaturas críticas dos materiais e dos elementos, entre os resultados numéricos e experimentais, para as séries 1,2 e 4.
- A temperatura crítica do reforço continua a apresentar o menor valor da secção.
- A diferença da temperatura crítica, entre os resultados numéricos e experimentais, para os diferentes graus de utilização (37, 56, 74%), é inferior a 3.8, 0.7 e 5.0%, respetivamente.



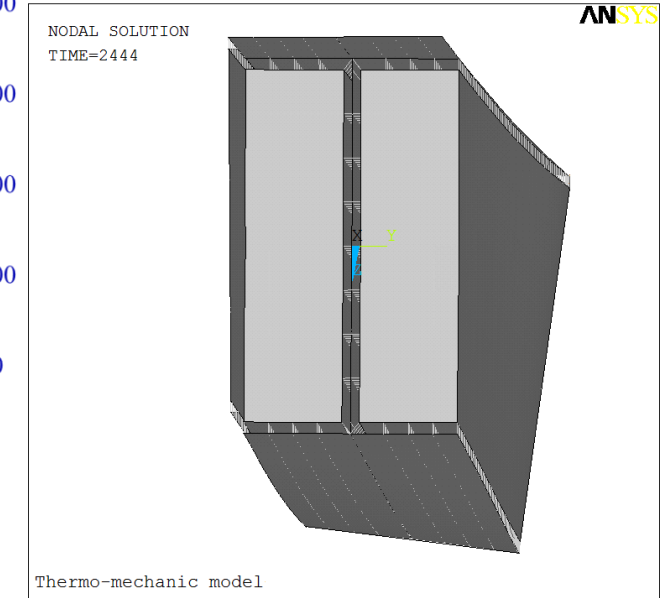
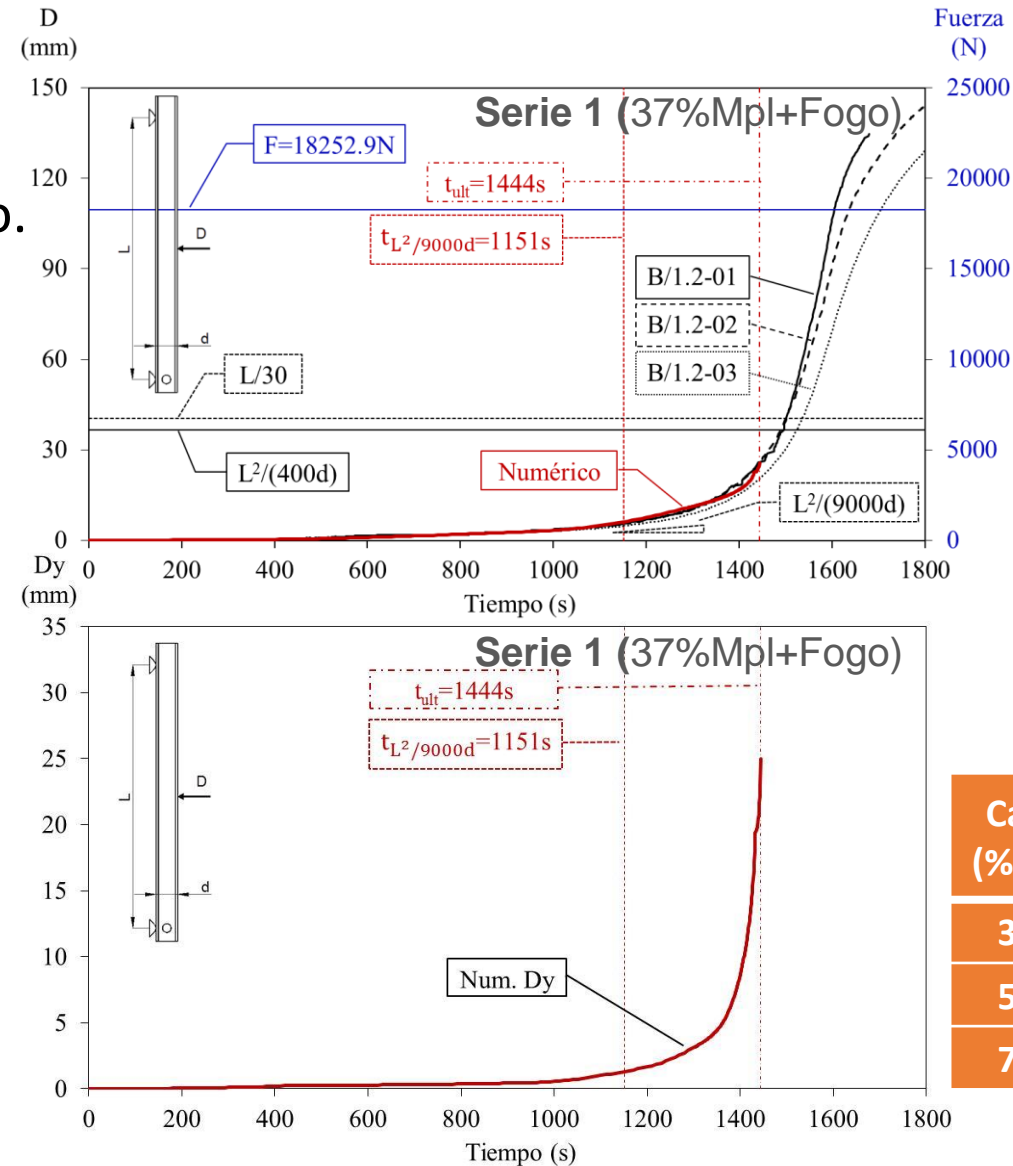
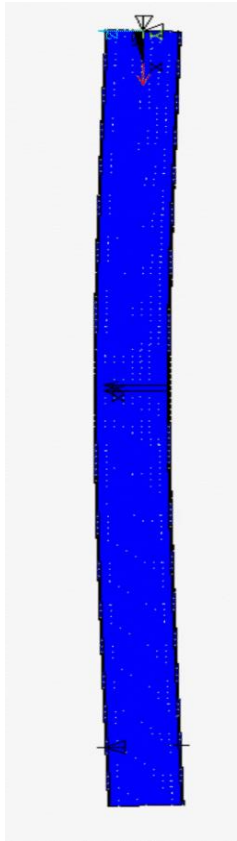
FLEXÃO DE VIGAS PARCIALMENTE EMBEBIDAS COM BETÃO SUBMETIDAS AO FOGO – VALIDAÇÃO NUMÉRICA

- Ensaio a 20°C
- Previsão do dano progressivo no betão.



FLEXÃO DE VIGAS PARCIALMENTE EMBEBIDAS COM BETÃO SUBMETIDAS AO FOGO – VALIDAÇÃO NUMÉRICA

- Ensaios com fogo.
- Previsão da resistência ao fogo.



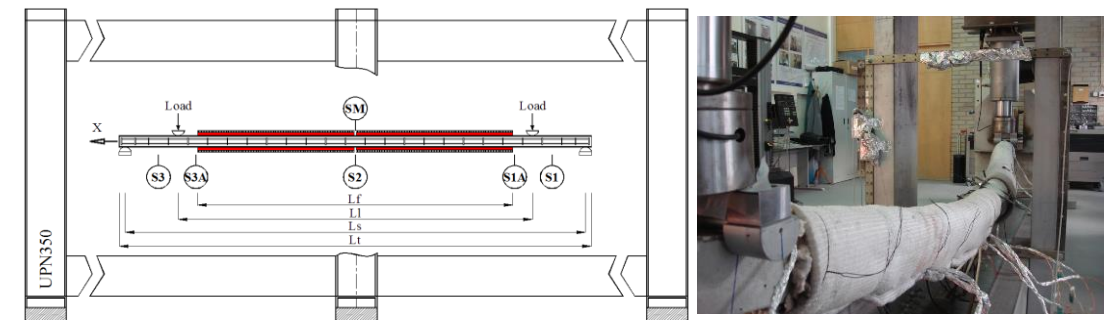
Carga (%Mpl)	RF (min)	Instante de tempo (s)	
		$dD/dt=L^2/9000d$	último
37%	24	1151	1444
56%	19	979	1146
74%	15	740	908



FLEXÃO DE VIGAS PARCIALMENTE EMBEBIDAS COM BETÃO SUBMETIDAS A TEMPERATURAS ELEVADAS - EXPERIMENTAL

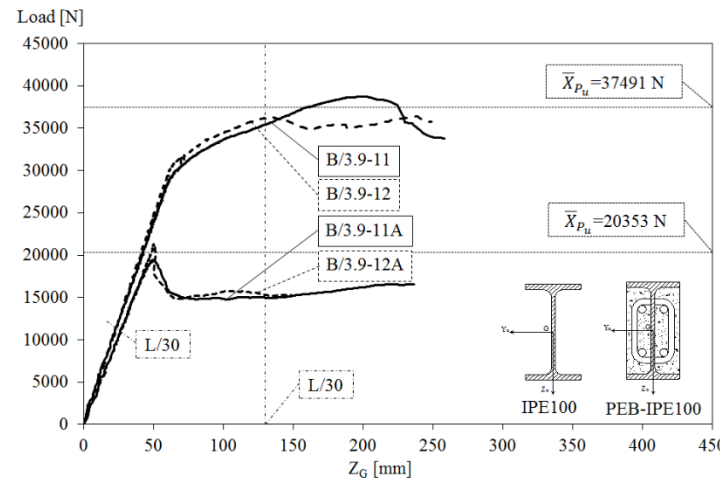
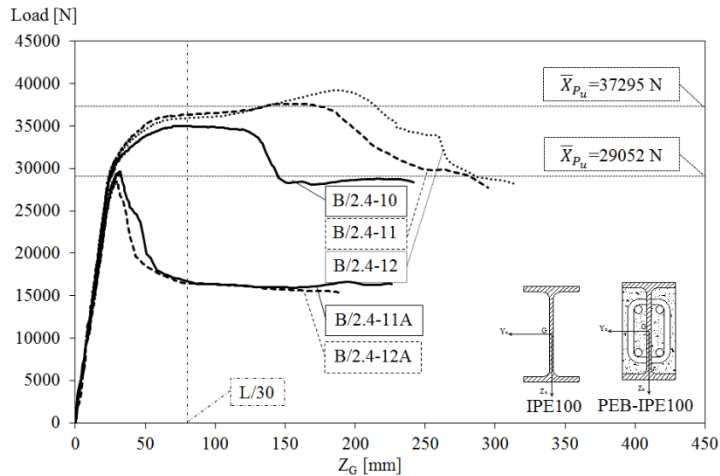
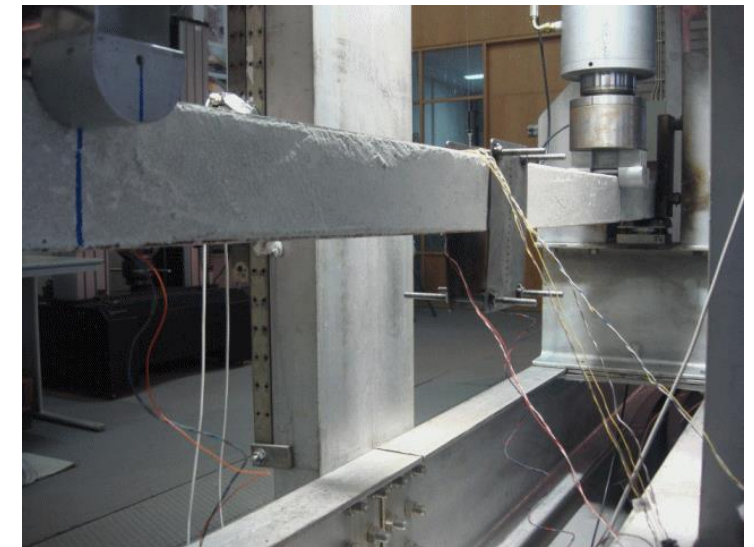
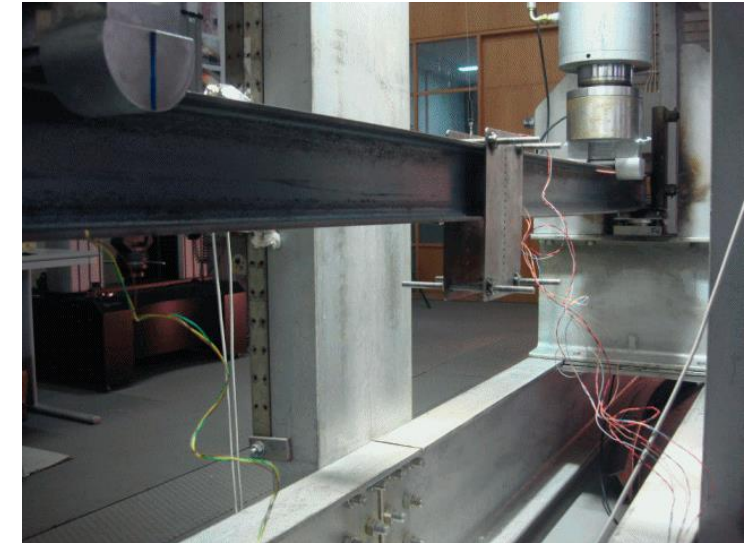
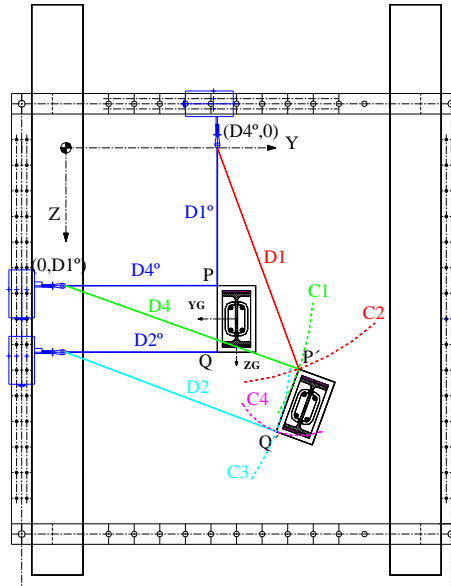
- 27 vigas parcialmente embebidas com betão, utilizando a configuração de ensaio de flexão em 4 pontos.
- Estes elementos foram divididos em dez séries.
- Foram considerados dois ou três testes para garantir a repetibilidade.
- Os ensaios realizados à temperatura ambiente utilizaram pequenos incrementos de carga para determinação da resistência mecânica.
- Os ensaios realizados a temperaturas elevadas foram desenvolvidos em duas etapas (aquecimento 800 °C/h e posterior incremento de força).

Series	ID	Ls [m]	estribos [W/NW]	Temp. [°C]	Max. Imp. Abs. [mm]	F-Mpl [N]	Fp [N]	Fy [N]	F L30 [N]	Fu [N]
	B/2.4-01				2		11910	18890	24932	38864
1	B/2.4-02	2.4	W	400	2	32013	13627	21760	26583	31533
	B/2.4-03				2		12540	19920	24878	33568
	B/2.4-04				1		24770	31430	34060	36875
2	B/2.4-05	2.4	W	200	2	32388	26030	30350	32953	39042
	B/2.4-06				1		26580	31380	33930	34712
	B/2.4-07				1		13050	20610	24898	29000
3	B/2.4-08	2.4	NW	400	1	32013	12960	19270	25135	40861
	B/2.4-09				1		11920	20850	25722	33246
	B/2.4-10				2		27050	34966	35000	35015
4	B/2.4-11	2.4	W	room	0.5	32584	25960	35410	36360	37624
	B/2.4-12				3		26600	34600	35962	39246
5	B/2.4-11A	2.4	-	room	1	26273	16107	-	-	29627
	B/2.4-12A				2		15530	-	-	28477
	B/3.9-01				2		11190	16370	22126	30204
6	B/3.9-02	3.9	W	400	5	32013	11920	16360	22715	27290
	B/3.9-03				3		11700	14850	22573	28337
	B/3.9-04				2		4110	9620	12641	22456
7	B/3.9-05	3.9	W	600	2	14949	4360	9750	12996	21662
	B/3.9-06				5		4090	9110	12025	22770
	B/3.9-07				5		11170	15260	22665	23591
8	B/3.9-08	3.9	NW	400	5	32013	13160	16540	24237	32642
	B/3.9-09				2		10720	15400	23200	24815
9	B/3.9-11	3.9	W	room	2	32584	26500	31350	35405	38718
	B/3.9-12				5		29020	32010	36159	36264
10	B/3.9-11A	3.9	-	room	1	26273	15023	-	-	19436
	B/3.9-12A				3		15331	-	-	21272



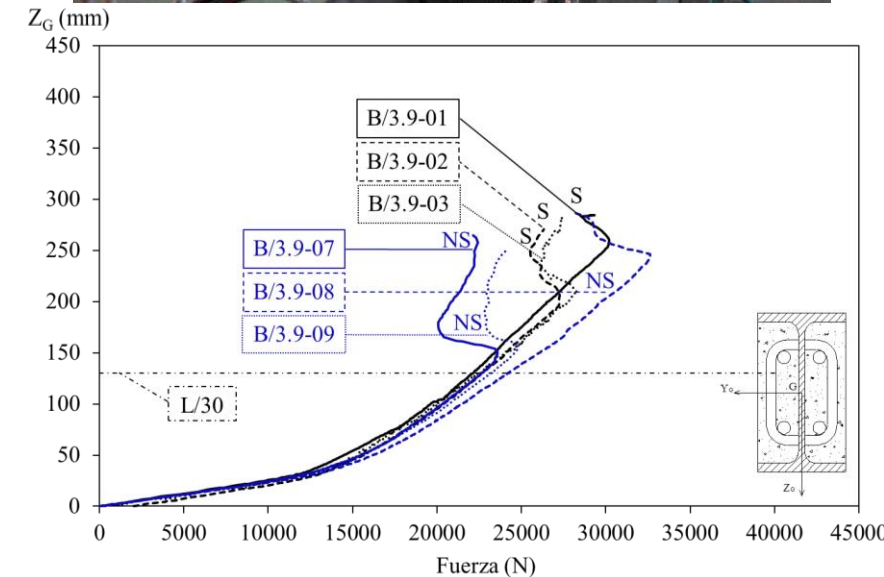
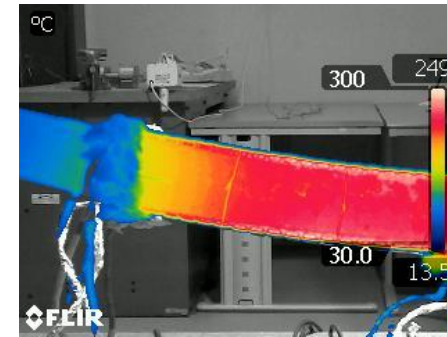
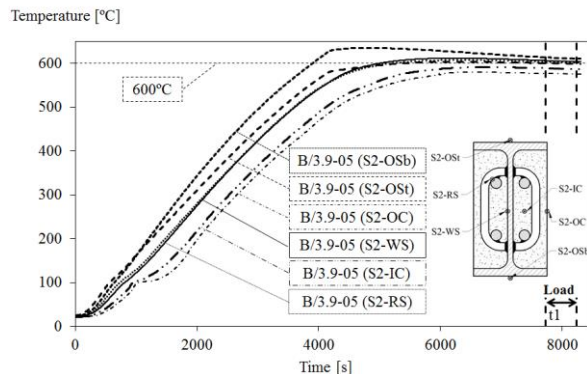
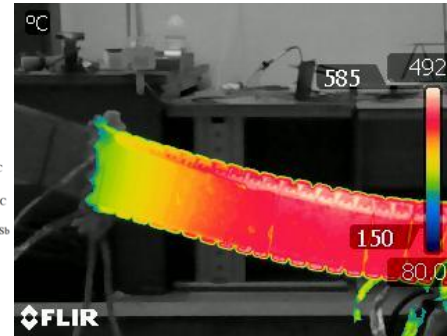
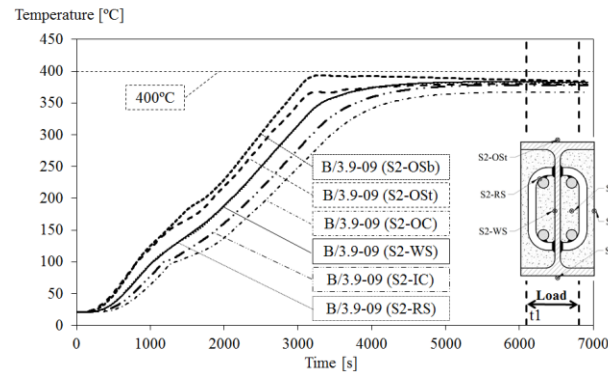
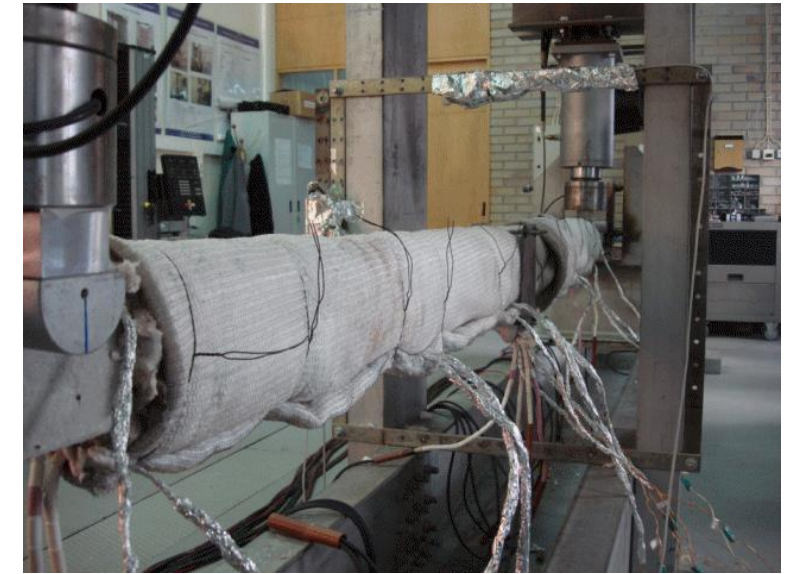
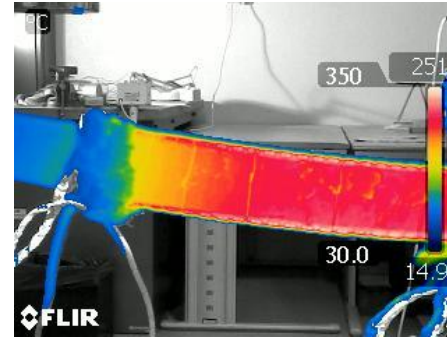
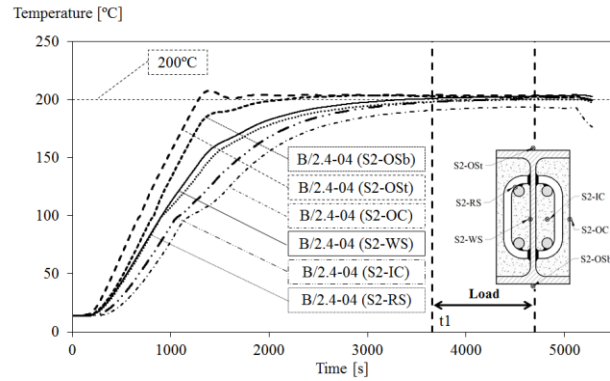
FLEXÃO DE VIGAS PARCIALMENTE EMBEBIDAS COM BETÃO SUBMETIDAS A TEMPERATURAS ELEVADAS - EXPERIMENTAL

- Comparação do comportamento à temperatura ambiente entre a viga metálica e a viga parcialmente embebida com betão.
 - Maior capacidade resistente à flexão
 - Estado limite último (ambos casos): ELT



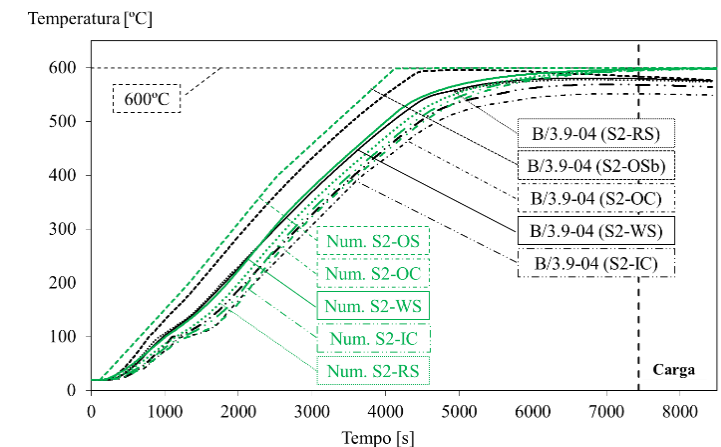
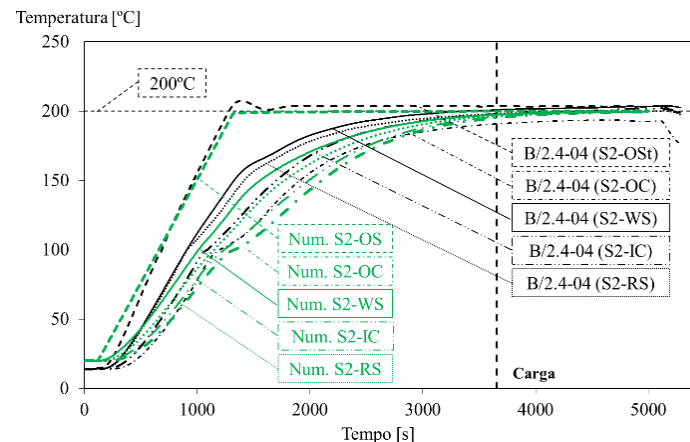
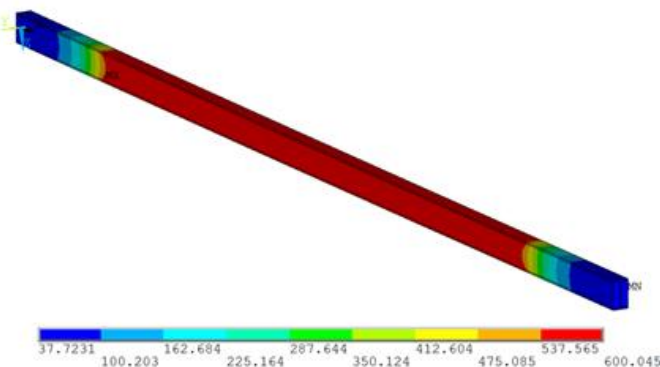
FLEXÃO DE VIGAS PARCIALMENTE EMBEBIDAS COM BETÃO SUBMETIDAS A TEMPERATURAS ELEVADAS - EXPERIMENTAL

- Ensaio de VPE a 3 níveis de temperatura (200, 400 e 600 °C).
- Carga térmica estabilizada (ver gradiente de temperatura nos apoios).
- Carga mecânica incremental.



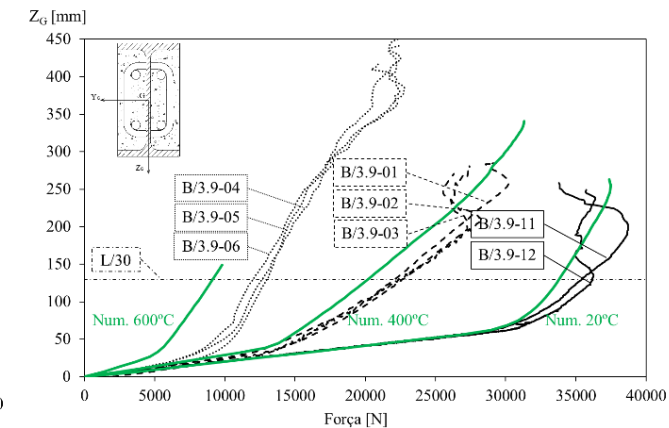
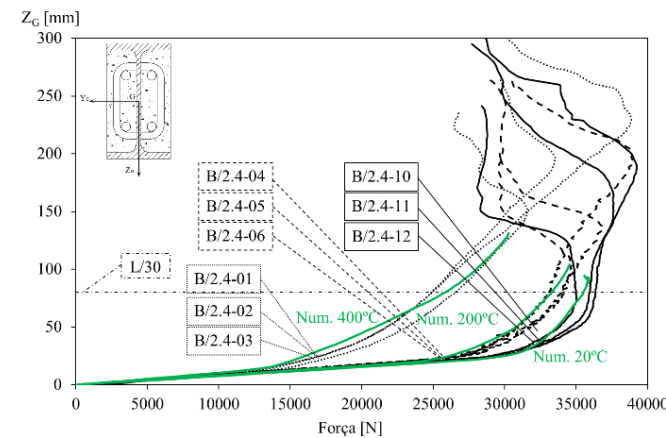
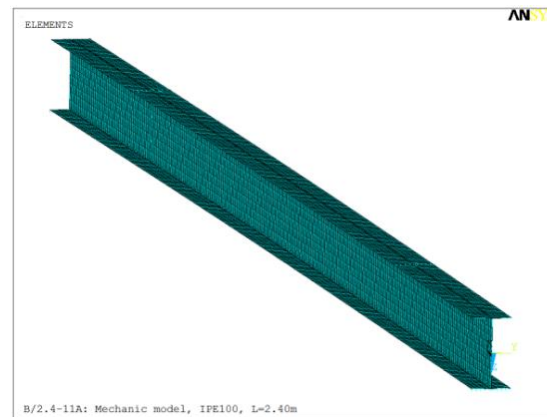
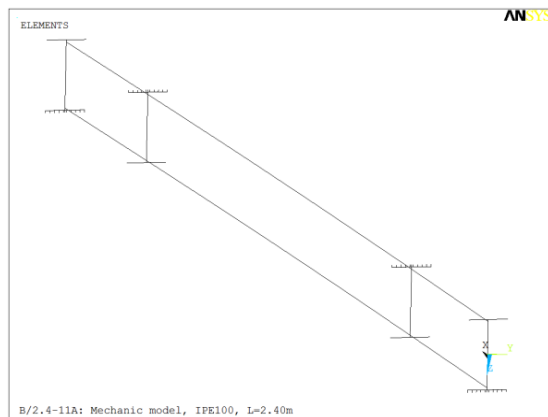
VIGAS PARCIALMENTE EMBEBIDAS COM BETÃO SUJEITAS A TEMPERATURAS ELEVADAS – EXPERIMENTAL VS NUMÉRICO

- Análise térmica: Permite determinar as temperaturas nodais durante a fase de carregamento mecânico.
- O aquecimento das vigas é modelado pela imposição de temperaturas nos nós externos dos elementos de casca do perfil.
- O isolamento é simulado pela imposição de condições adiabáticas nas superfícies laterais, considerando apenas o processo de aquecimento de condução.
- Neste modelo é desprezada a perda de calor que se verifica através do isolamento e a perda de calor pelas partes não isoladas.



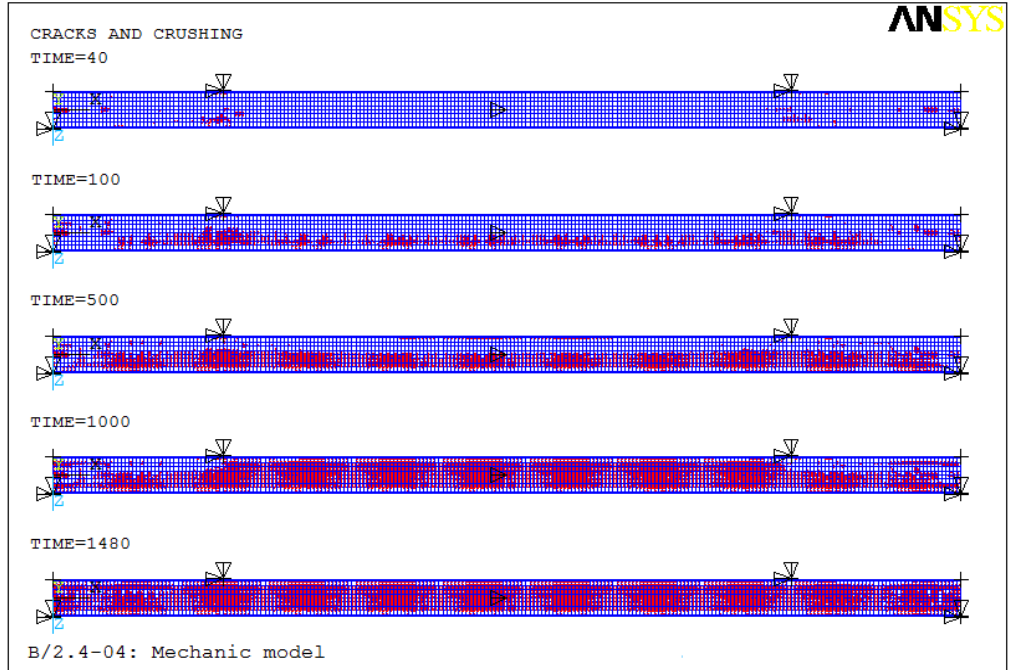
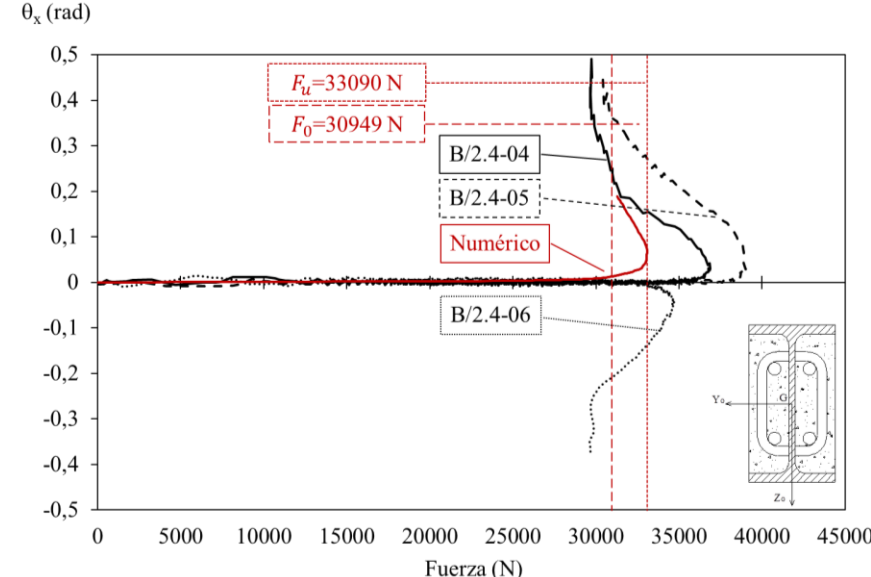
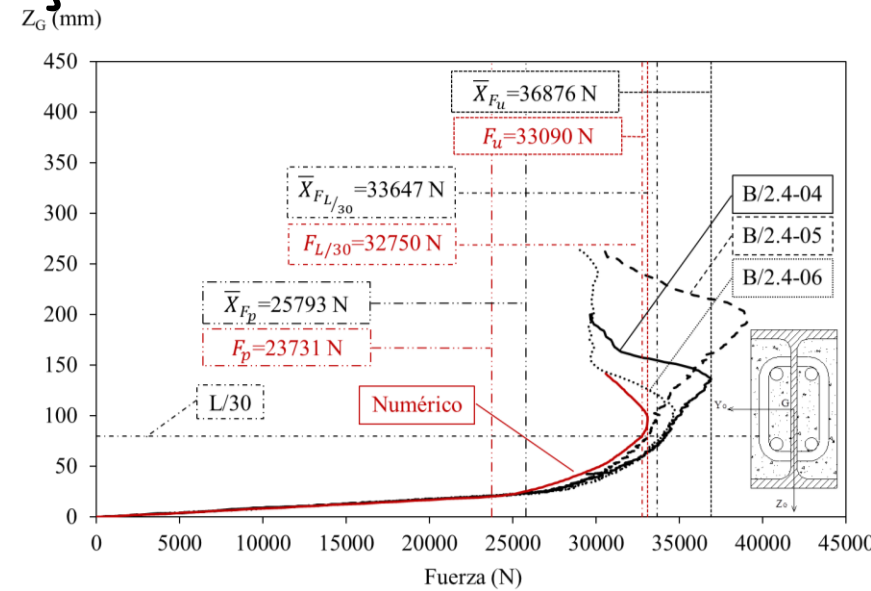
VIGAS PARCIALMENTE EMBEBIDAS COM BETÃO SUJEITAS A TEMPERATURAS ELEVADAS – EXPERIMENTAL VS NUMÉRICO

- Modelo mecânico: Modelo semelhante ao anterior estudo de fogo.
- Os elementos de casca são reforçados por elementos longitudinais do tipo viga BEAM188 para simular o aumento de espessura nas zonas de concordância entre a alma e os banzos e o mesmo tipo de elementos nos apoios e nos pontos de aplicação da carga para evitar fenómenos de distorção da secção.
- O modelo dos apoios: elementos de contato CONTAC52, com coeficiente de atrito 0.05 (massa lubrificante entre o aço do apoio e o aço do perfil).
- Os modelos de carga: elementos de contato CONTAC52, com um coeficiente de atrito de 0.04 (superfícies com teflon).



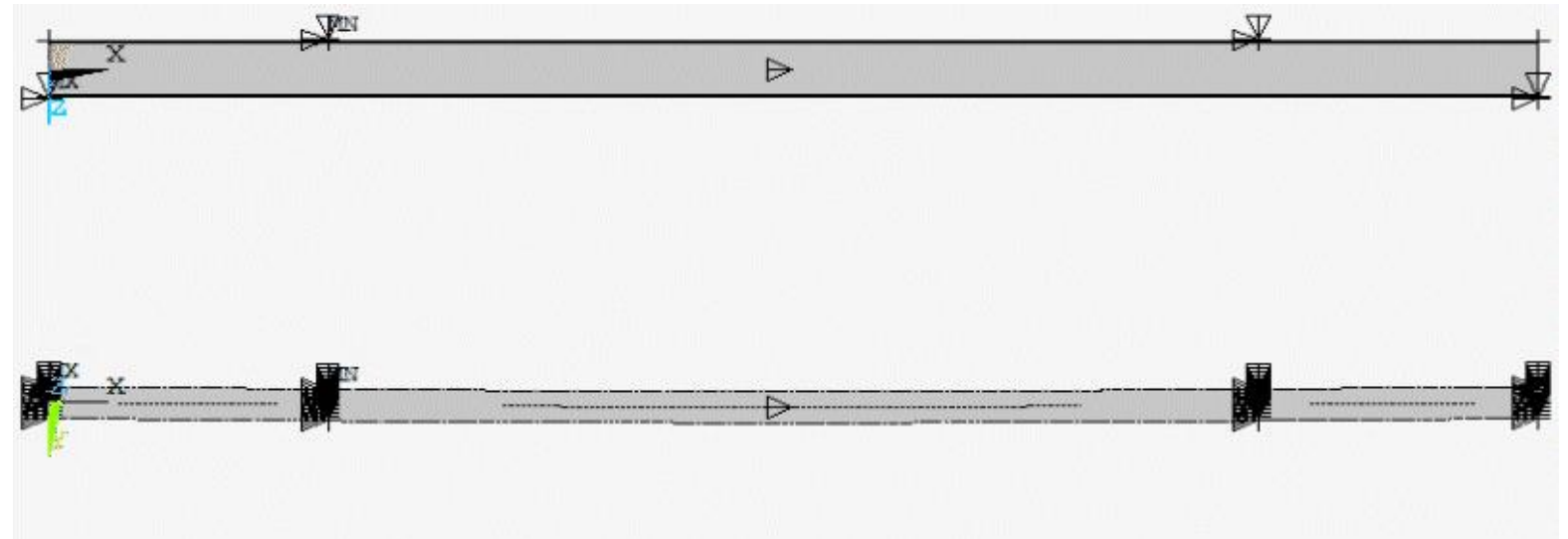
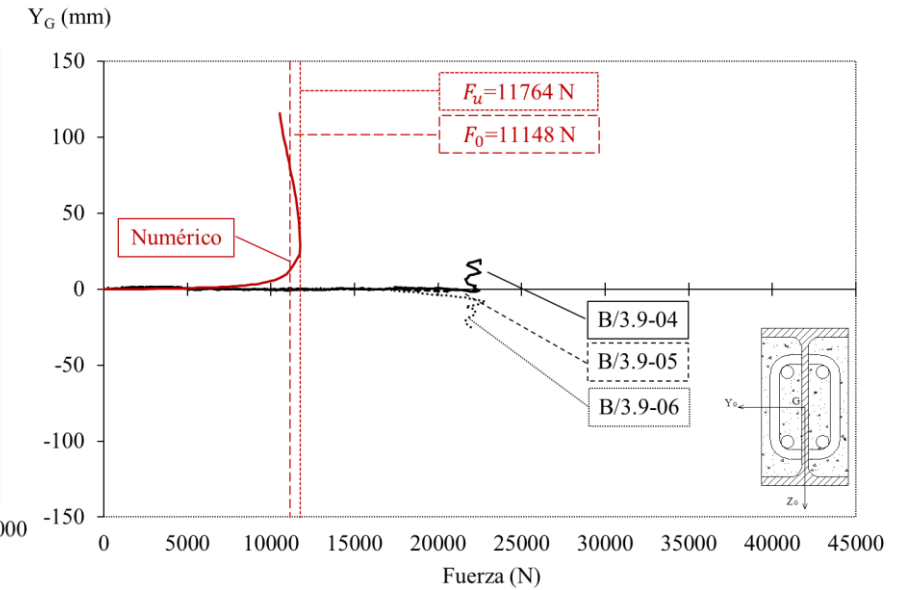
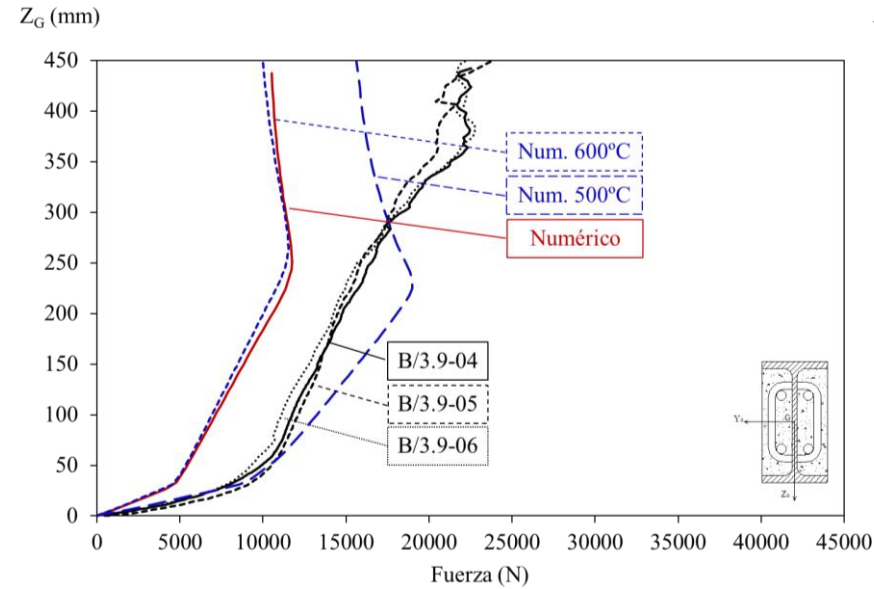
VIGAS PARCIALMENTE EMBEBIDAS COM BETÃO SUJEITAS A TEMPERATURAS ELEVADAS – VALIDAÇÃO NUMÉRICA

- Ensaios a 200°C
- Previsão do dano progressivo no betão.



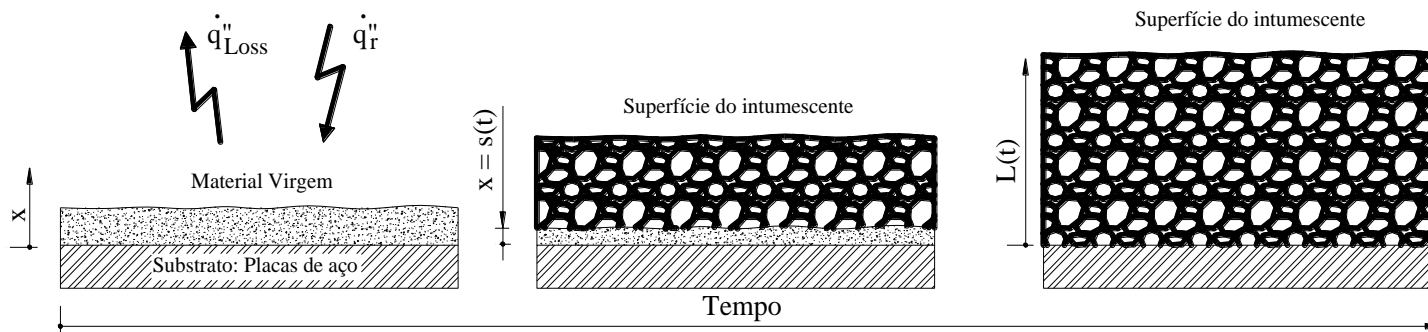
VIGAS PARCIALMENTE EMBEBIDAS COM BETÃO SUJEITAS A TEMPERATURAS ELEVADAS – VALIDAÇÃO NUMÉRICA

- Ensaio a 600°C (efeito da temperatura é significativo na simulação).
- Previsão do estado limite último.



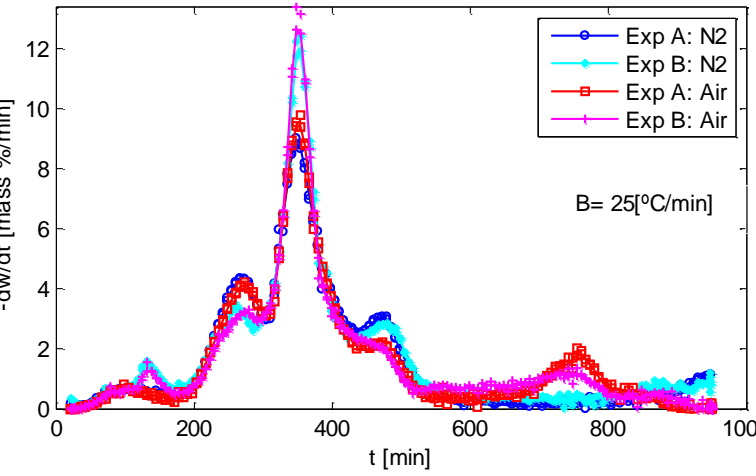
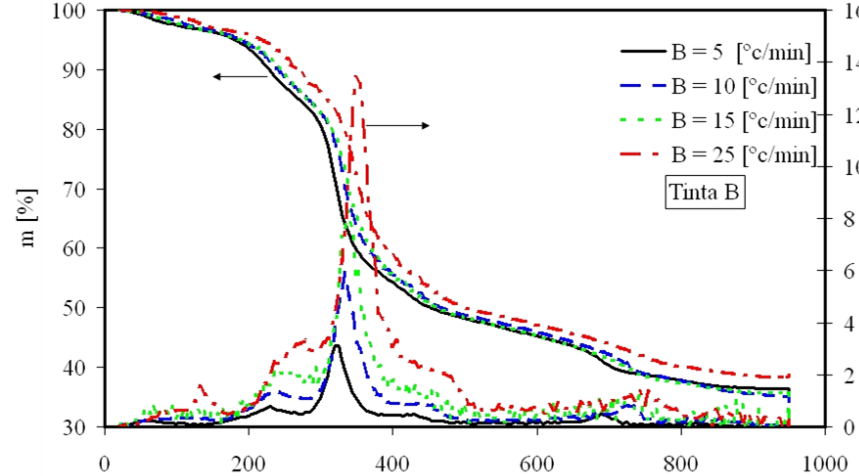
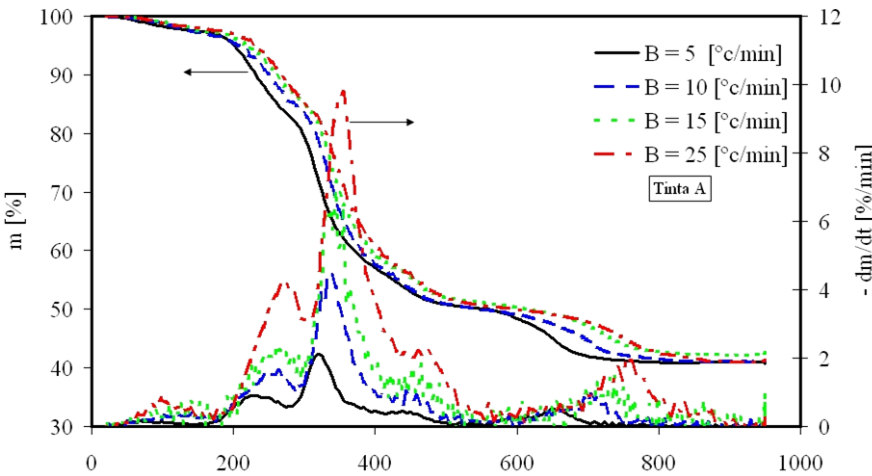
REAÇÃO AO FOGO DE PLACAS DE TINTA INTUMESCENTE

- Ensaios no forno de resistência e num calorímetro de cone:
 - para avaliação do comportamento térmico e físico ao fogo de placas de aço com proteção de intumescente.
- A determinação do campo de temperaturas do material intumescente envolve:
 - uma transformação de fase com duas ou mais fronteiras móveis.
- A espessura da intumescência e a temperatura do aço foram medidas experimentalmente e utilizadas no estudo numérico:
 - Objetivo: determinar a temperatura na superfície exposta da intumescência e a condutividade térmica efetiva



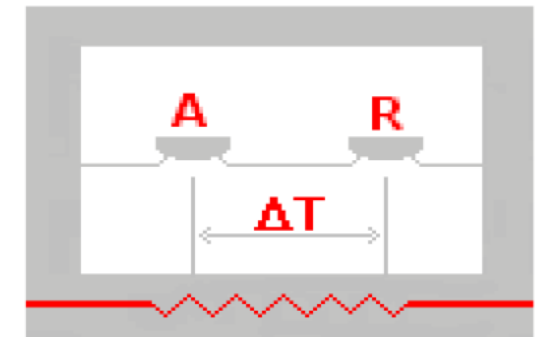
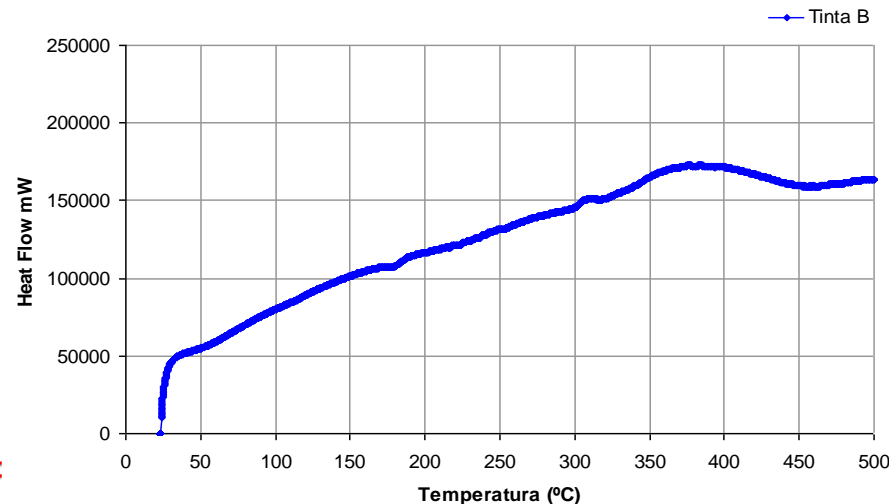
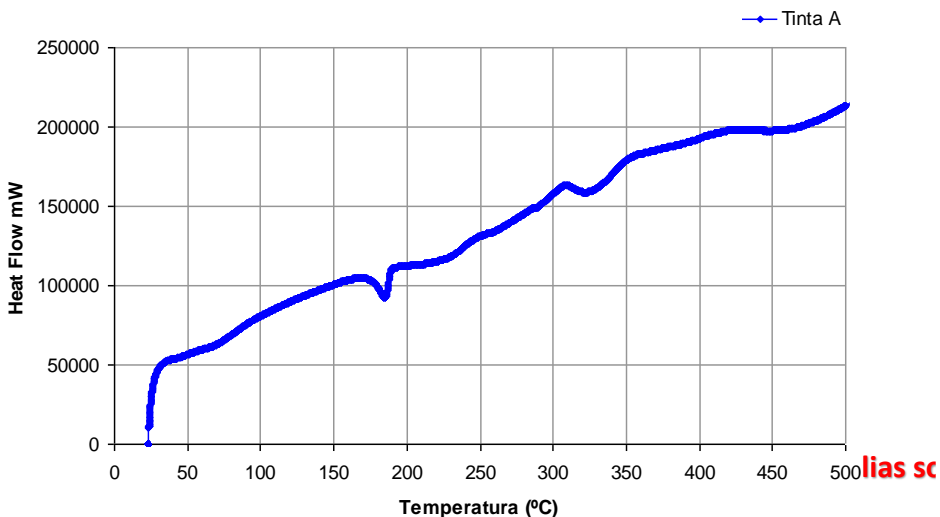
REAÇÃO AO FOGO DE TINTA INTUMESCENTE – TESTES DE MICRO ESCALA

- TG e DTG (“ThermoGravimetry and Differential ThermoGravimetry”):
 - Teste para avaliar a alteração de massa devido à interação com atmosfera (Ar e N2).
 - Intervalo de temperatura (T) de 20 [°C] até 950[°C], com 4 taxas de aquecimento B, $T=T_0+Bt$ (B=5, 10, 15 e 25 °C/min).
 - Avaliação de duas amostras de tinta intumescente (A e B).



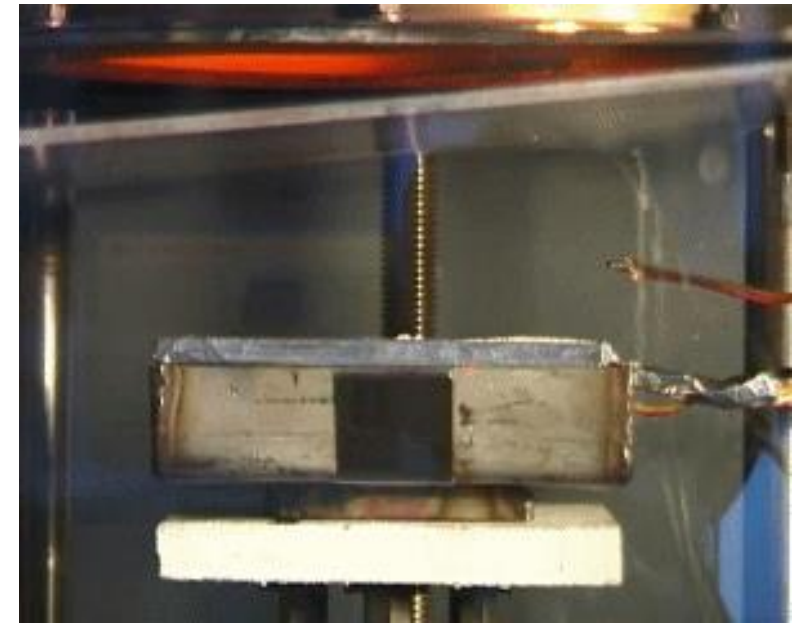
REAÇÃO AO FOGO DE TINTA INTUMESCENTE – TESTES DE MICRO ESCALA

- DSC (“Differential Scanning Calorimetry”)
 - Teste para quantificar a variação de energia num processo reativo de aquecimento (5º C/min).
 - Mede a diferença de temperatura entre a tinta e um material de referência inerte (ex: alumina em pó).
 - Presença de dois picos endotérmicos na gama de temperaturas apresentadas:
 - Fusão do APP e transformação da estrutura cristalina do PER;
 - Degradação do polímero e decomposição do MEL entre 300 a 350 [ºC] .



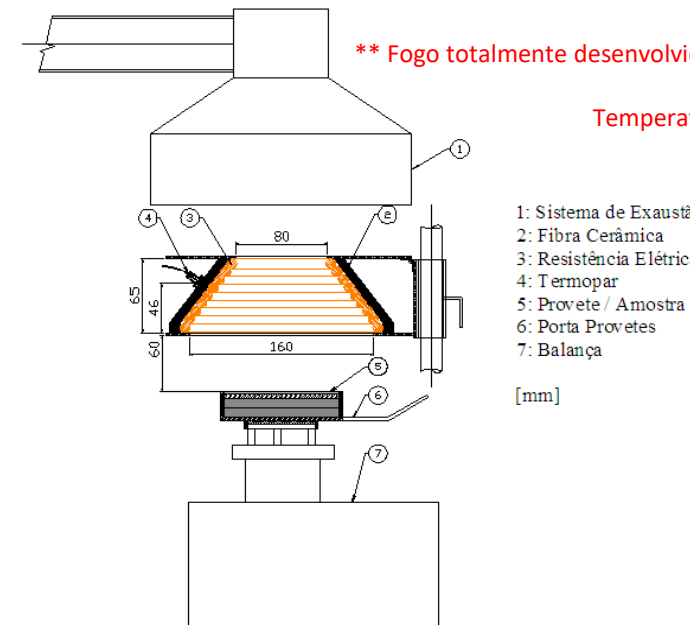
REAÇÃO AO FOGO DE TINTA INTUMESCENTE – TESTES DE MÉDIA ESCALA

- Testes realizados num calorímetro de cone:
 - Norma ISO 5660-1: “Reaction to fire tests - Heat release, smoke production and mass loss rate”.
 - Placas de aço 100x100x4/6 [mm] e instrumentadas com termopares.
 - Testes gravados com uma câmara de vídeo.



REAÇÃO AO FOGO DE TINTA INTUMESCENTE – TESTES DE MÉDIA ESCALA

- Calorímetro de Cone:
 - Elementos principais: uma célula de carga (7), suporte do provete (6), resistência elétrica com a forma de uma serpentina cônica (3), e um termopar (4) que mede e controla a temperatura* da resistência, sistema de exaustão dos gases de combustão com o analisador de oxigénio (HRR - taxa de libertação de calor).
 - Esta temperatura* está relacionada com o fluxo de calor radiante pretendido (35 e 75 kW/m²)**.
 - Assume-se que para combustíveis orgânicos convencionais, são libertados 13.1×10^3 [kJ] de energia por cada quilograma [kg] de oxigénio consumido, permitindo determinar HRR.



REAÇÃO AO FOGO DE TINTA INTUMESCENTE – TESTES DE MÉDIA ESCALA

- Referência: A | 35 | 4 | 1.5 | 3 (Tinta | Fluxo de calor | Espessura aço | espessura tinta DFT | Teste N^o.

- Testadas duas espessuras ou massividades (4 e 6 mm).
- Testadas três espessuras de proteção (valor nominal de 500, 1500 e 2500 [mm]).
- Repetibilidade de 3 testes para a maior parte dos ensaios.

Specimens identification					Initial Mass [g]	Final Mass [g]	Coating Mass [g]	DFT [µm]	σ (SD) [µm]	Higher [µm]	Smaller [µm]
A	35	4	0.5	1-3	363,77	371,28	7,51	545	40,6	601	478
A	35	4	0.5	2-3	363,82	369,98	6,16	615	51,5	695	504
A	35	4	0.5	3	364,54	373,19	8,65	528	60,4	624	427

A	35	4	1.5	1	361,10	387,74	26,64	1670	107	1860	1500
A	35	4	1.5	2	362,17	388,06	25,89	1610	72,2	1750	1500
A	35	4	1.5	3	361,38	385,42	24,04	1450	84,9	1580	1280

A	35	4	2.5	1-2	362,81	400,38	37,54	2530	165	2800	2240
A	35	4	2.5	2	365,81	407,89	42,08	2590	122	2790	2310
A	35	4	2.5	3-2	363,49	404,38	40,89	2680	179	2920	2370

A	75	4	0.5	1	363,46	372,34	8,88	549	60,3	639	425
A	75	4	0.5	2-2	363,58	371,33	7,75	586	36,3	651	538
A	75	4	0.5	3	368,44	377,85	9,41	582	48,6	657	466

A	75	4	1.5	1	369,59	394,82	25,23	1510	83,7	1660	1390
A	75	4	1.5	2	371,11	396,24	25,13	1530	87,7	1720	1380
A	75	4	1.5	3	364,87	391,13	26,26	1620	98,7	1820	1450

A	75	4	2.5	1	366,97	407,71	40,74	2590	122	2760	2330
A	75	4	2.5	2	365,11	404,90	39,79	2590	134	2800	2350
A	75	4	2.5	3	370,60	410,77	40,17	2530	167	2810	2260

A	35	6	0.5	1	527,37	535,05	7,68	476	33,1	518	403
A	35	6	2.5	1	526,65	565,71	39,06	2420	150	2610	2130
A	75	6	0.5	1	522,90	530,58	7,68	494	33,9	561	434
A	75	6	2.5	1	525,71	564,89	39,18	2490	112	2670	2290

Specimens identification					Initial Mass [g]	Final Mass [g]	Coating Mass [g]	DFT [µm]	σ (SD) [µm]	Higher [µm]	Smaller [µm]
B	35	4	0.5	1	366,73	375,36	8,63	571	41,6	665	506
B	35	4	0.5	2	365,38	374,88	9,50	626	38,6	698	563
B	35	4	0.5	3	364,95	373,95	9,00	603	49,5	710	481

B	35	4	1.5	1	365,63	390,10	24,47	1510	70,2	1610	1400
B	35	4	1.5	2	365,82	391,42	25,60	1570	64,1	1670	1470
B	35	4	1.5	3	364,80	390,67	25,87	1580	66,5	1710	1470

B	35	4	2.5	1	365,49	409,85	44,36	2640	90,9	2750	2460
B	35	4	2.5	2	366,29	409,12	42,83	2560	89,0	2660	2400
B	35	4	2.5	3	366,40	407,77	41,37	2510	85,7	2660	2350

B	75	4	0.5	1	362,92	371,94	9,02	581	35,9	653	518
B	75	4	0.5	2	366,00	375,97	9,97	662	53,9	817	599
B	75	4	0.5	3	367,53	377,53	10,00	631	31,2	707	583

B	75	4	1.5	1	366,27	390,71	24,44	1530	79,5	1720	1440
B	75	4	1.5	2	364,69	389,63	24,94	1550	67,8	1690	1450
B	75	4	1.5	3	359,09	384,05	24,96	1560	74,9	1740	1450

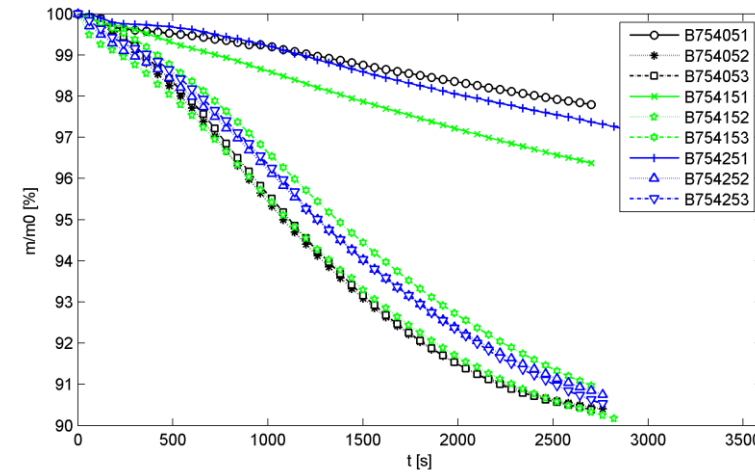
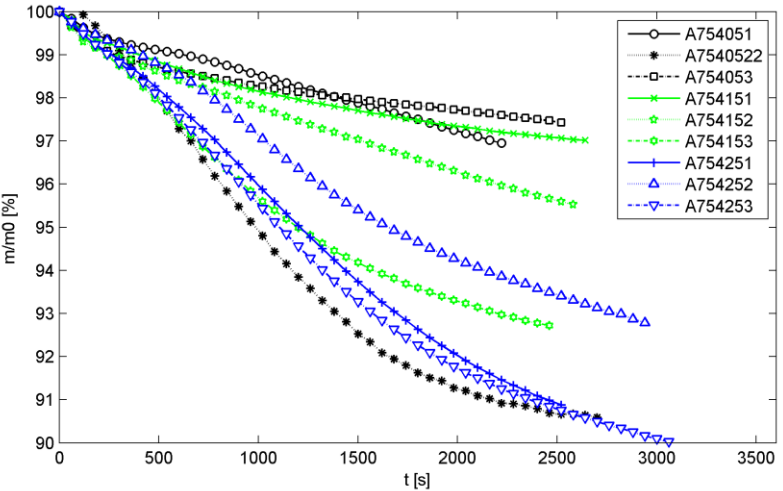
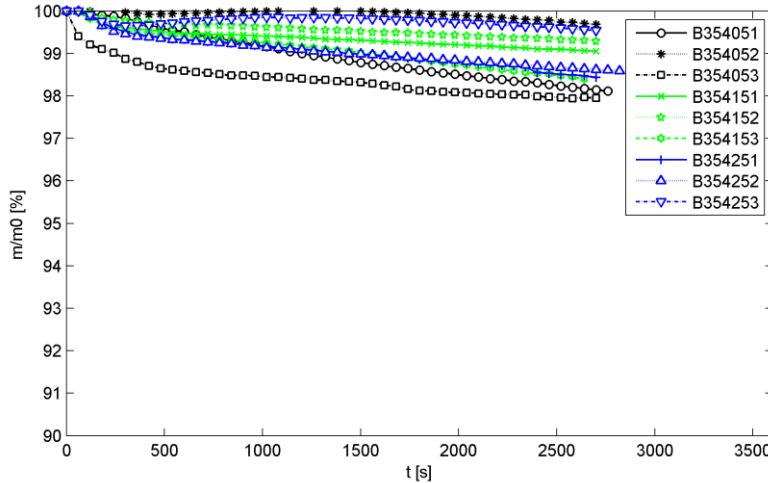
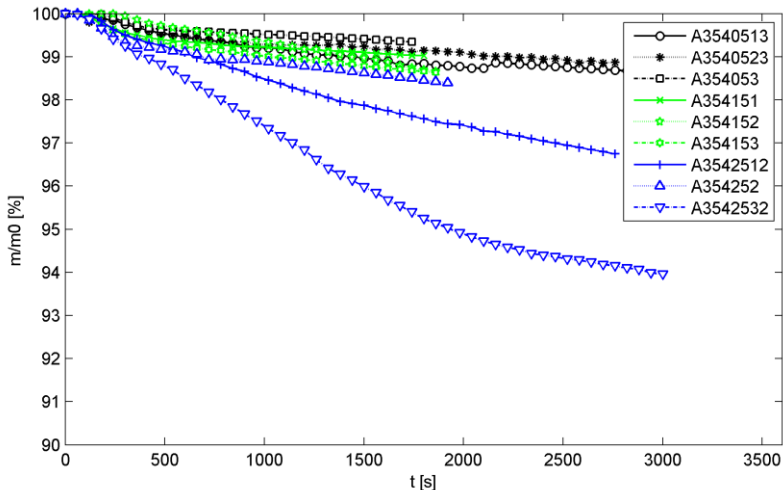
B	75	4	2.5	1	359,79	399,66	39,87	2520	211	2840	2170
B	75	4	2.5	2	364,28	405,30	41,02	2520	91,4	2690	2350
B	75	4	2.5	3	364,80	404,97	40,17	2490	126	2760	2340

B	35	6	0.5	1	528,60	537,10	8,50	533	56,7	663	431
B	35	6	2.5	1	528,91	571,74	42,83	2570	105	2720	2360
B	75	6	0.5	1	525,47	534,86	9,39	607	65,9	799	528
B	75	6	2.5	1	529,04	570,00	40,96	2610	75,8	2760	2500



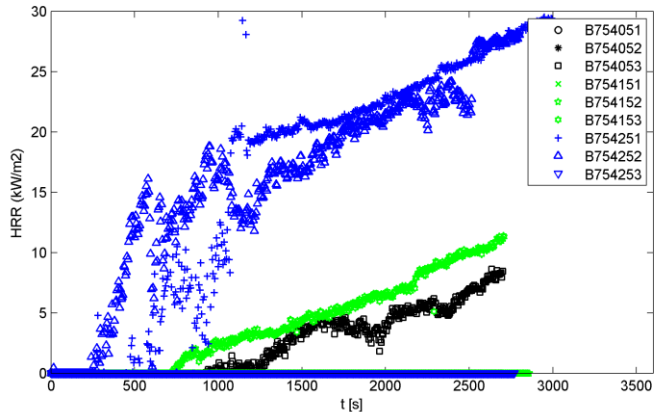
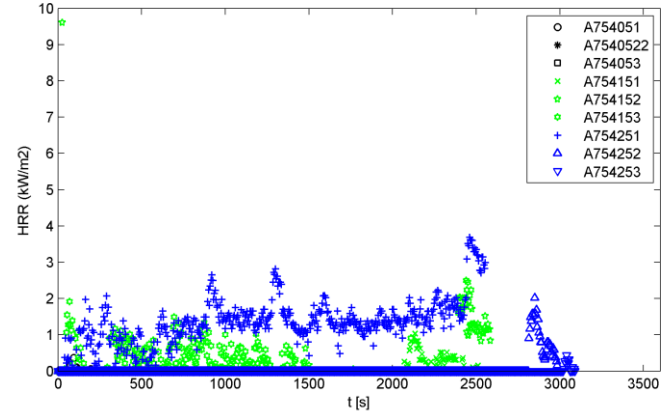
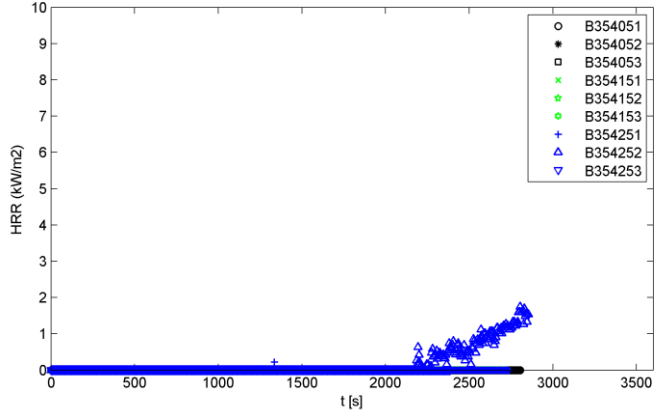
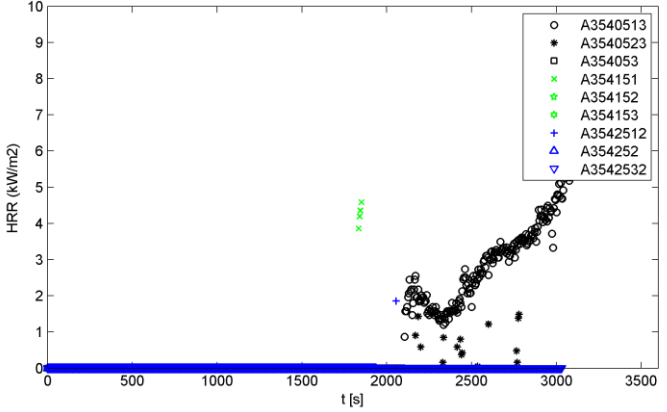
REAÇÃO AO FOGO DE TINTA INTUMESCENTE – TESTES DE MÉDIA ESCALA

- Variação da massa das amostras.



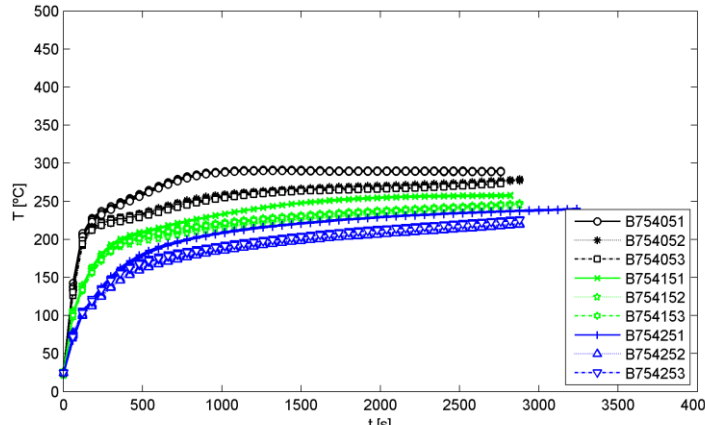
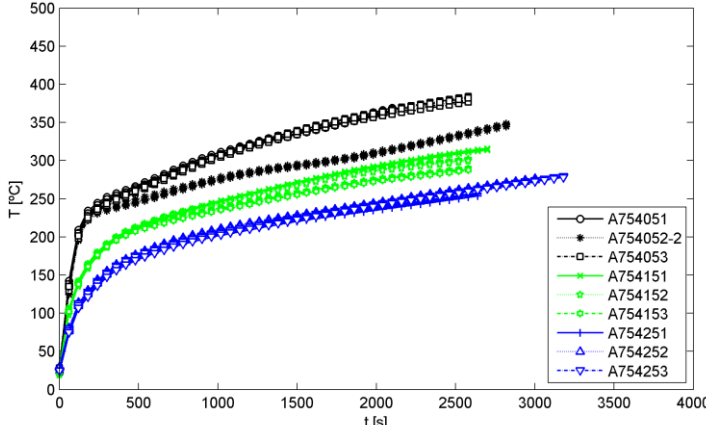
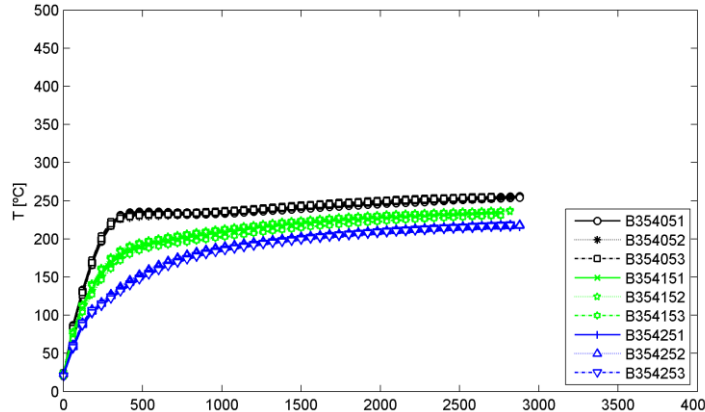
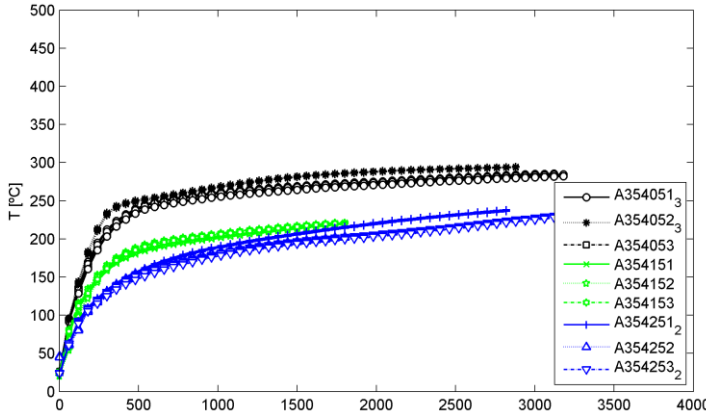
REAÇÃO AO FOGO DE TINTA INTUMESCENTE – TESTES DE MÉDIA ESCALA

- Taxa de libertação de calor (HRR):
 - Os valores medidos da HRR são muito baixos para ambas as tintas, em particular para os ensaios das amostras submetidas a baixos fluxos de calor (35 kW/m²).
 - Para o fluxo de calor mais elevado existe uma distinção clara entre a tinta A e a tinta B. tinta A com um valor aproximadamente constante ao longo do tempo e de menor intensidade.



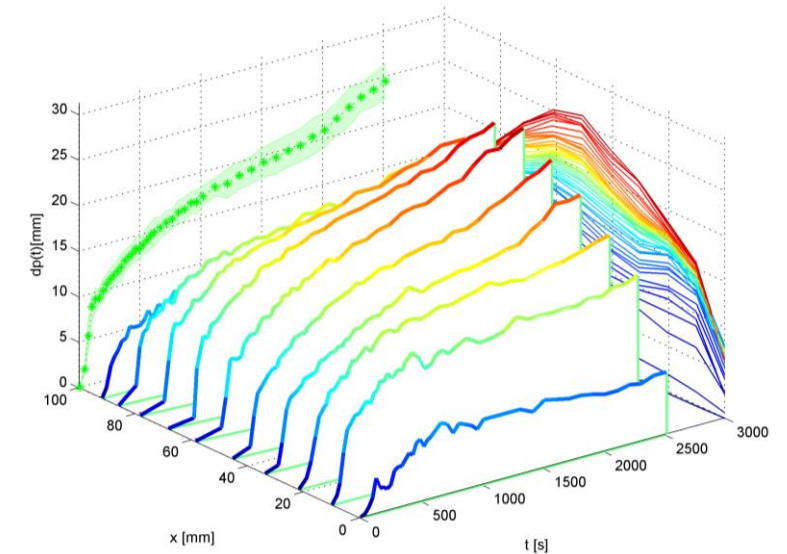
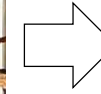
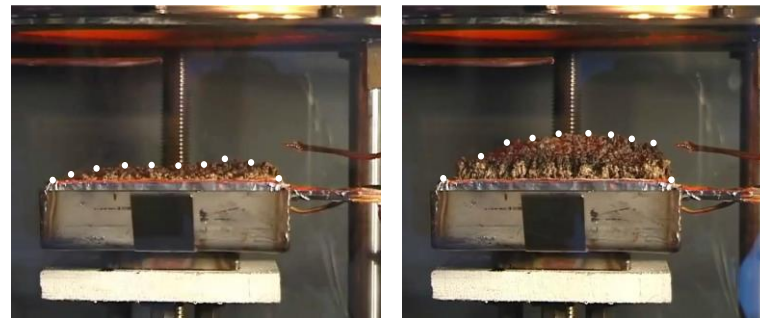
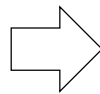
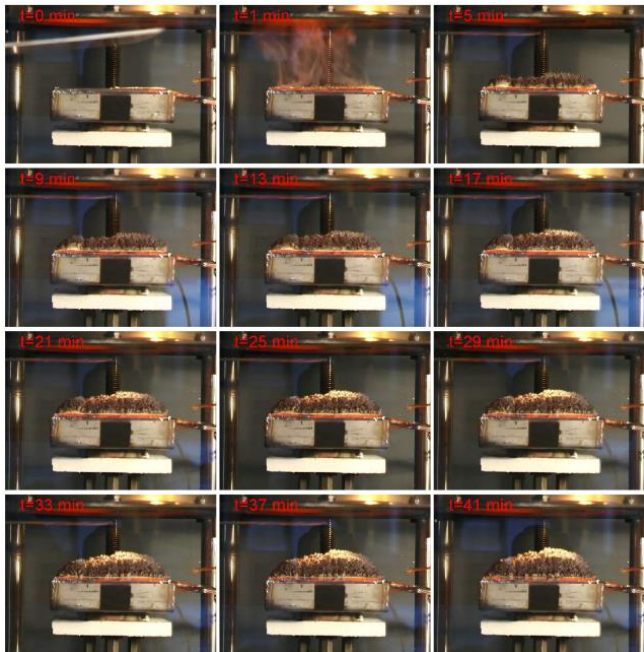
REAÇÃO AO FOGO DE TINTA INTUMESCENTE – TESTES DE MÉDIA ESCALA

- Temperatura média das placas de aço com 4 [mm] protegidas com a tinta A e B e submetidas a um fluxo de calor de 35 e 75 [kW/m²], durante 45 min.
 - Comportamento das curvas é muito semelhante para os três ensaios repetidos.
 - Com o aumento da proteção (espessura DFT) menor temperatura será prevista na placa de aço.



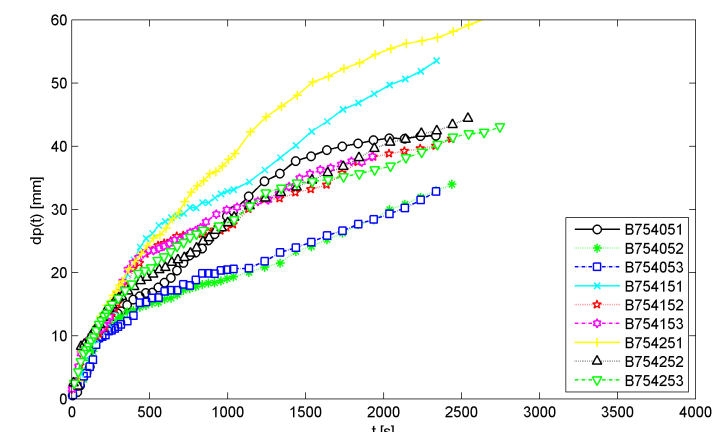
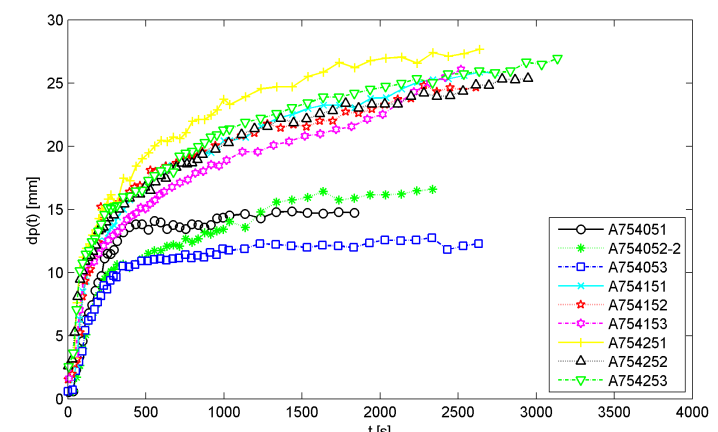
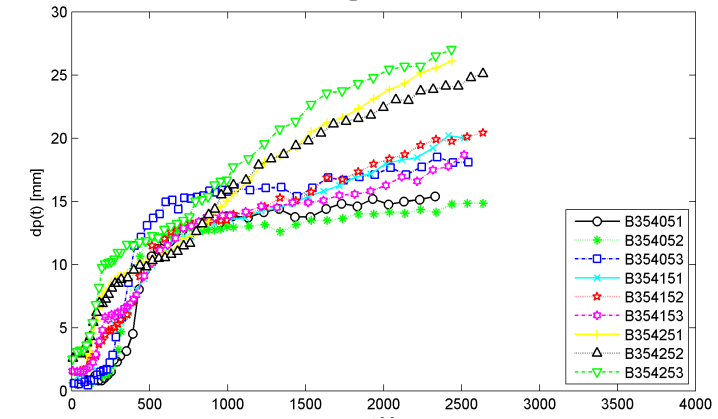
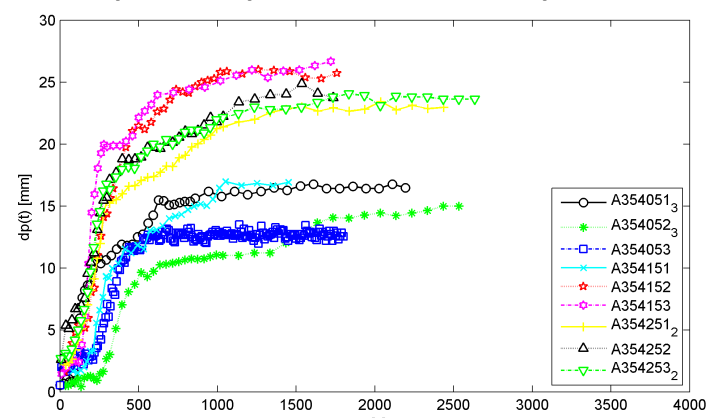
REAÇÃO AO FOGO DE TINTA INTUMESCENTE – TESTES DE MÉDIA ESCALA

- Medição experimental do evolução da intumescência:
 - Ensaios gravados através de uma câmara digital.
 - Para cada ensaio foram definidos 200 fotogramas (função da dinâmica da intumescência).
 - Processamento de imagem com programa desenvolvido em MATLAB. Malha com 10 pontos equidistribuídos na largura da placa de aço para definir o perfil da intumescência do ensaio (intervalos de 60 s).
 - Para a evolução da intumescência no tempo são utilizados 4 pontos centrais da malha (curva verde, média e desvio padrão).



REAÇÃO AO FOGO DE TINTA INTUMESCENTE – TESTES DE MÉDIA ESCALA

- Resultados da espessura da intumescência para placas de 4 mm (valores médios).
 - Os perfis de intumescência variam com a solicitação térmica (aumentando o fluxo de calor, aumenta intumescência máxima).
 - A tinta B é mais adequada para maiores períodos de resistência ao fogo.

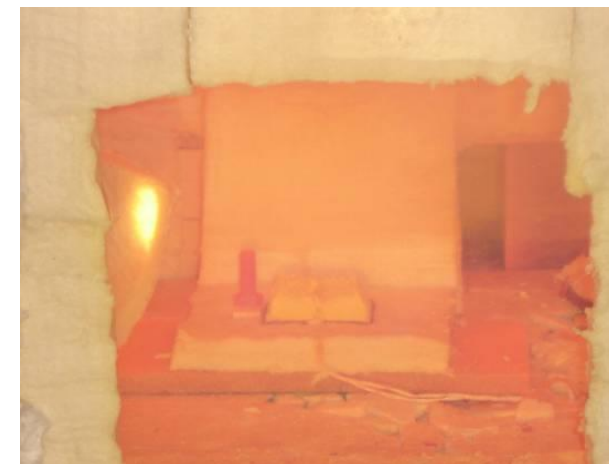


REAÇÃO AO FOGO DE TINTA INTUMESCENTE – TESTES DE MÉDIA ESCALA

- Ensaio em placas de aço expostas à curva de incêndio padrão ISO834:
 - Amostras de placas de aço quadradas, com 100 [mm] de lado e com 4, 6, 8 e 14 [mm] de espessura, protegidas numa face com DFT nominais entre 0.5 e 1.5 [mm];
 - Evolução da temperatura no interior do forno é medida através de um termopar de placa, segundo as especificações da norma EN1363-1;
 - A porta frontal do forno foi substituída por um aro metálico, preenchido com betão resistente ao fogo, com um vidro cerâmico resistente ao fogo, parcialmente isolado com uma fibra cerâmica com 50 [mm].

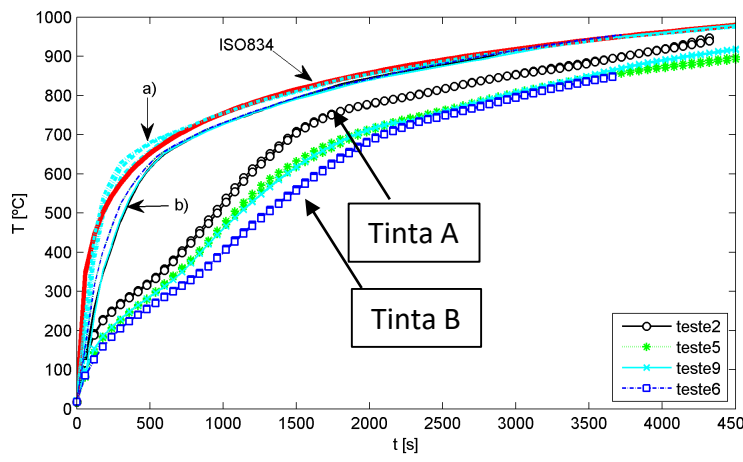
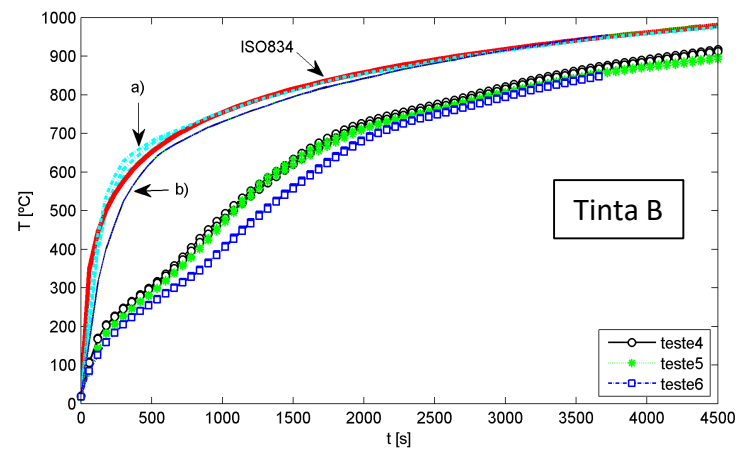
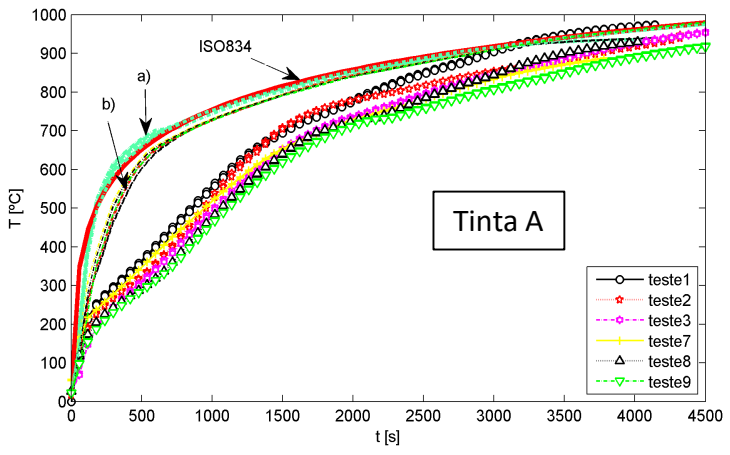


Teste nº	Tinta	ds [mm]	DFT [mm]	Maior [mm]	Menor [mm]	S.d. [mm]	Intumescência/Expansão			
							$dp_{m\acute{a}x}$ [mm]	$E_{m\acute{a}x} = dp/DFT$	dp_{Fim} [mm]	$E_{Fim} = dp/DFT$
1	A	4	584	707	478	58.7	18,72	32,05	10,74	18,39
2	A	4	1032	1145	902	77.7	30,60	29,65	21,40	20,74
3	A	4	1430	1560	1200	113.0	32,12	22,46	22,05	15,42
4	B	4	1016	1179	729	115.0	72,62	71,48	45,90	45,18
5	B	4	1067	1218	921	83.1	71,37	66,89	43,14	40,43
6	B	4	1560	1800	1340	148.0	-	-	-	-
7	A	4	772	926	644	91.3	46,16	59,79	37,85	49,03
8	A	4	1230	1370	1090	63.4	41,34	33,61	33,63	27,34
9	A	4	1520	1850	1310	157	69,50	45,72	58,95	38,78
10	A	6	1060	1350	721	163	32,63	30,78	24,68	23,28
11	A	8	1060	1240	780	140	34,15	32,22	23,36	22,04
12	A	14	1190	1330	1050	78.8	48,80	41,01	39,52	33,21



REAÇÃO AO FOGO DE TINTA INTUMESCENTE – TESTES DE MÉDIA ESCALA

- Evolução da temperatura:
 - a) temperatura no termopar de placa;
 - b) temperatura nas placas não protegidas (referência).
- Comparação:
 - Para a mesma espessura nominal de proteção (DFT) e o mesmo período de exposição ao fogo, a temperatura das placas de aço protegidas com tinta B é inferior à das protegidas com tinta A.
 - Para maiores períodos de exposição ao fogo, a temperatura da placa protegida com 1.5 [mm] de tinta B converge para os valores da temperatura da placa protegida com 1.0 [mm] da mesma tinta.

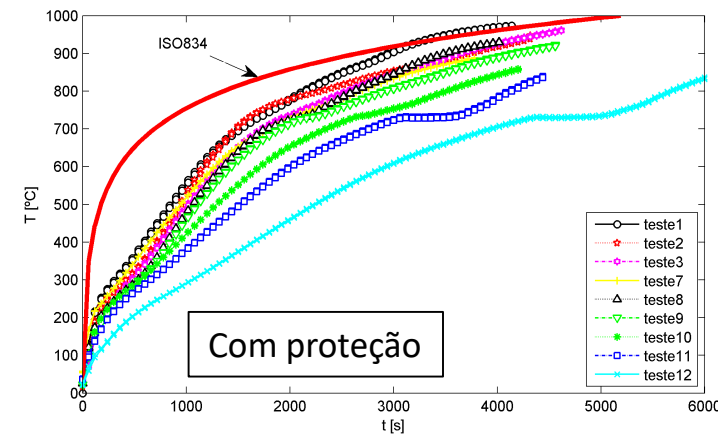
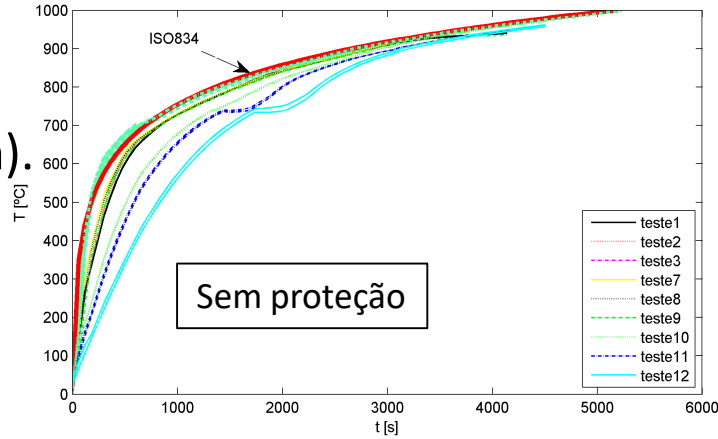


REAÇÃO AO FOGO DE TINTA INTUMESCENTE – TESTES DE MÉDIA ESCALA

- Resultados:

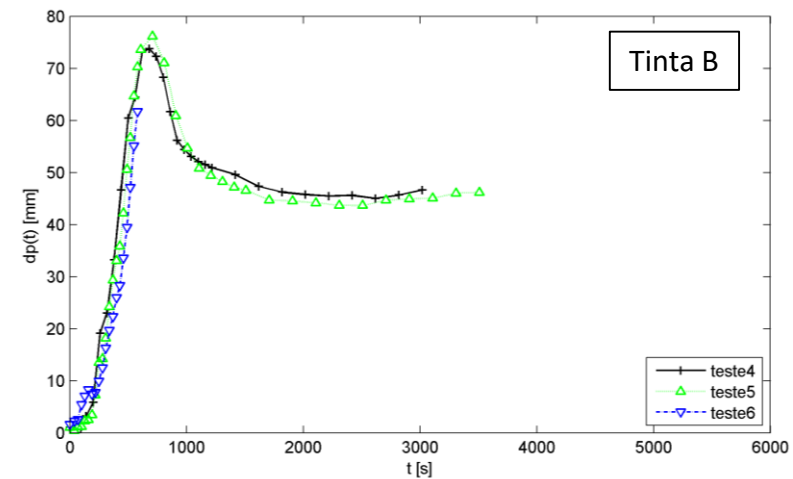
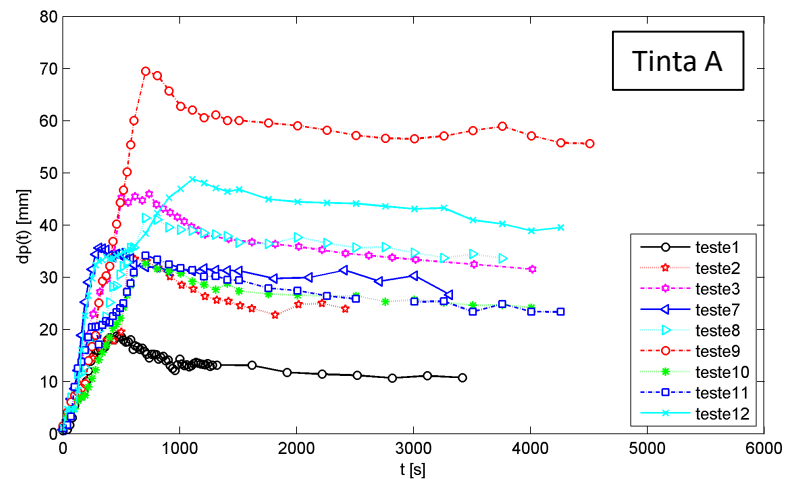
- Temperatura para diferentes períodos de exposição 15, 30, 45 e 60 minutos;
- Tempos para diferentes temperaturas de referência (500, 550 e 600 °C);
- Comparação com os ensaios de placas de aço sem proteção (ds=4,6,8,14 mm).
- resultados mostram uma influência significativa da espessura de proteção, aumentando o tempo de resistência ao fogo

Teste nº	Tinta	Esp. Placa [mm]	DFT [mm]	Temperatura no instante [°C]				Tempo à Temp. [min.]		
				15 [min]	30 [min]	45 [min]	60 [min]	T= 500 [°C]	T= 550 [°C]	T= 600 [°C]
NP1	-	4	-	710,39	820,51	887,93	944,78	5	6	7
NP2	-	6	-	653,00	798,22	881,73	936,42	8	10	12
NP3	-	8	-	626,00	760,39	875,69	926,88	9	11	13
NP4	-	14	-	531,63	739,25	856,92	924,24	13	15	18
1	A	4	584	519,39	749,52	870,87	954,64	14	16	18
2	A	4	1032	482,06	759,69	833,16	890,80	15	17	19
3	A	4	1430	462,48	714,03	818,27	895,13	16	19	21
4	B	4	1016	450,67	698,77	792,57	874,46	17	19	22
5	B	4	1067	429,72	688,87	780,72	853,40	17	20	22
6	B	4	1560	365,88	641,14	767,89	844,72	21	24	27
7	A	4	772	485,57	701,89	804,74	878,55	15	18	21
8	A	4	1230	435,34	701,36	808,75	907,25	17	20	22
9	A	4	1520	421,60	683,55	779,48	860,33	18	21	23
10	A	6	1060	393,77	619,22	735,99	810,40	21	24	28
11	A	8	1060	356,14	560,85	694,12	736,01	25	29	33
12	A	14	1190	275,73	427,59	571,70	672,62	37	42	48



REAÇÃO AO FOGO DE TINTA INTUMESCENTE – TESTES DE MÉDIA ESCALA

- Medição experimental do processo de intumescência:
 - Processamento de imagem com programa desenvolvido em MATLAB.
 - A forma de variação da expansão com o tempo é semelhante para ambas as tintas;
 - Fase 1: Variação linear com o tempo
 - Fase 2: Depois do máximo da intumescência, verifica-se uma diminuição da espessura da intumescência, que difere com o tipo de tinta e com a espessura inicial de proteção (DFT).



REAÇÃO AO FOGO DE TINTA INTUMESCENTE – TESTES À ESCALA REAL SEM CARGA

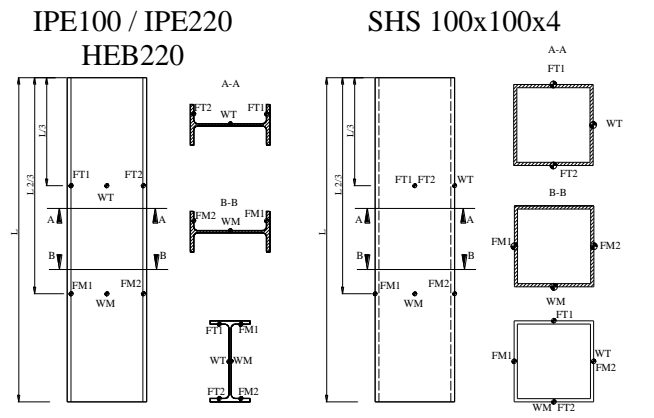
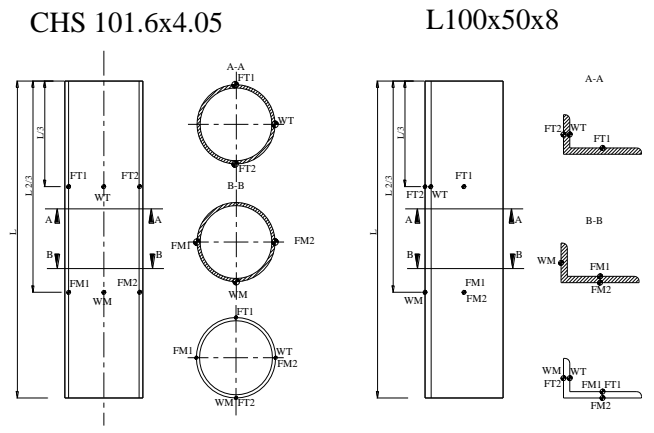
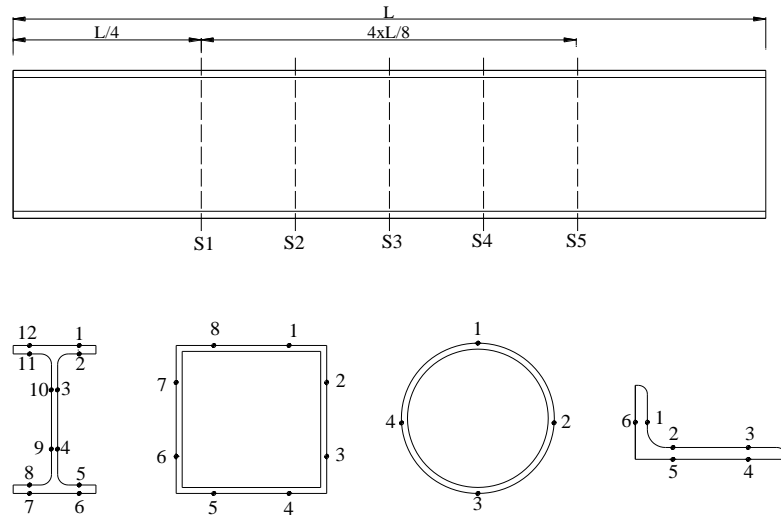
- Evolução da intumescência em elementos estruturais metálicos.
- Evolução da temperatura no interior do forno é medida através de um termopar de placa, segundo as especificações da norma EN1363-1 (ISO 834);
 - Estudo paramétrico para avaliação da influência da espessura e do efeito de bordo da tinta nos perfis;
 - Estudo do processo de intumescência e integridade estrutural;
 - Validação numérica, com simulação de modelos de fronteira móvel.
- Disposições normativas:
 - EN1363: Descreve procedimentos para ensaios de resistência ao fogo de elementos estruturais;
 - EN13381-8: Descreve procedimentos para ensaios de resistência ao fogo de elementos com proteção reativa ao fogo. Admite a utilização dos seguintes métodos: (i) Método gráfico; (ii) Análise por equação diferencial considerando condutividade constante; (iii) Análise por equação diferencial considerando condutividade variável; (iv) Análise por regressão numérica.



$$\lambda_{p,t} = \frac{d_p}{A_m/V} \frac{c_a \rho_a}{(\theta_t - \theta_{a,t}) \Delta t} \Delta \theta_{a,t}$$

REAÇÃO AO FOGO DE TINTA INTUMESCENTE – TESTES À ESCALA REAL SEM CARGA

- Análise do perfil de intumescência de elementos estruturais curtos:
 - IPE100, IPE220, HEB220, SHS100x100x4, CHS100x4 e L100x50x8;
 - Para cada secção foram realizados seis ensaios (repetibilidade):
 - três com uma espessura nominal de proteção igual a 500 [µm];
 - três com uma espessura de 1500 [µm].
 - Tratamento superficial com decapagem por jato de areia.
 - Posição dos termopares representada à direita.
 - Posição de controlo da espessura de proteção (DFT), em baixo.



REAÇÃO AO FOGO DE TINTA INTUMESCENTE – TESTES À ESCALA REAL SEM CARGA

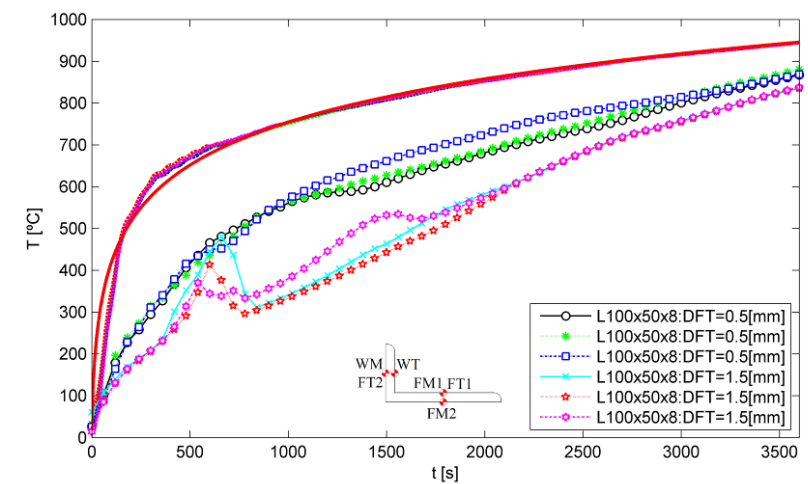
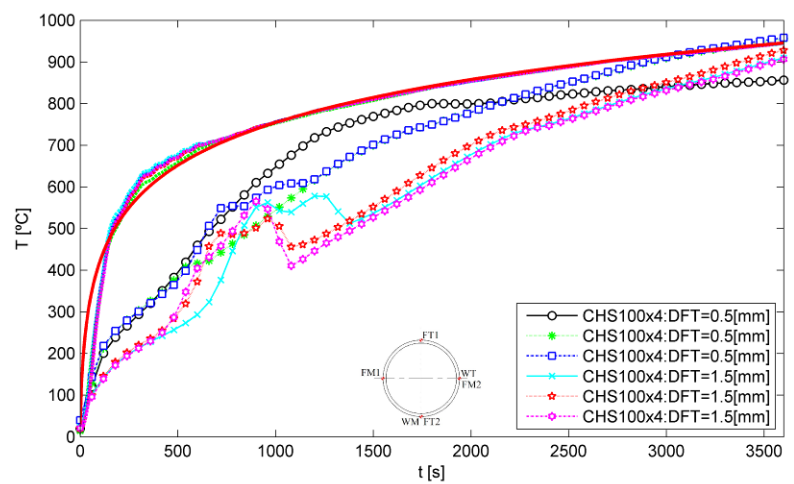
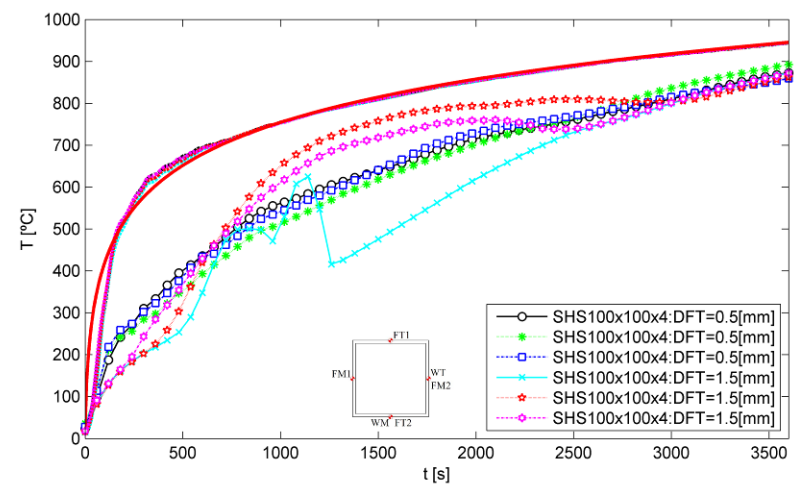
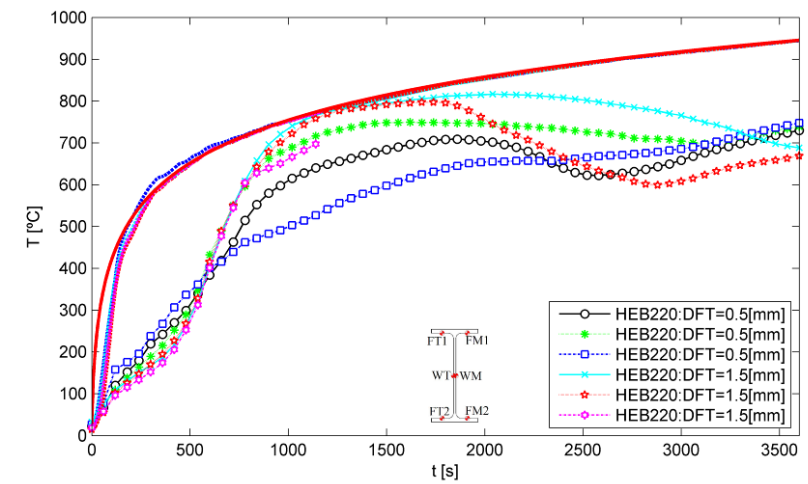
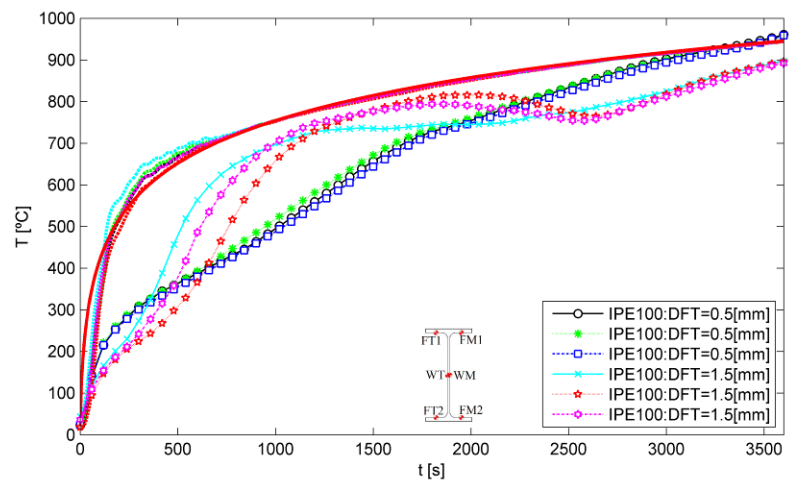
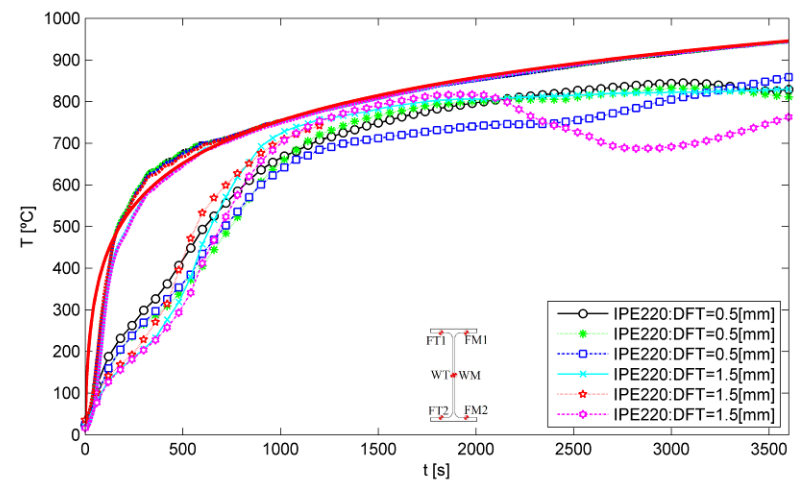
- Expansão média do intumescente

Teste nº	Secção	Ap/V [m ⁻¹]	DFT [mm]	Desvio Padrão [mm]	Maior [mm]	Menor [mm]	Expansão média nos banzos ou faces na horizontal [mm] e [s]					Expansão média na alma ou faces na vertical [mm] e [s]				
							dp(max.)	dp(15min.)	dp(30min.)	dp(Fim)	t(dpmax)	dp(max.)	dp(15min.)	dp(30min.)	dp(Fim)	t(dpmax)
1	IPE100	387	515,6	113,5	752	312	16,31	13,47	12,83	13,08	419	39,42	38,62	34,25	34,20	619
2	IPE100	387	506,8	115,0	763	314	17,14	15,51	14,29	14,11	469	38,15	38,05	34,25	32,67	919
3	IPE100	387	594,6	119,8	862	359	18,44	-	-	17,25	429	36,84	-	-	36,27	449
4	IPE100	387	1346,2	183,4	1800	970	25,96	25,09	24,81	22,53	817	56,67	52,33	52,32	49,52	1017
5	IPE100	387	1424,8	142,3	1680	1050	30,15	28,51	26,98	26,46	710	56,12	50,04	51,89	49,48	1210
6	IPE100	387	1425,7	195,3	1820	961	27,40	25,44	23,65	23,52	610	72,63	65,52	71,95	66,48	1610
7	IPE220	254	699,1	130,5	1000	512	25,71	25,62	23,21	19,23	919	57,79	56,01	53,81	50,62	1219
8	IPE220	254	704,6	119,2	996	490	16,09	15,03	14,18	14,65	509	53,75	52,54	50,05	49,73	709
9	IPE220	254	563,7	90,9	823	345	14,07	13,62	13,42	13,65	1219	26,95	26,37	24,16	23,20	1019
10	IPE220	254	1645,2	146,7	2050	1250	42,14	39,42	40,77	40,29	1210	88,81	63,67	87,41	86,73	2610
11	IPE220	254	1649,7	137,2	1890	1320	23,73	-	-	23,73	381	28,58	-	-	28,58	381
12	IPE220	254	1573,3	134,7	1860	1290	36,39	35,53	34,11	32,95	1010	86,92	70,02	86,90	85,60	1810
13	HEB220	140	698,7	81,1	888	523	24,06	23,25	22,33	22,26	1219	40,75	36,44	37,65	37,40	1419
14	HEB220	140	685,9	108,3	891	454	14,18	12,64	12,76	10,48	1019	20,96	20,03	18,13	17,89	1019
15	HEB220	140	620,0	85,6	810	442	19,41	19,28	17,48	15,93	919	45,93	39,94	43,52	38,18	1219
16	HEB220	140	1678,8	175,3	2270	1310	36,64	29,22	35,61	35,46	1410	56,54	38,71	55,96	55,84	2410
17	HEB220	140	1516,8	169,5	1910	1080	31,50	24,63	29,74	29,86	1410	55,90	34,05	54,02	52,33	2610
18	HEB220	140	1745,3	150,0	2140	1490	27,85	-	-	27,85	760	38,58	-	-	38,58	760
19	SHS 100x100x4	250	544,6	90,7	759	388	18,35	17,67	14,65	13,26	719	17,30	16,67	15,26	13,96	469
20	SHS 100x100x4	250	588,0	104,6	819	404	22,51	20,81	20,59	20,98	619	15,29	14,76	14,03	14,12	619
21	SHS 100x100x4	250	563,3	90,7	760	409	20,45	19,96	16,63	16,35	819	16,82	14,31	14,31	13,97	269
22	SHS 100x100x4	250	1405,5	178,0	1750	978	25,92	25,92	24,67	23,08	910	24,57	24,03	23,71	22,77	1010
23	SHS 100x100x4	250	1520,8	181,9	1910	1120	19,33	-	-	19,33	460	18,67	-	-	18,67	460
24	SHS 100x100x4	250	1409,5	164,1	1780	1040	27,16	26,90	24,65	23,62	1010	25,13	24,89	24,04	22,96	1010
25	CHS 100x4.05	247	541,2	58,8	633	424	37,65	26,79	22,64	22,44	450					
26	CHS 100x4.05	247	458,4	90,8	627	308	37,89	30,47	30,71	29,86	459					
27	CHS 100x4.05	247	502,9	81,5	623	306	40,46	33,81	31,64	29,80	419					
28	CHS 100x4.05	247	1436,5	148,3	1670	1170	40,04	39,50	38,86	39,04	1090					
29	CHS 100x4.05	247	1315,5	169,4	1630	1050	46,75	46,46	43,81	42,97	790					
30	CHS 100x4.05	247	1457,5	94,8	1620	1240	42,75	42,23	39,28	35,00	990					
31	L100x50x8	250	573,5	69,5	734	443										
32	L100x50x8	250	528,6	71,8	679	409										
33	L100x50x8	250	560,7	61,6	723	437	12,68	11,31	-	10,54	459	22,86	21,61	-	21,49	1009
34	L100x50x8	250	1479,3	245,4	1830	1020	32,57	29,00	29,63	32,57	5010	34,21	34,15	33,05	30,65	910
35	L100x50x8	250	1493,7	120,5	1740	1180	25,60	24,81	23,93	24,28	3610	31,57	29,55	23,06	23,52	710
36	L100x50x8	250	1417,0	130,4	1670	1150	28,61	25,41	24,41	25,12	610	32,62	30,38	26,50	26,68	610



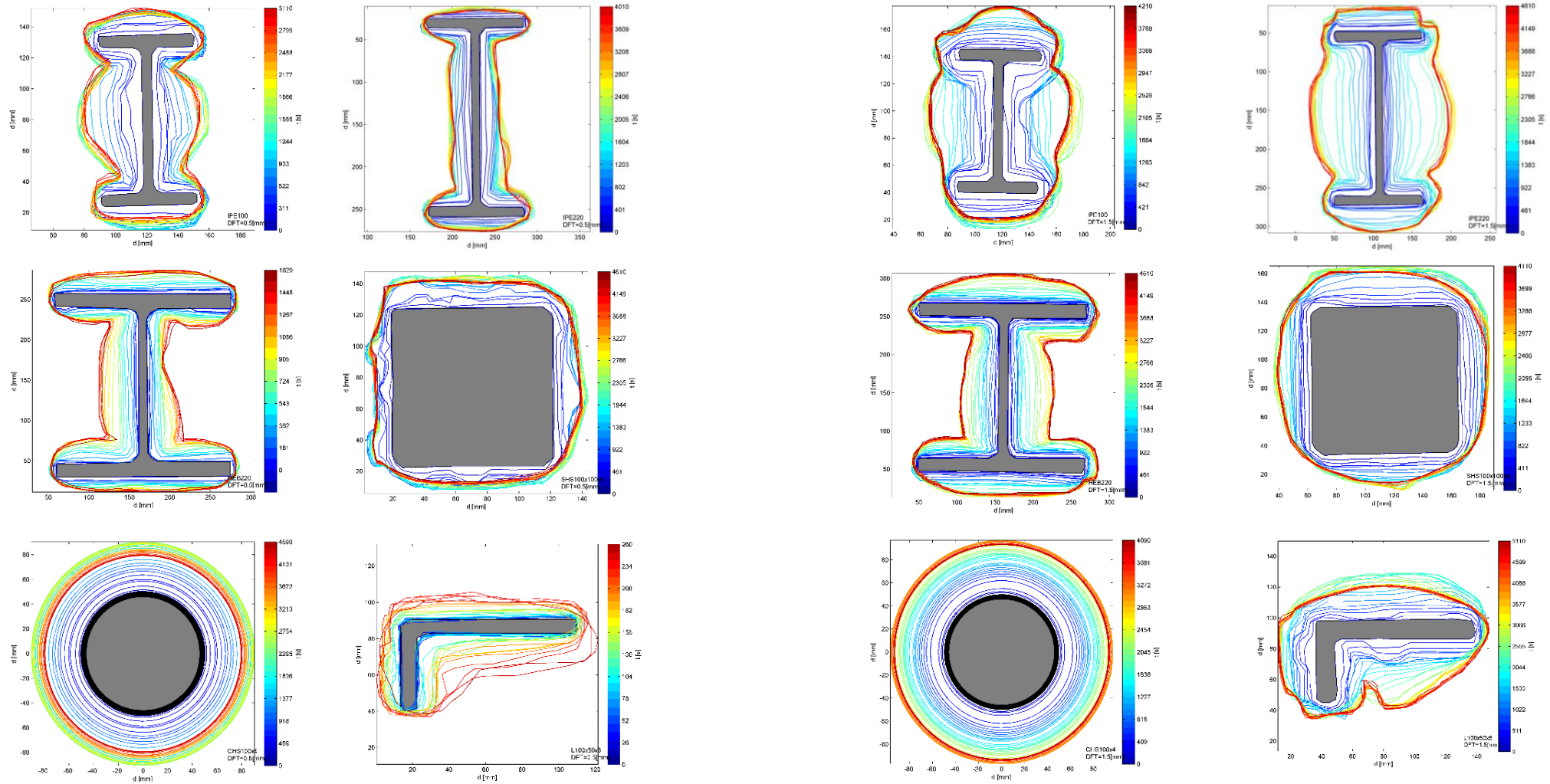
REAÇÃO AO FOGO DE TINTA INTUMESCENTE – TESTES À ESCALA REAL SEM CARGA

- Evolução da temperatura nos perfis



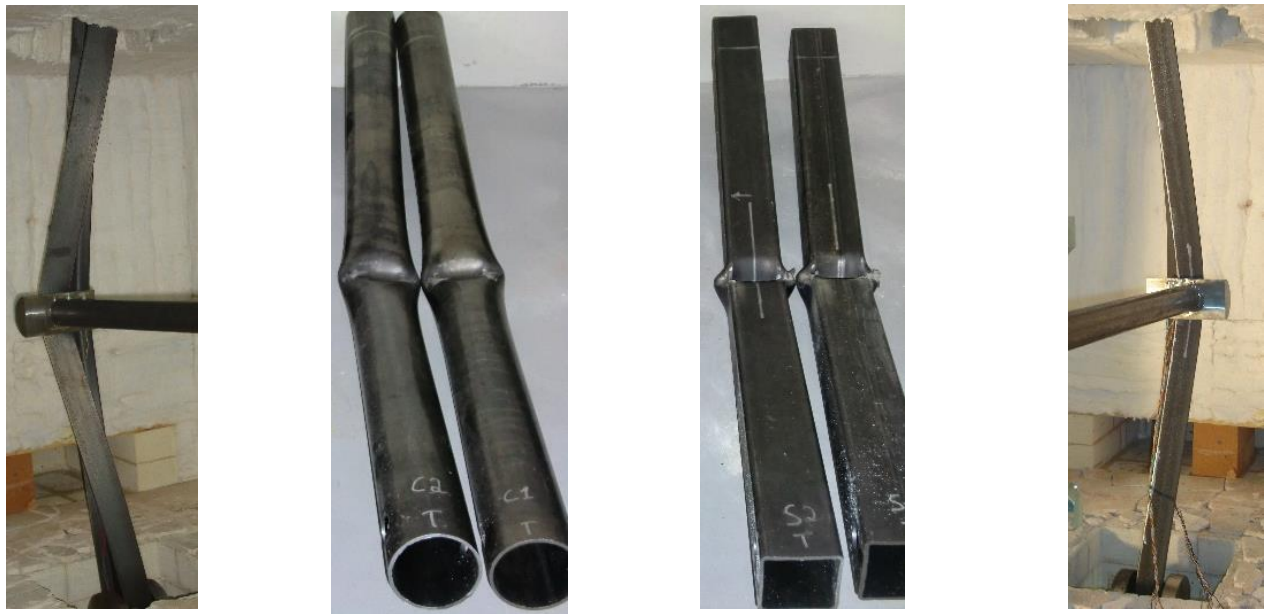
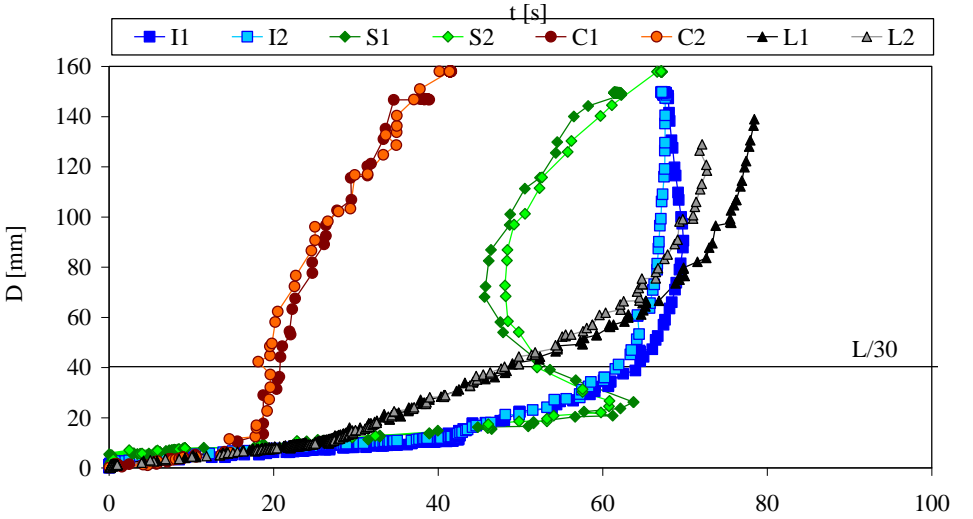
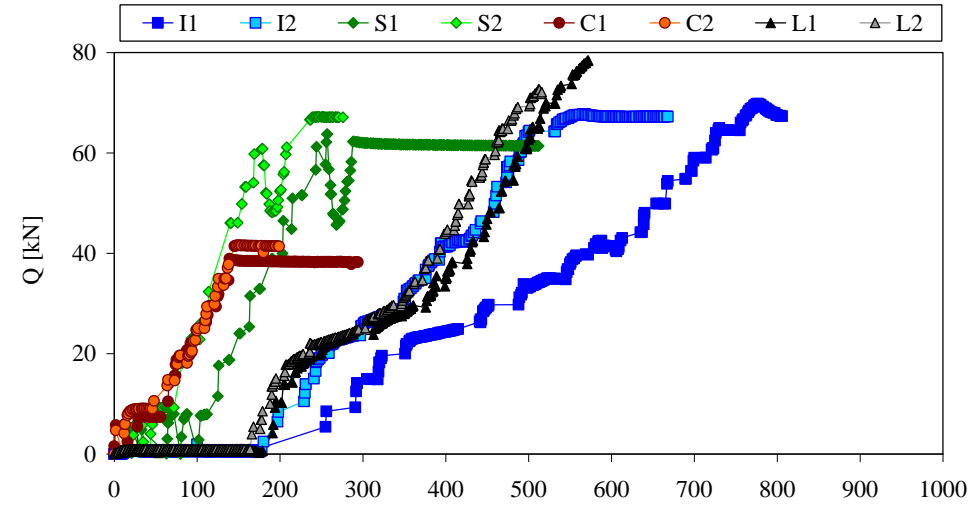
REAÇÃO AO FOGO DE TINTA INTUMESCENTE – TESTES À ESCALA REAL SEM CARGA

- Evolução do perfil de intumescência com o tempo:
- Efeito de bordo e do perfil de intumescência com processamento de vídeo (DFT=0.5 mm e 1.5 mm).



RESISTÊNCIA À FLEXÃO – TESTES À ESCALA REAL COM CARGA

- Determinação da capacidade resistente à flexão de 3 pontos
- Carga incremental.

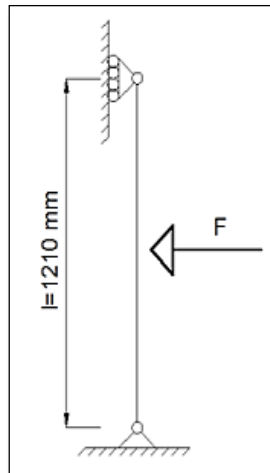


Secção	Teste nº	Resistência EC3-1.1		Q _{exp} L/30 [kN]	Q _{exp} Max [kN]	Modo de colapso
		Nom.	Real			
IPE	I1	31,84	34,99	64,22	69,82	ELT
	I2	31,84	34,99	61,76	67,78	ELT
SHS	S1	42,98	66,23	53,11	63,73	Rot. Plástica
	S2	42,98	66,23	52,01	67,19	Rot. Plástica
CHS	C1	29,37	22,76	20,78	38,91	Rot. Plástica
	C2	29,37	22,76	18,70	41,61	Rot. Plástica
LNP	L1	21,69	25,45	48,78	78,44	ELT
	L2	21,69	25,45	48,06	72,67	ELT



RESISTÊNCIA AO FOGO DE VIGAS COM E SEM PROTEÇÃO DE TINTA INTUMESCENTE— TESTES À ESCALA REAL COM CARGA

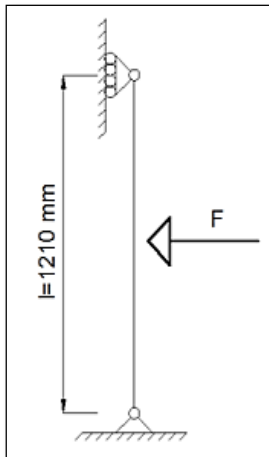
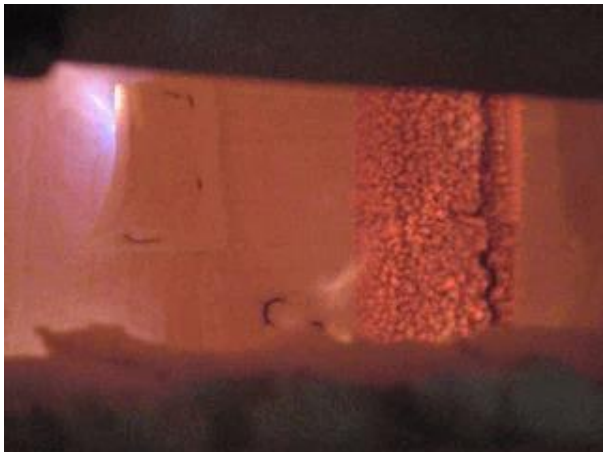
- Resistência ao fogo de vigas sujeita a flexão em 3 pontos (protegidas)
 - Perfis IPE 100 (S275) e SHS 100x100x4 (S235)



Grupo/ Secção	Teste nº	Ap/V [m ⁻¹]	Sol. Térmica	Nível de carga	Q [kN]	dp [µm]				Resist. EC3		Resist. Exp.	
						DFT	Desv. Pad.	Máx.	Mín.	T [°C]	t [s]	T [°C]	t[s]
IPE 100 S275	I1	387	T Amb.	-	31,84*	-	-	-	-	-	-	-	-
	I2	387	T.Amb.	-	31,84*	-	-	-	-	-	-	-	-
	I3	387	ISO834	30%	5,34	-	-	-	-	663,78	745,56	751,20	1156
	I4	387	ISO834	50%	9,18	-	-	-	-	584,67	562,96	684,47	749
	I5	387	ISO834	70%	12,94	-	-	-	-	525,78	473,19	659,01	632
	I6	387	ISO834	30%	5,34	974	193	1253	445	663,78	-	722,71	2505
	I7	387	ISO834	30%	5,34	975	170	1287	576	663,78	-	727,57	2570
	I8	387	ISO834	50%	9,18	1012	185	1342	560	584,67	-	701,02	2331
	I9	387	ISO834	50%	9,18	1055	202	1528	490	584,67	-	701,88	2467
	I10	387	ISO834	70%	12,94	998	148	1268	653	525,78	-	695,31	2341
	I11	387	ISO834	70%	12,94	989	193	1360	501	525,78	-	690,21	2295
	I12	387	ISO834	50%	9,18	1824	156	2140	1440	584,67	-	676,52	2867
	I13	387	ISO834	50%	9,18	1832	194	2270	1440	584,67	-	747,46	3127
SHS 100x100x 4 S235	S1	250	T.Amb.	-	42,98*	-	-	-	-	-	-	-	-
	S2	250	T.Amb.	-	42,98*	-	-	-	-	-	-	-	-
	S3	250	ISO834	30%	13,62	-	-	-	-	663,78	766,13	722,56	1032
	S4	250	ISO834	50%	22,25	-	-	-	-	584,67	583,56	641,95	693
	S5	250	ISO834	70%	30,09	-	-	-	-	525,78	492,36	594,02	573
	S6	250	ISO834	30%	13,62	1105	115	1310	854	663,78	-	687,79	2444
	S7	250	ISO834	30%	13,62	1094	113	1338	777	663,78	-	685,53	2411
	S8	250	ISO834	50%	22,25	1141	100	1309	944	584,67	-	617,08	2060
	S9	250	ISO834	50%	22,25	1141	104	1350	909	584,67	-	608,73	2047
	S10	250	ISO834	70%	30,09	1144	114	1482	886	525,78	-	555,69	1812
	S11	250	ISO834	70%	30,09	1131	92	1270	854	525,78	-	562,24	1836
	S12	250	ISO834	50%	22,25	1932	112	2210	1730	584,67	-	651,64	1967
	S13	250	ISO834	50%	22,25	1933	144	2310	1700	584,67	-	Sem colapso	

RESISTÊNCIA AO FOGO DE VIGAS COM E SEM PROTEÇÃO DE TINTA INTUMESCENTE—TESTES À ESCALA REAL COM CARGA

- Resistência ao fogo de vigas sujeita a flexão em 3 pontos (protegidas)
 - Perfis CHS 101x4 (S235) e LNP 100x50x8 (S275)



Grupo/ Seccção	Teste nº	Ap/V [m ⁻¹]	Sol. Térmica	Nível de carga	Q [kN]	dp [µm]				Resist. EC3		Resist. Exp.	
						DFT	Desv. Pad.	Máx.	Mín.	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]
CHS 101,6x4,0 5 S235	C1	246,9	T.Amb.	-	29,37*	-	-	-	-	-	-	-	-
	C2	246,9	T.Amb.	-	29,37*	-	-	-	-	-	-	-	-
	C3	246,9	ISO834	30%	9,31	-	-	-	-	663,78	769,61	602,27	540
	C4	246,9	ISO834	50%	15,20	-	-	-	-	584,67	587,01	499,42	376
	C5	246,9	ISO834	70%	20,56	-	-	-	-	525,78	495,56	255,64	164
	C6	246,9	ISO834	30%	9,31	997	114	1270	800	663,78	-	560,26	1414
	C7	246,9	ISO834	30%	9,31	1004	111	1187	818	663,78	-	562,23	1861
	C8	246,9	ISO834	50%	15,20	1026	143	1330	770	584,67	-	Sem colapso	
	C9	246,9	ISO834	50%	15,20	1006	93	1140	810	584,67	-	472,24	1144
	C10	246,9	ISO834	70%	20,56	1071	143	1306	754	525,78	-	169,12	146
	C11	246,9	ISO834	50%	20,56	1120	178	1439	785	525,78	-	490,75	1411
	C12	246,9	ISO834	50%	15,20	1896	200	2190	1490	584,67	-	563,47	1378
	C13	246,9	ISO834	50%	15,20	1807	210	2270	1430	584,67	-	512,00	1261
LNP 100x50x8 S275	L1	264	T.Amb.	-	21,69*	-	-	-	-	-	-	-	-
	L2	264	T.Amb.	-	21,69*	-	-	-	-	-	-	-	-
	L3	264	ISO834	30%	5,84	-	-	-	-	663,78	766,13	822,55	1743
	L4	264	ISO834	50%	9,83	-	-	-	-	584,67	583,56	761,68	1297
	L5	264	ISO834	70%	13,61	-	-	-	-	525,78	492,36	745,66	1210
	L6	264	ISO834	30%	5,84	1041	91	1205	898	663,78	-	983,42	4692
	L7	264	ISO834	30%	5,84	1026	107	1309	850	663,78	-	1015,19	4655
	L8	264	ISO834	50%	9,83	1053	108	1318	898	584,67	-	747,38	3382
	L9	264	ISO834	50%	9,83	1063	96	1271	825	584,67	-	760,49	3533
	L10	264	ISO834	70%	13,61	1135	118	1420	882	525,78	-	756,97	3801
	L11	264	ISO834	70%	13,61	1114	110	1377	953	525,78	-	600,68	1937

RESISTÊNCIA AO FOGO DE VIGAS COM E SEM PROTEÇÃO DE TINTA INTUMESCENTE— TESTES À ESCALA REAL COM CARGA

- Para a mesma espessura de proteção, a temperatura crítica e o tempo de resistência ao fogo diminui com o aumento do grau de utilização (nível de carga).
- Os resultados experimentais da secção LNP representam um tempo de resistência superior a duas vezes o determinado pelo eurocódigo 3 parte 1-2.

Grupo/ Secção	Teste nº	Ap/V [m ²]	Sol. Térmica	Nível carga	Q [kN]	DFT		Resist. EC3		Resist. Exp.	
						[mm]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	
IPE 100 S275	I1	387	T.Amb.	-	31,84*	-	-	-	-	-	-
	I2	387	T.Amb.	-	31,84*	-	-	-	-	-	-
	I3	387	ISO834	30%	5,34	-	663,78	12	751,20	19	-
	I4	387	ISO834	50%	9,18	-	584,67	9	684,47	12	-
	I5	387	ISO834	70%	12,94	-	525,78	7	659,01	10	-
	I6	387	ISO834	30%	5,34	974	663,78	-	722,71	41	-
	I7	387	ISO834	30%	5,34	975	663,78	-	727,57	42	-
	I8	387	ISO834	50%	9,18	1012	584,67	-	701,02	38	-
	I9	387	ISO834	50%	9,18	1055	584,67	-	701,88	41	-
	I10	387	ISO834	70%	12,94	998	525,78	-	695,31	39	-
	I11	387	ISO834	70%	12,94	989	525,78	-	690,21	38	-
	I12	387	ISO834	50%	9,18	1824	584,67	-	676,52	47	-
	I13	387	ISO834	50%	9,18	1832	584,67	-	747,46	52	-
SHS 100x100x4 S235	S1	250	T.Amb.	-	42,98*	-	-	-	-	-	-
	S2	250	T.Amb.	-	42,98*	-	-	-	-	-	-
	S3	250	ISO834	30%	13,62	-	663,78	12	722,56	17	-
	S4	250	ISO834	50%	22,25	-	584,67	9	641,95	11	-
	S5	250	ISO834	70%	30,09	-	525,78	8	594,02	9	-
	S6	250	ISO834	30%	13,62	1105	663,78	-	687,79	40	-
	S7	250	ISO834	30%	13,62	1094	663,78	-	685,53	40	-
	S8	250	ISO834	50%	22,25	1141	584,67	-	617,08	34	-
	S9	250	ISO834	50%	22,25	1141	584,67	-	608,73	34	-
	S10	250	ISO834	70%	30,09	1144	525,78	-	555,69	30	-
	S11	250	ISO834	70%	30,09	1131	525,78	-	562,24	30	-
	S12	250	ISO834	50%	22,25	1932	584,67	-	651,64	32	-
	S13	250	ISO834	50%	22,25	1933	584,67	-	Sem colapso	-	-

Grupo/ Secção	Teste nº	Ap/V [m ²]	Sol. Térmica	Nível carga	Q [kN]	DFT		Resist. EC3		Resist. Exp.	
						[mm]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	
CHS 101,6x4,05 S235	C1	246,9	T.Amb.	-	29,37*	-	-	-	-	-	-
	C2	246,9	T.Amb.	-	29,37*	-	-	-	-	-	-
	C3	246,9	ISO834	30%	9,31	-	663,78	12	602,27	9	-
	C4	246,9	ISO834	50%	15,20	-	584,67	9	499,42	6	-
	C5	246,9	ISO834	70%	20,56	-	525,78	8	255,64	2	-
	C6	246,9	ISO834	30%	9,31	997	663,78	-	560,26	23	-
	C7	246,9	ISO834	30%	9,31	1004	663,78	-	562,23	31	-
	C8	246,9	ISO834	50%	15,20	1026	584,67	-	Sem colapso	-	-
	C9	246,9	ISO834	50%	15,20	1006	584,67	-	472,24	19	-
	C10	246,9	ISO834	70%	20,56	1071	525,78	-	169,12	2	-
	C11	246,9	ISO834	50%	20,56	1120	525,78	-	490,75	23	-
	C12	246,9	ISO834	50%	15,20	1896	584,67	-	563,47	22	-
	C13	246,9	ISO834	50%	15,20	1807	584,67	-	512,00	21	-
LNP 100x50x8 S275	L1	264	T.Amb.	-	21,69*	-	-	-	-	-	-
	L2	264	T.Amb.	-	21,69*	-	-	-	-	-	-
	L3	264	ISO834	30%	5,84	-	663,78	12	822,55	29	-
	L4	264	ISO834	50%	9,83	-	584,67	9	761,68	21	-
	L5	264	ISO834	70%	13,61	-	525,78	8	745,66	20	-
	L6	264	ISO834	30%	5,84	1041	663,78	-	983,42	78	-
	L7	264	ISO834	30%	5,84	1026	663,78	-	1015,19	77	-
	L8	264	ISO834	50%	9,83	1053	584,67	-	747,38	56	-
	L9	264	ISO834	50%	9,83	1063	584,67	-	760,49	58	-
	L10	264	ISO834	70%	13,61	1135	525,78	-	756,97	63	-
	L11	264	ISO834	70%	13,61	1114	525,78	-	600,68	32	-



RESISTÊNCIA AO FOGO DE VIGAS SEM PROTEÇÃO – TESTES À ESCALA REAL COM CARGA

- Ensaio ao fogo sem proteção:

- Critério de resistência ao fogo (antes de 2012):
 - Deslocamento a meio vão e taxa de deslocamento

$$D = L^2 / 400d$$

$$dD/dt = L^2 / 9000d \text{ [mm / min]}, (D \geq L/30)$$

- Critério de resistência ao fogo (depois de 2012):

- Deslocamento a meio vão ou taxa de deslocamento.

$$D = L^2 / 400d$$

$$dD/dt = L^2 / 9000d \text{ [mm / min]}$$

- Ensaio ao fogo sem proteção:

- Comparação entre os resultados experimentais e os obtidos pelo método simplificado do Eurocódigo 3 parte 1.2.

- A temperatura crítica é determinada por:

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \ln \left[\frac{I}{0,9674 \mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482$$

- O tempo de resistência ao fogo é determinado pela equação:

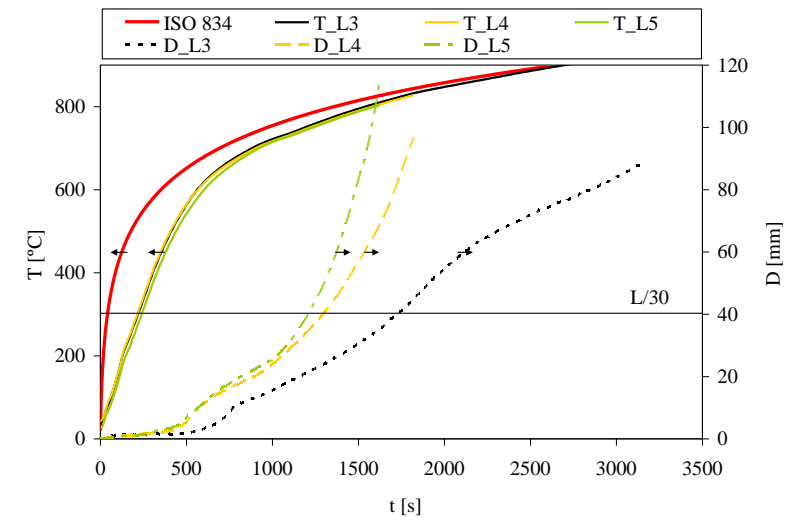
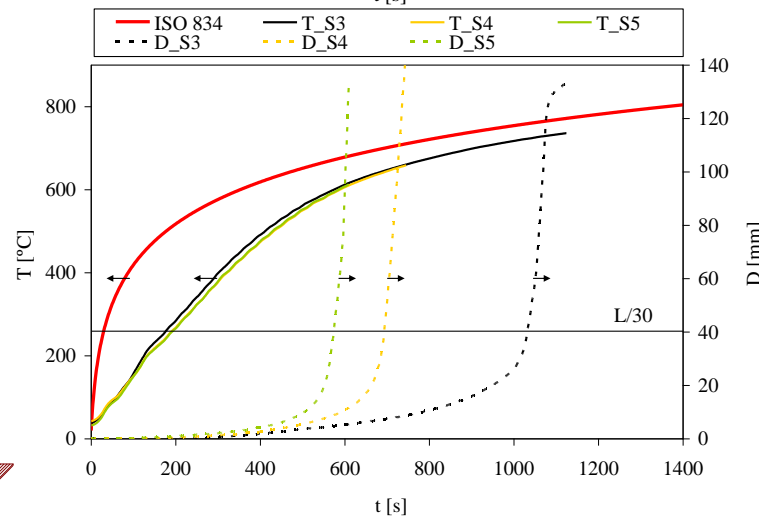
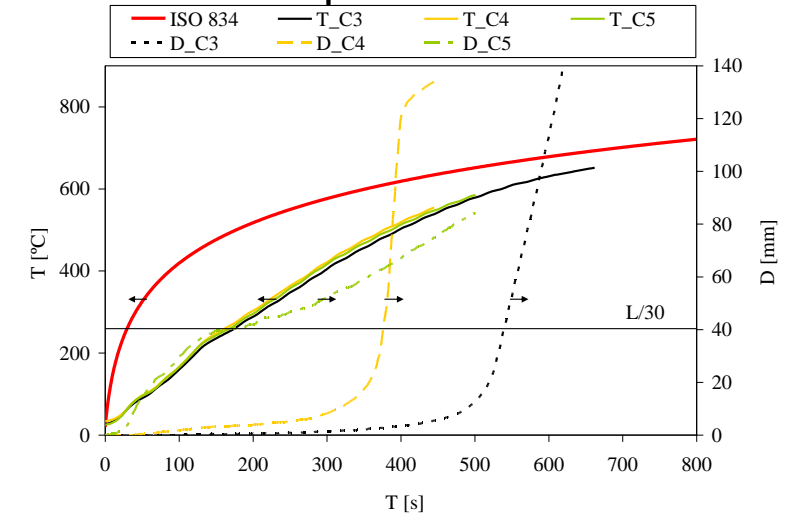
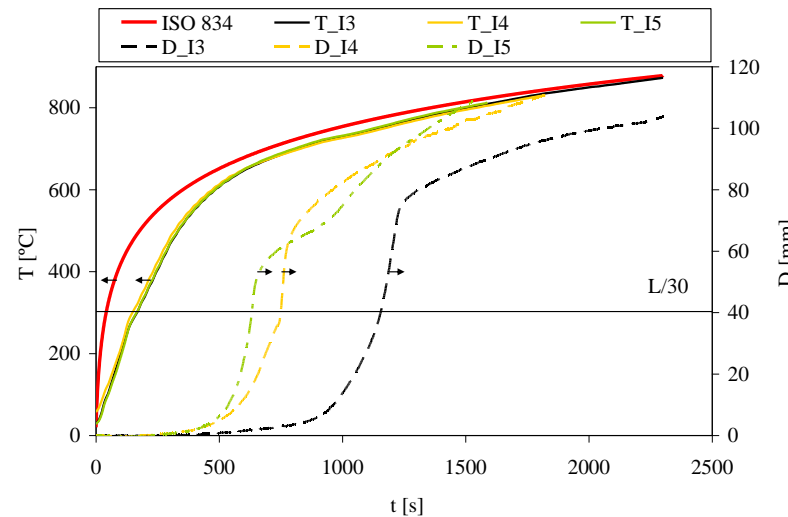
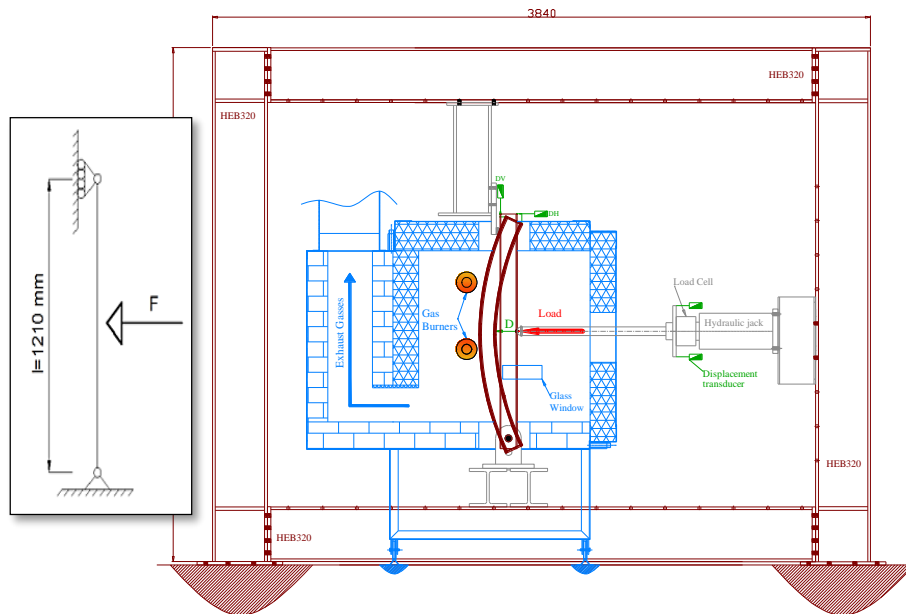
$$\Delta \theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m / V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net,d} \Delta t$$

		Wpl [mm³]x10³	fy [MPa]	Grau Utilização %			Tcr (EC3)			Tcr (Exp.) / t cr (min) (média do Perfil) (antes de 2012)		
				30	50	70						
IPE	Nom	39,40	275	30	50	70	663,78	584,67	525,78	751,20/19	684,47/12	659,01/10
	Real	40,46	302,47	29,17	47,71	64,38	668,02	592,17	541,72			
SHS	Nom	55,33	235	30	50	70	663,78	584,67	525,78	722,56/17	641,95/11	594,02/9
	Real	58,24	352	20,10	32,82	44,40	724,15	659,07	610,82			
CHS	Nom	37,80	235	30	50	70	663,78	584,67	525,78	602,27/9	499,42/6	255,64/2
	Real	34,25	200,99	40,89	66,77	90,32	625,45	536,21	443,98			
L	Nom	30,68	275	30	50	70	663,78	584,67	525,78	822,55/29	761,68/21	745,66/20
	Real	32,21	311,22	29,17	47,71	64,38	668,02	592,17	541,72			



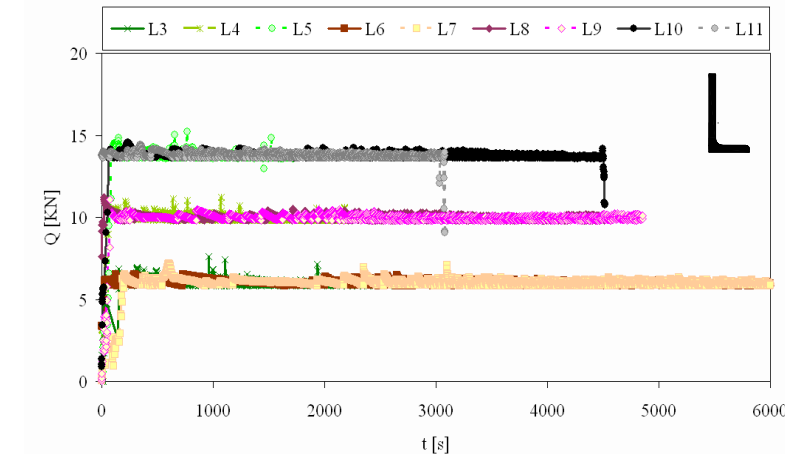
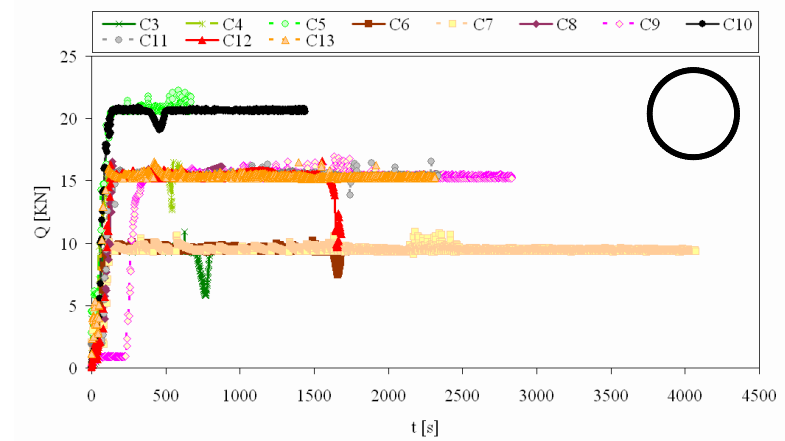
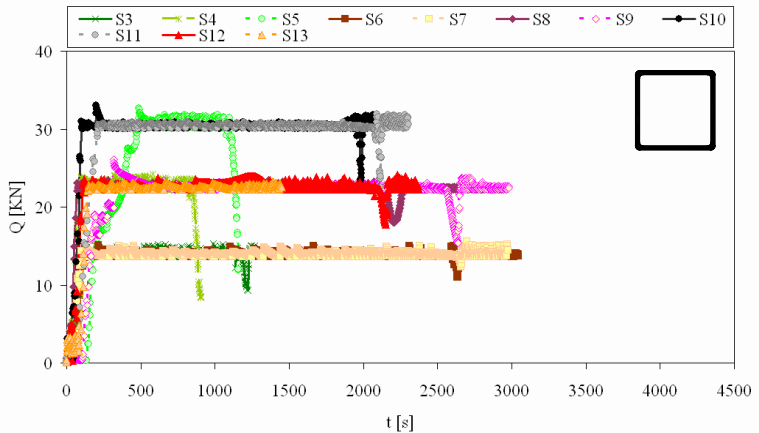
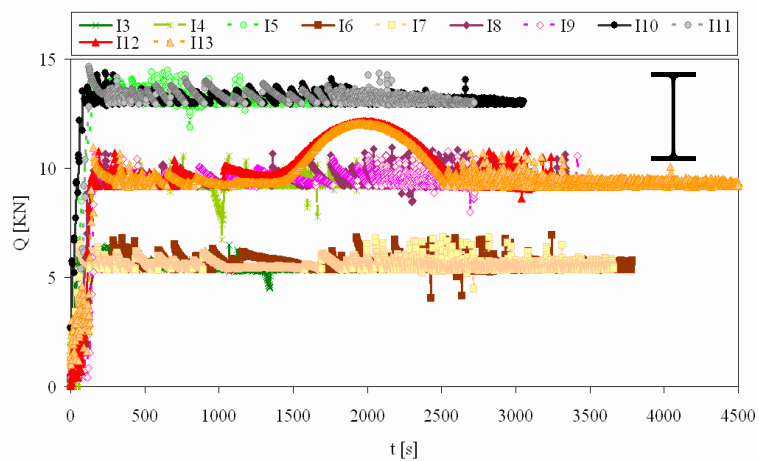
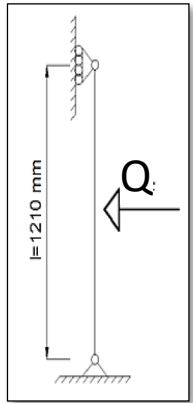
RESISTÊNCIA AO FOGO DE VIGAS SEM PROTEÇÃO – TESTES À ESCALA REAL COM CARGA

- Resultados do ensaio das viga em flexão, em situação de incêndio sem proteção.
- Variação da temperatura média do perfil e do deslocamento a meio vão com o tempo.



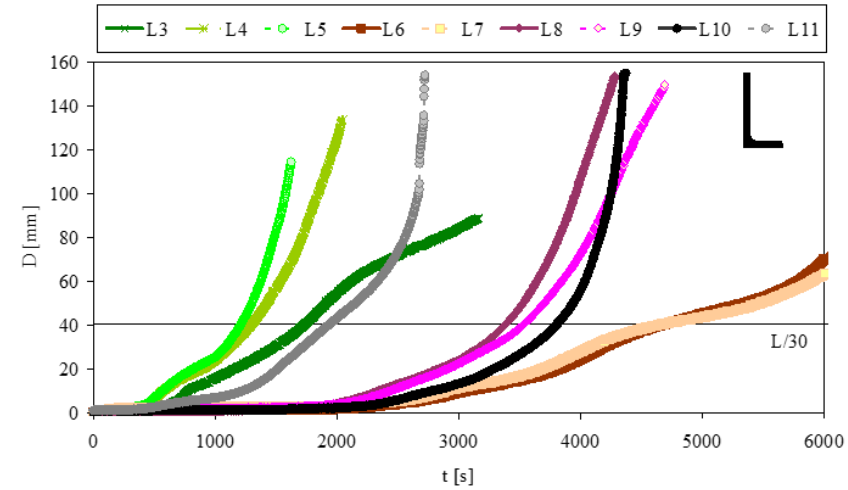
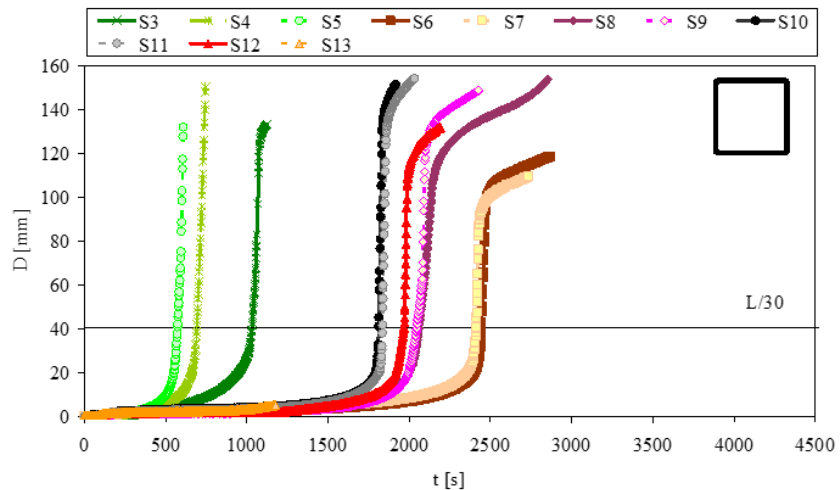
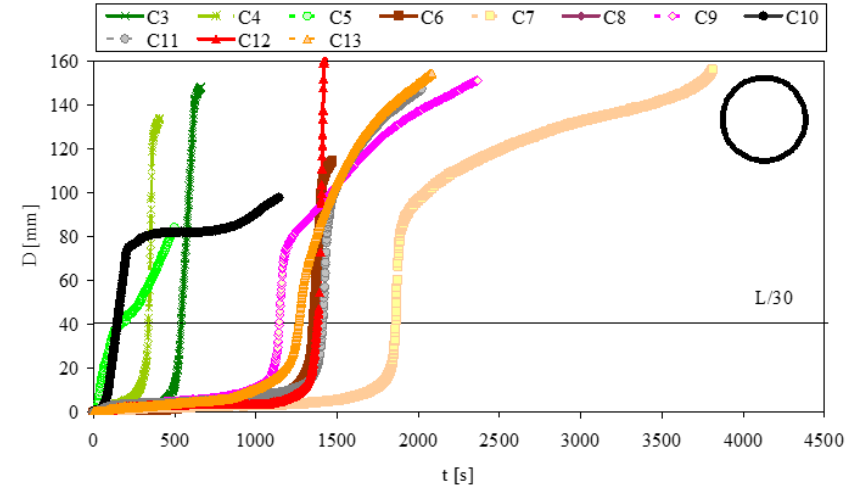
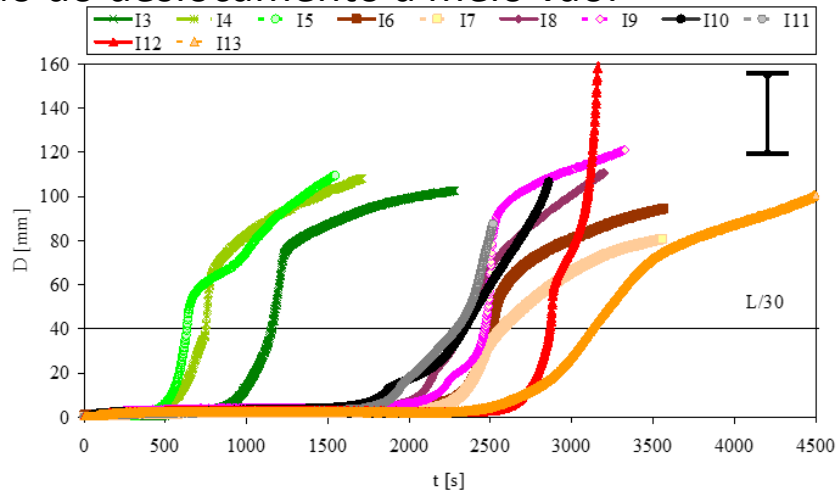
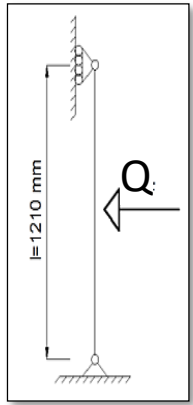
RESISTÊNCIA AO FOGO DE VIGAS COM PROTEÇÃO DE TINTA INTUMESCENTE – TESTES À ESCALA REAL COM CARGA

- Resultados do ensaio das viga em flexão, em situação de incêndio com proteção
 - Histograma de carga aplicada nos ensaios (constante até atingir estado limite último).



RESISTÊNCIA AO FOGO DE VIGAS COM PROTEÇÃO DE TINTA INTUMESCENTE – TESTES À ESCALA REAL COM CARGA

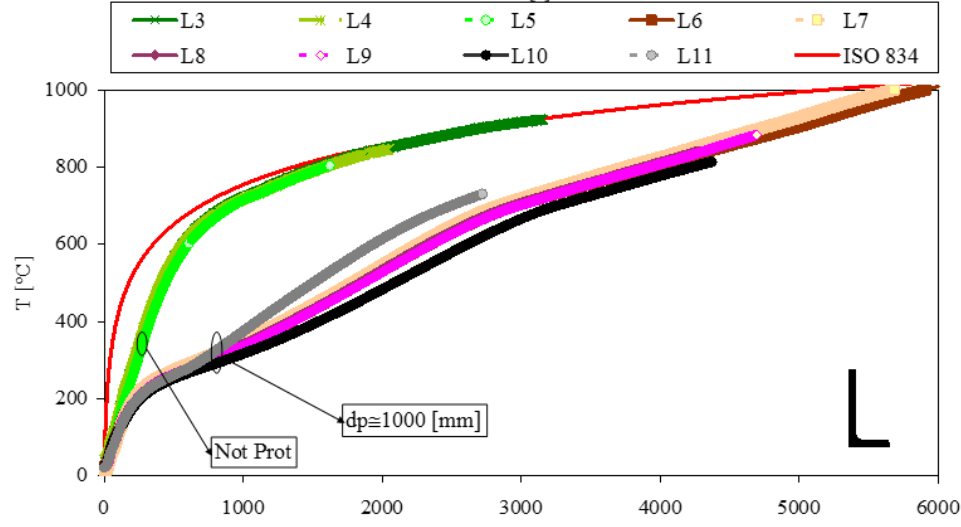
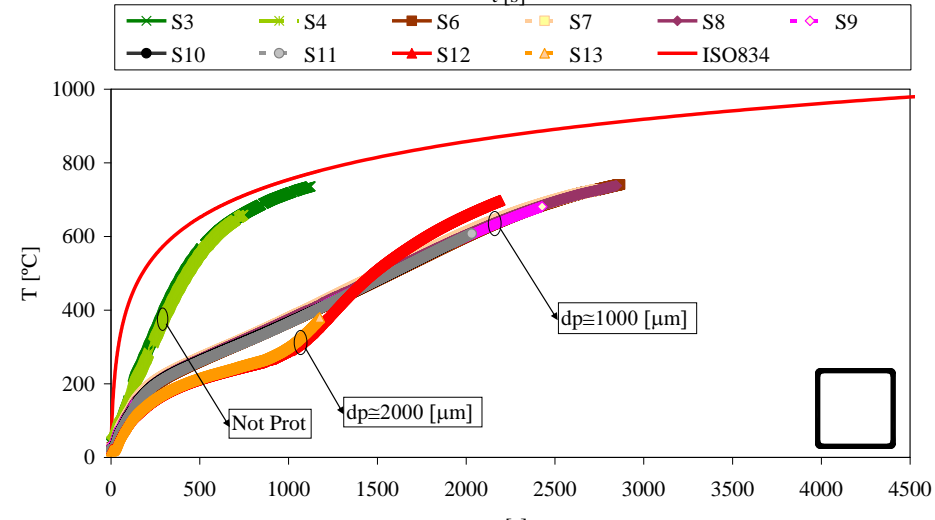
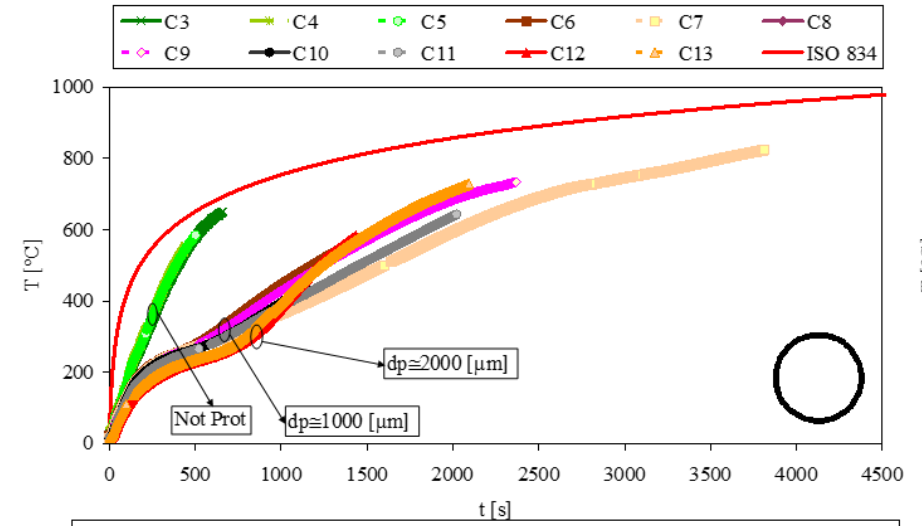
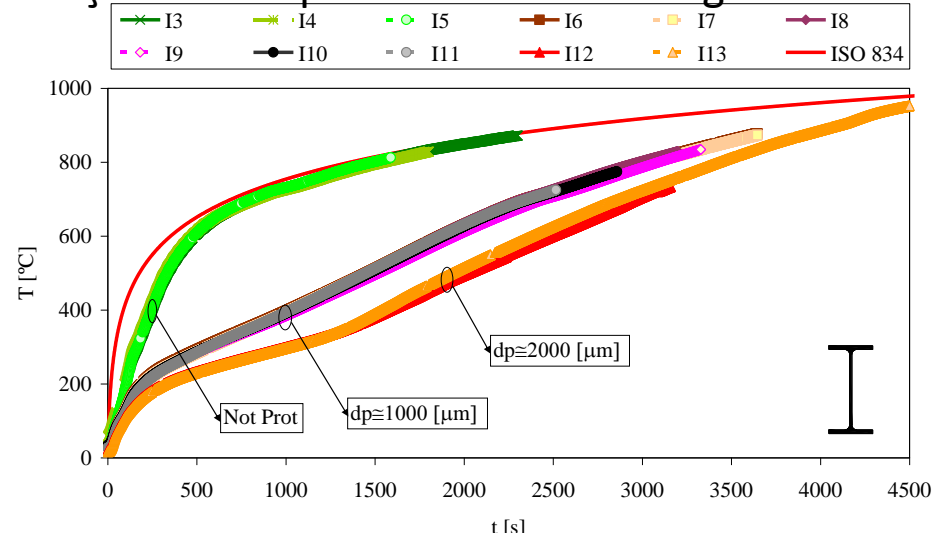
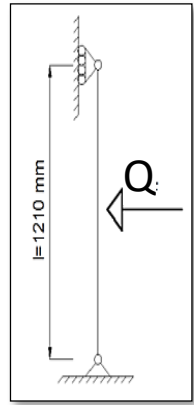
- Resultados do ensaio das viga em flexão, em situação de incêndio com proteção
- Evolução do deslocamento a meio vão.



RESISTÊNCIA AO FOGO DE VIGAS COM PROTEÇÃO DE TINTA INTUMESCENTE – TESTES À ESCALA REAL COM CARGA

• Resultados do ensaio das viga em flexão, em situação de incêndio com proteção

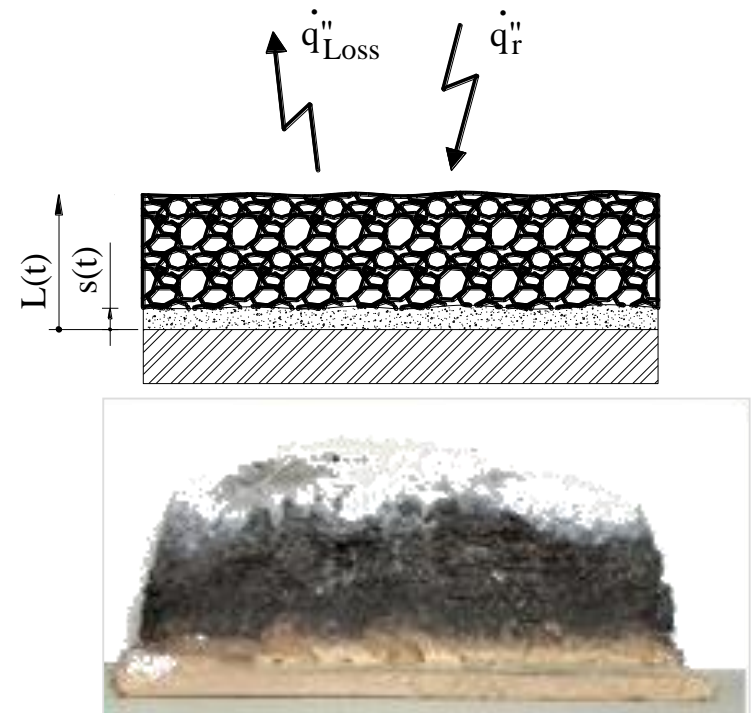
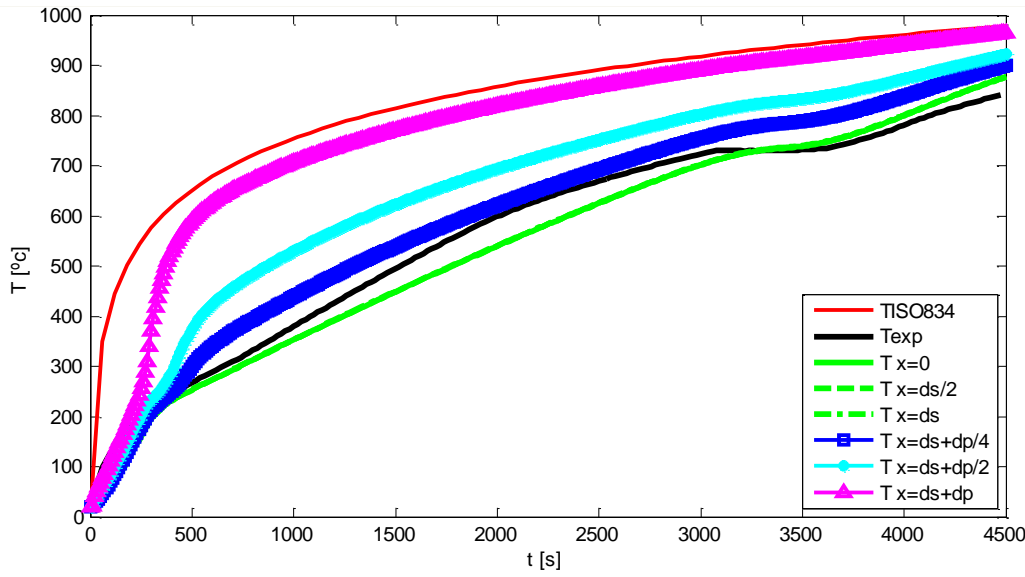
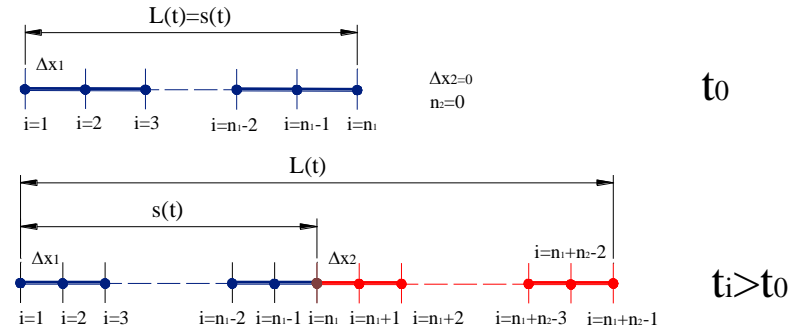
• Evolução da temperatura média da viga.



MODELAÇÃO NUMÉRICA DO INTUMESCENTE

- Validação do comportamento da reação do intumescente, governado por:

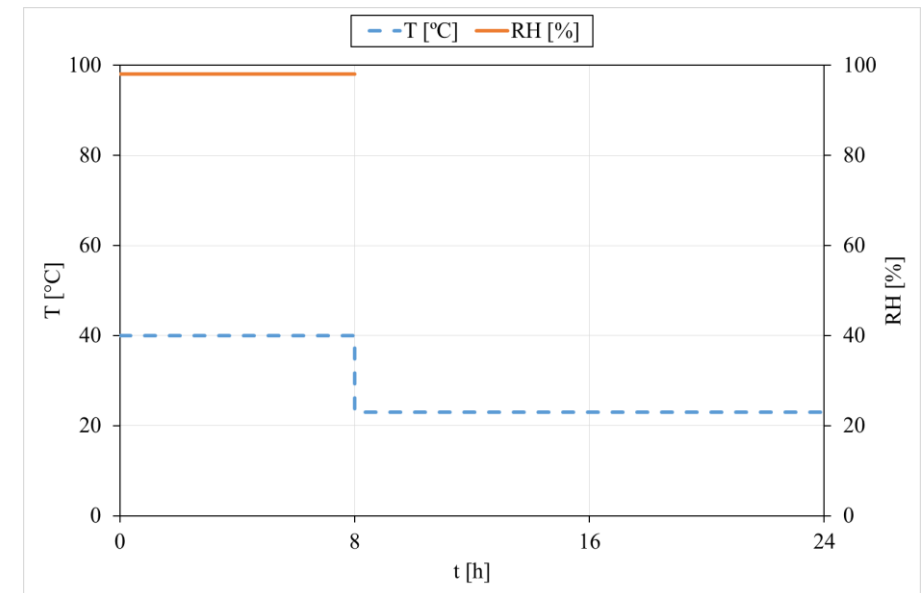
$$\frac{m_0}{A} \frac{\partial (Y_1 c_{p1} + Y_2 c_{p2} + Y_3 c_{p3} + Y_c c_{pc}) T}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_s \phi \Delta x c_{pg} T)}{\partial t} = \Delta x \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{m_0}{A} \sum_{i=1,2,3} \Delta h_i \left(- \frac{\partial Y_i}{\partial t} \right) - \Delta x \frac{\partial \rho_s u c_{pg} T}{\partial x}$$



TESTES DE ENVELHECIMENTO ACELERADO

- Exposição de elementos a um período cíclico de variação de temperatura, humidade e chuva (equivalente a 10 anos).
- De acordo com ETAG 018 PART 2, existem 4 condições de exposição ambiental:
 - Tipo X: Sistema de revestimento reativo destinado ao uso em todas as condições (interno, semi-exposto e exposto).
 - Tipo Y: Sistema de revestimento reativo destinado a uso em condições internas e semi-expostas. A semi-exposição inclui temperaturas abaixo de zero, mas nenhuma exposição à chuva e exposição limitada a UV (mas a UV não é avaliada).
 - **Tipo Z1: Sistema de revestimento reativo destinado a uso em condições internas com humidade relativa igual ou superior a 85%, excluindo temperaturas abaixo de 0 ° C.**
 - Tipo Z2: Sistema de revestimento reativo destinado ao uso em condições internas com humidade inferior a 85% UR, excluindo temperaturas abaixo de 0 ° C .

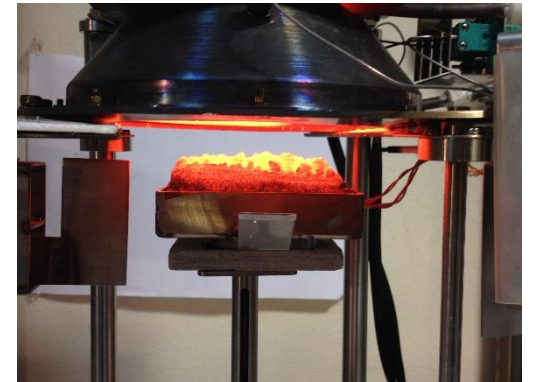
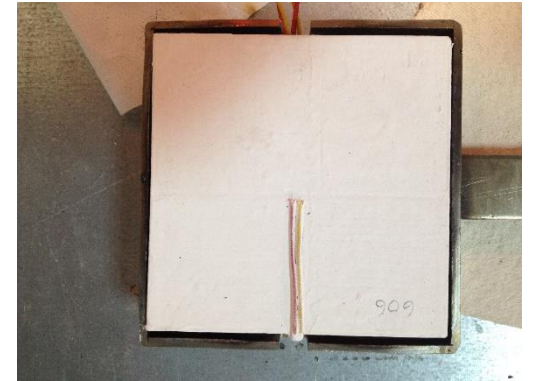
Ensaio Tipo Z1: Tempo	
8 horas	16 horas
40°C ± 3°C 98 % ± 2% RH	23°C ± 3°C



TESTES DE ENVELHECIMENTO ACELERADO

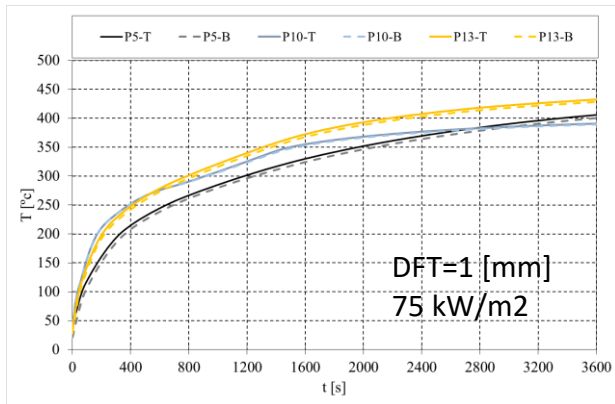
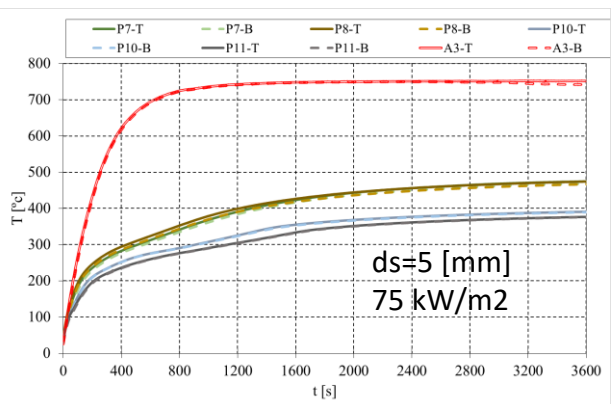
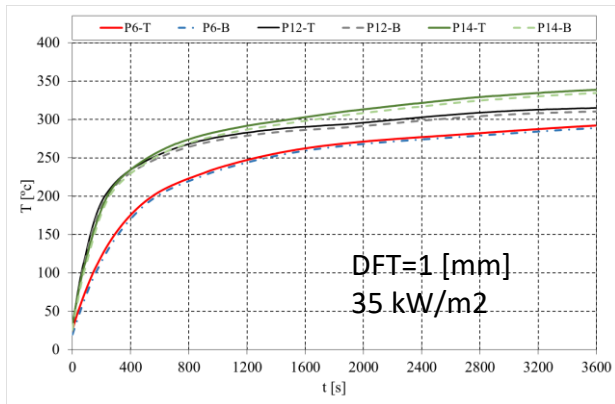
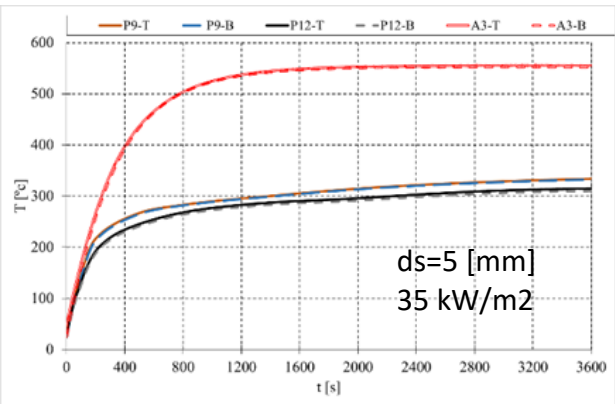
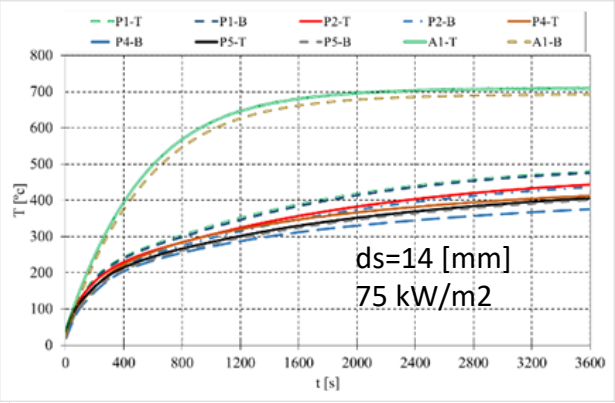
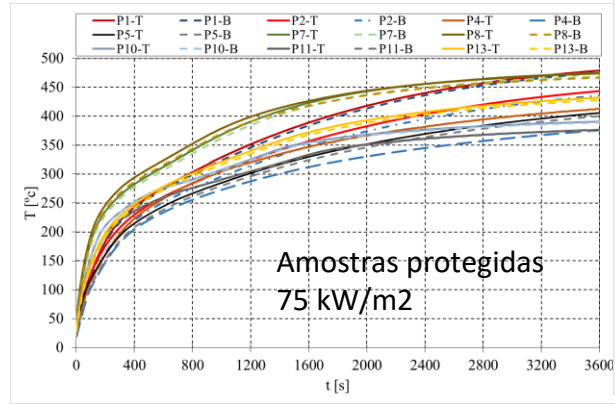
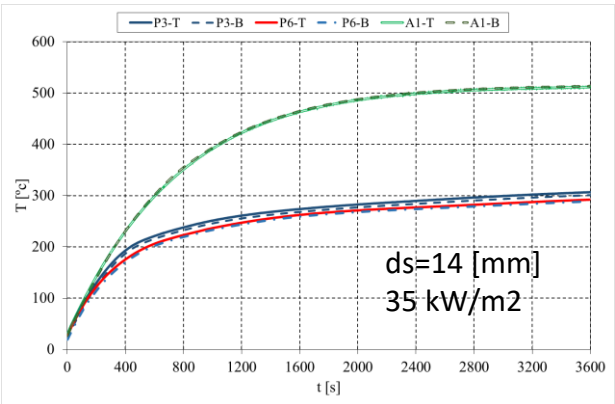
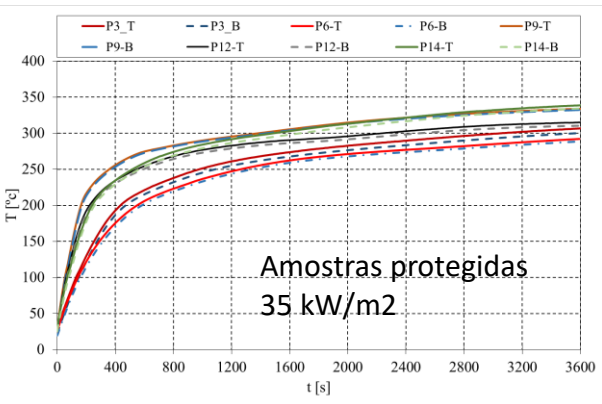
- Sem envelhecimento: Testes realizados em cone para fluxos de calor de 35 e 75 [kW/m²]

Amostras	Fluxo de calor[kw/m ²]	ds [mm]	Nominal DFT [μm]	$\bar{X} DFT$ [μm]	Massa inicial [g]
P1	75	14	500	483	1161.39
P2	75			606	1120.28
P3	35			628	1140.6
P4	75	14	1000	831	1155.73
P5	75			833	1127.6
P6	35			1107	1122.2
P7	75	5	500	751	407.9
P8	75			705	414.9
P9	35			589	449.6
P10	75	5	1000	1171	431.1
P11	75			1298	436.1
P12	35			886	512.8
P13	75	8	1000	943	639.7
P14	35			602	650.2
A1	75	14	--	--	1145.1
	35				
A2	75	8	--	--	636.7
	35				
A3	75	5	--	--	492.3
	35				



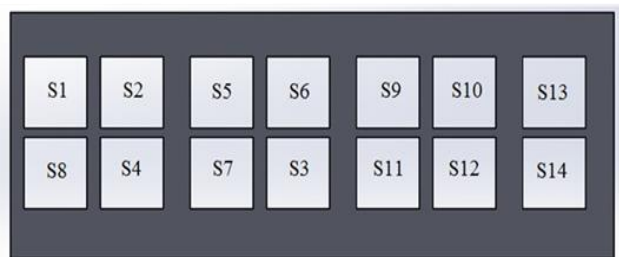
TESTES DE ENVELHECIMENTO ACELERADO

- Sem envelhecimento: Evolução da temperatura para testes realizados com fluxos de calor de 35 e 75 [kW/m²]

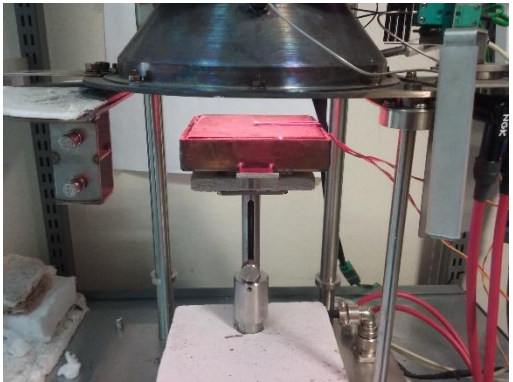


TESTES DE ENVELHECIMENTO ACELERADO

- Com envelhecimento:
 - Envelhecimento das amostras em câmara própria: Tipo Z1, 21 ciclos.
 - Testes realizados em calorímetro de cone para fluxos de calor de 35 e 75 [kW/m²]

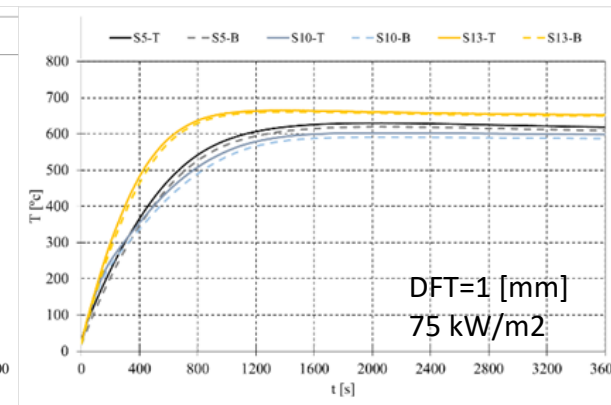
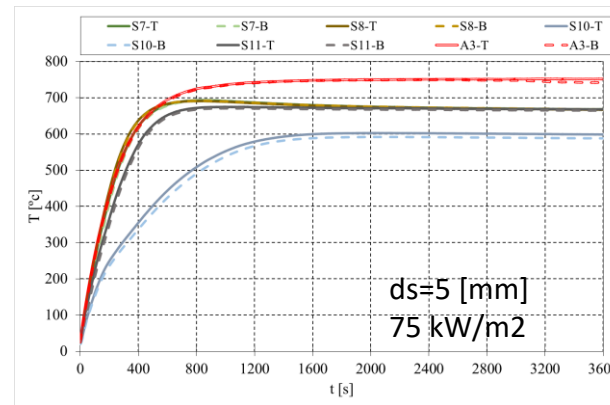
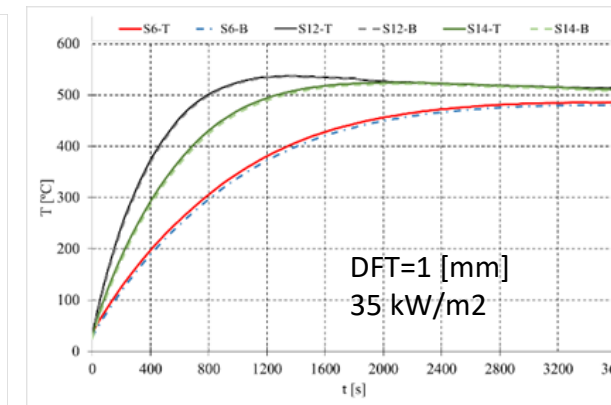
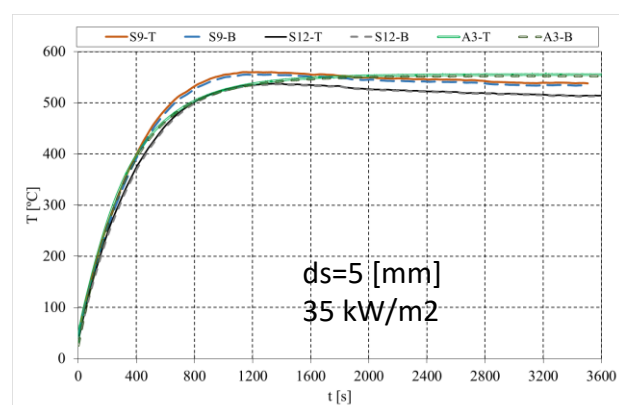
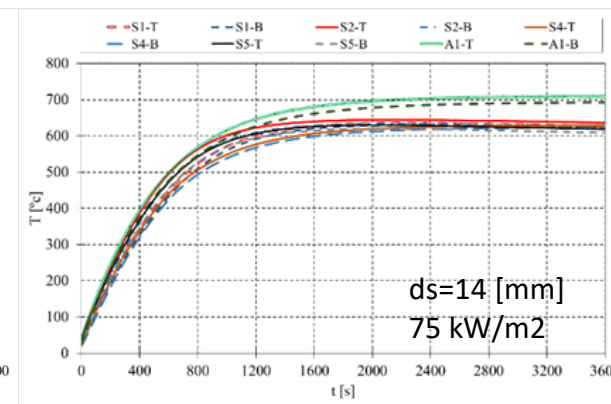
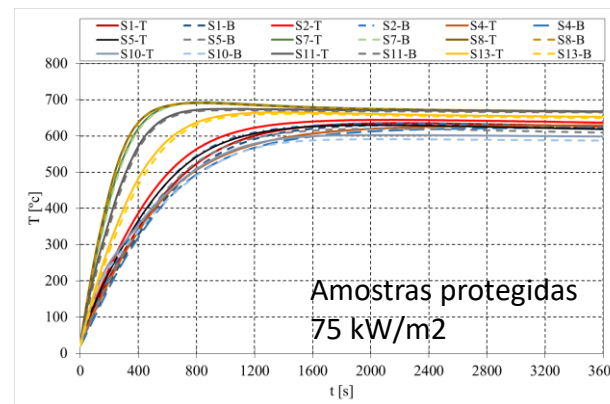
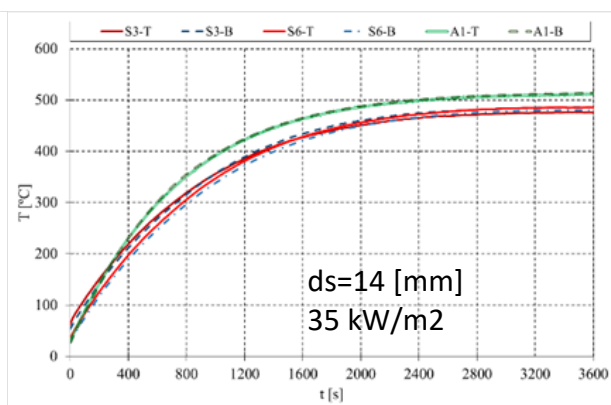
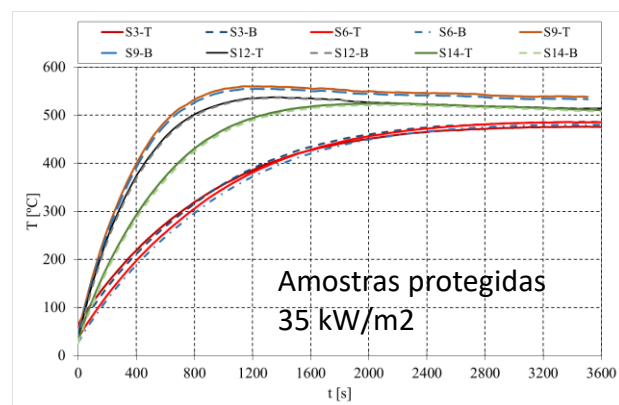


Amostras	Fluxo de calor [kW/m ²]	ds [mm]	Nominal DFT [μm]	X DFT [μm] inicial	X DFT [μm] Pós envelhecimento	Massa inicial [g]
S1	75			625	647	1149.3
S2	75	14	500	599	529	1134
S3	35			436	362	1155.3
S4	75			1359	*	1075.3
S5	75	14	1000	733	708	1166.8
S6	35			625	579	1158.7
S7	75			795	778	423.9
S8	75	5	500	712	696	407.2
S9	35			689	694	398.57
S10	75			1580	1990	429
S11	75	5	1000	1312	1530	419.6
S12	35			951	904	425.2
S13	75			947	994	650.4
S14	35	8	1000	752	695	648.8



TESTES DE ENVELHECIMENTO ACELERADO

- Com envelhecimento: Evolução da temperatura para testes realizados com fluxos de calor de 35 e 75 [kW/m²]



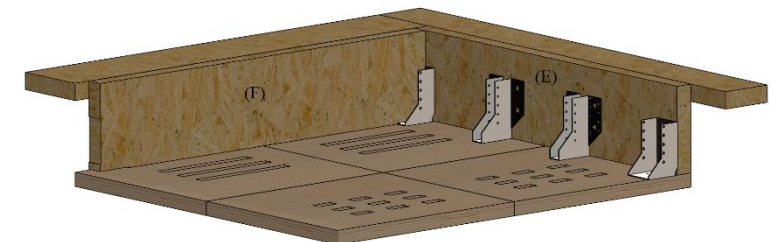
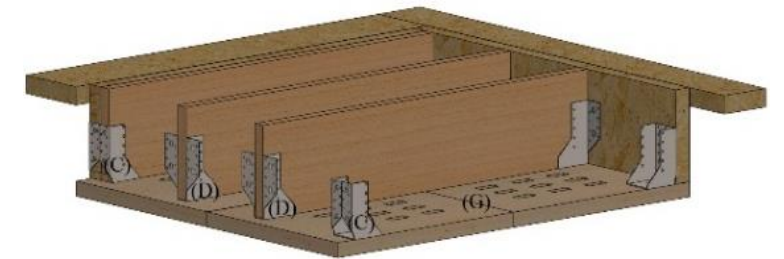
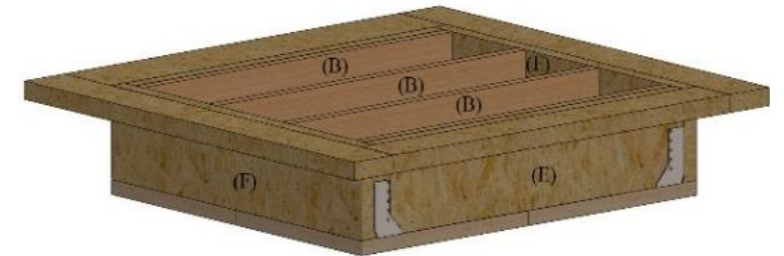
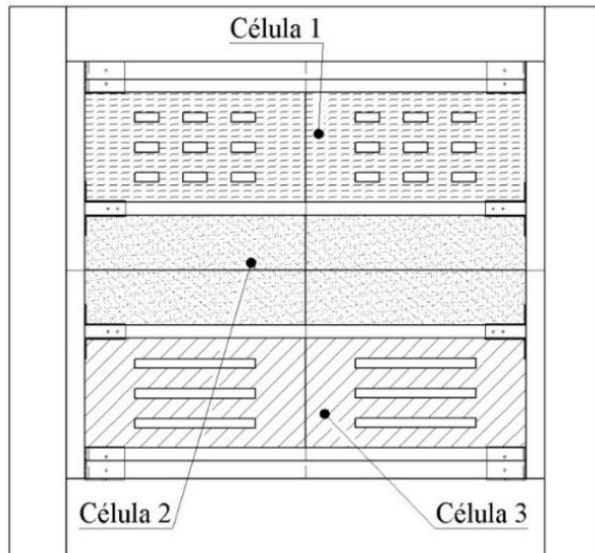
TESTES DE ENVELHECIMENTO ACELERADO

- O revestimento intumescente sofreu redução considerável do desempenho, após o teste de envelhecimento.
 - Por exemplo, a temperatura da chapa de aço da amostra S2 foi aumentada em cerca de 270 [° C] em comparação com a temperatura do aço de P2 com revestimento intumescente sem envelhecimento, para um tempo de exposição de 30 [min].
- O desenvolvimento da intumescência depende da espessura inicial do filme seco e do fluxo de calor incidente, mas as condições ambientais (envelhecimento 10 anos) prejudicam a capacidade de expansão do revestimento intumescente.



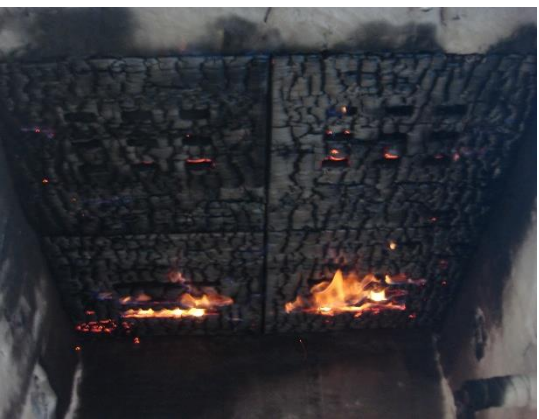
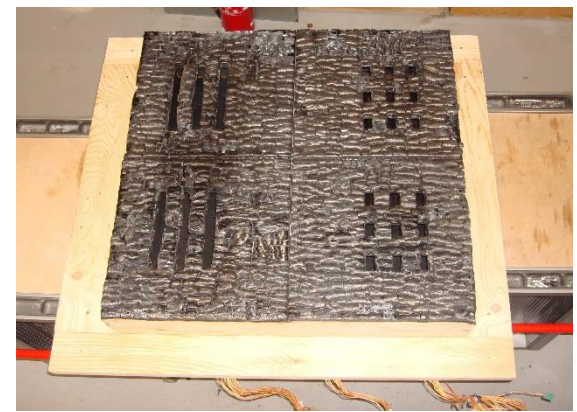
RESISTÊNCIA AO FOGO DE LAJES EM MADEIRA (ISOLAMENTO) - RECTANGULARES

- As lajes são constituídas por:
 - Placa de pavimento (superior).
 - Placa de teto (inferior) que contem as perfurações, ambas em painel tricapa.
 - Internamente possui quatro vigas (painel tricapa) que permitem a criação de 3 células independentes.
 - A armadura exterior possui 4 vigas Kerto S.
 - Célula 1=furação 50x20x9x2mm (18 000mm²), Célula 2= sem furação, Célula 3= furação 250x20x3x2mm (30 000mm²);



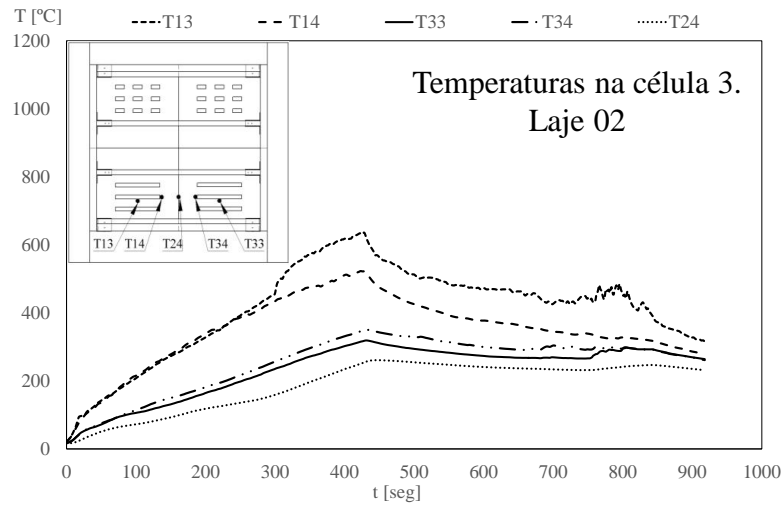
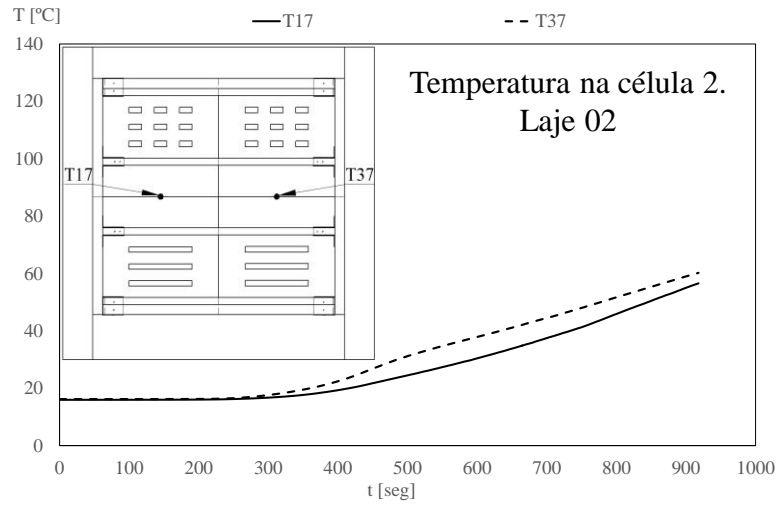
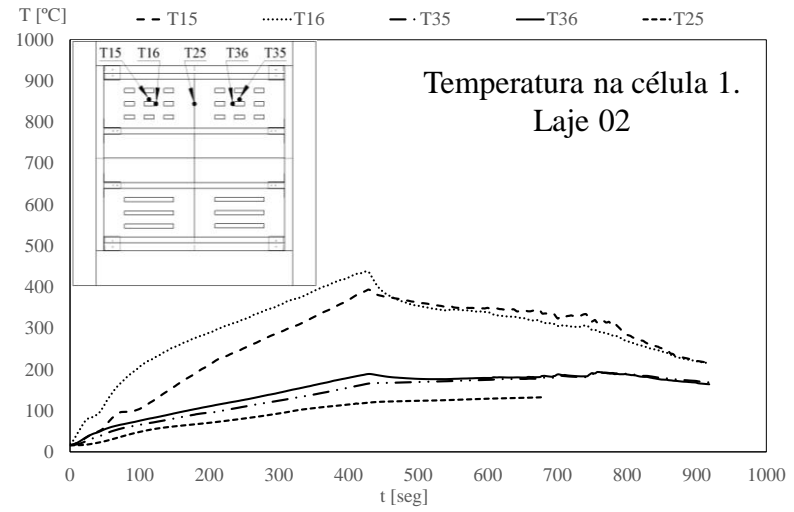
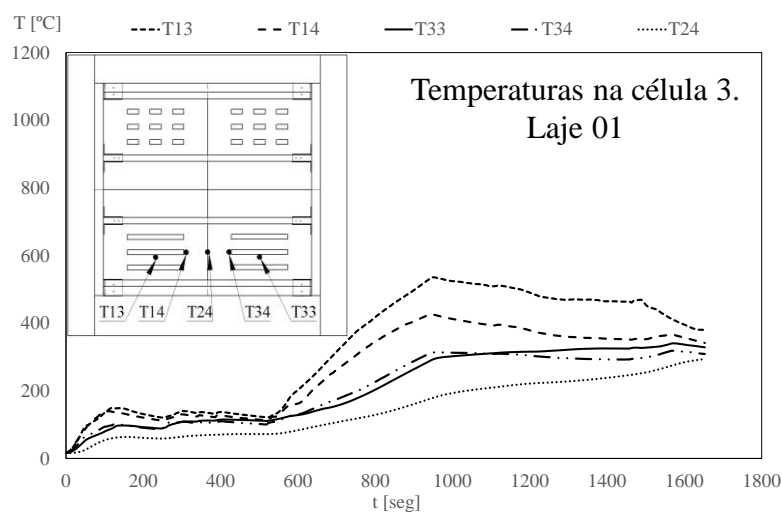
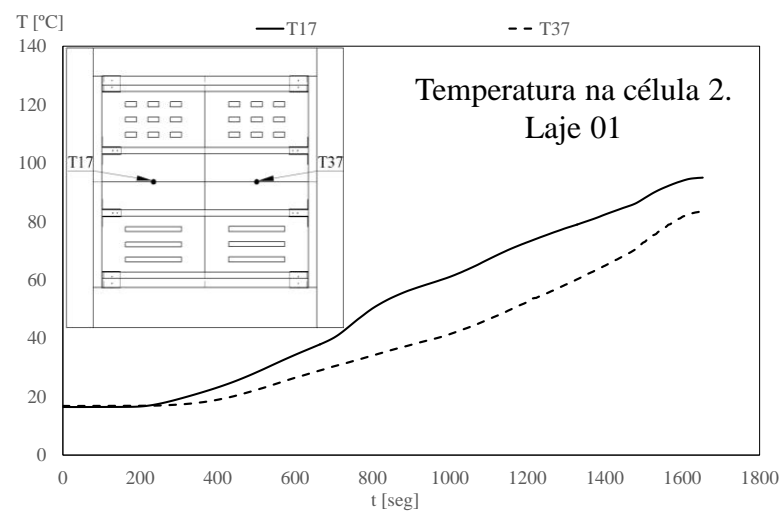
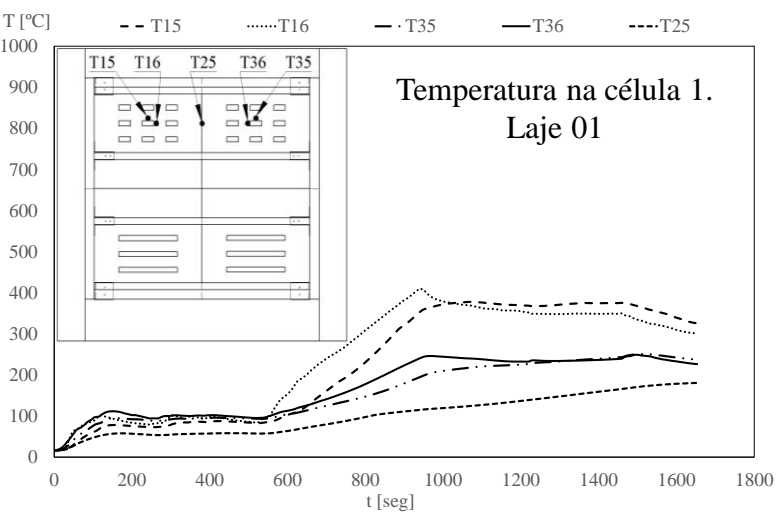
RESISTÊNCIA AO FOGO DE LAJES EM MADEIRA (ISOLAMENTO) - RECTANGULARES

- Teste de resistência ao fogo (isolamento): Controlo da temperatura na face não exposta



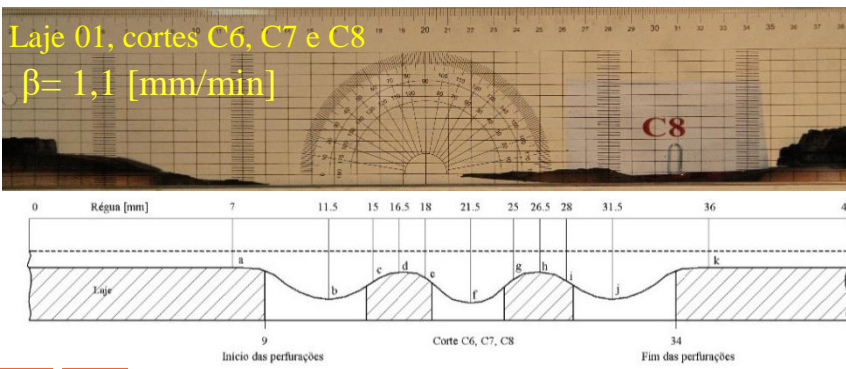
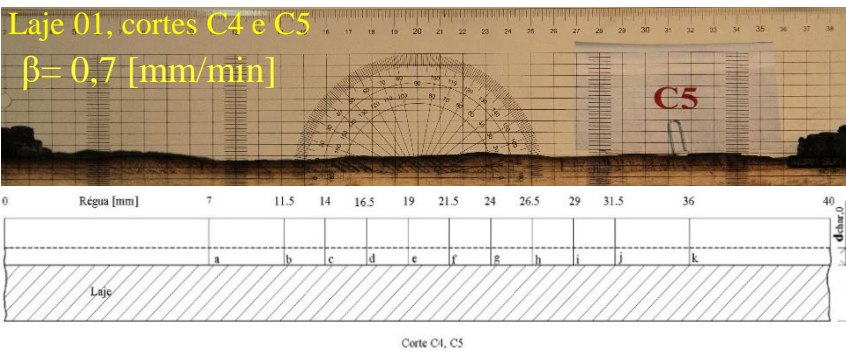
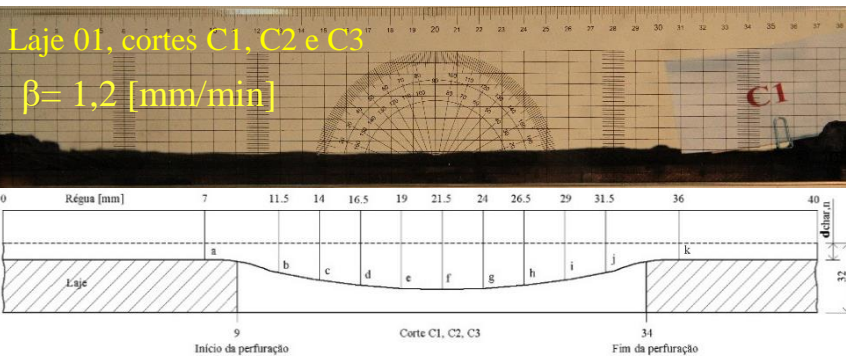
RESISTÊNCIA AO FOGO DE LAJES EM MADEIRA (ISOLAMENTO) - RECTANGULARES

- Temperatura nas 3 células das lajes.

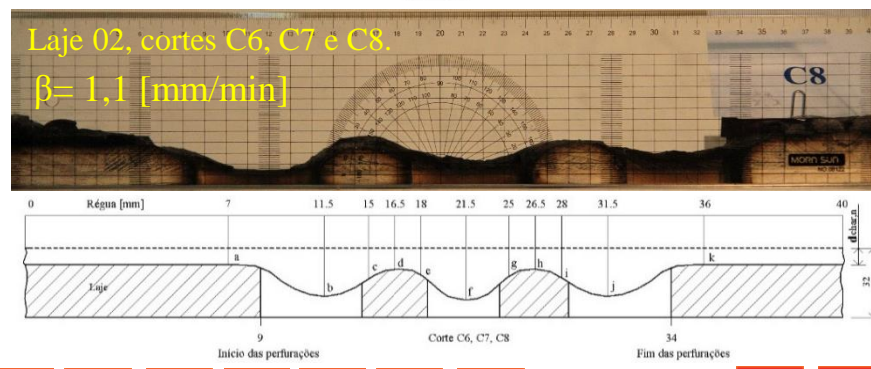
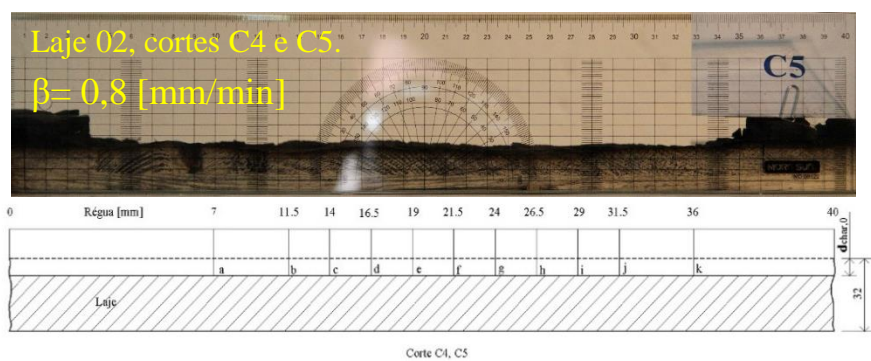
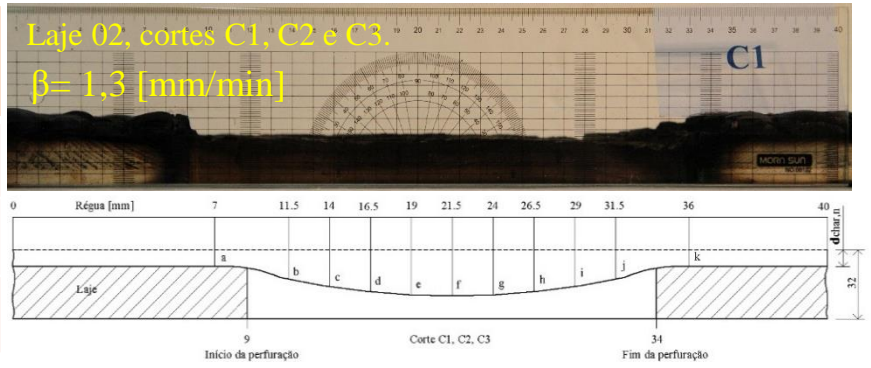


RESISTÊNCIA AO FOGO DE LAJES EM MADEIRA (ISOLAMENTO) - RECTANGULARES

- Velocidade de carbonização

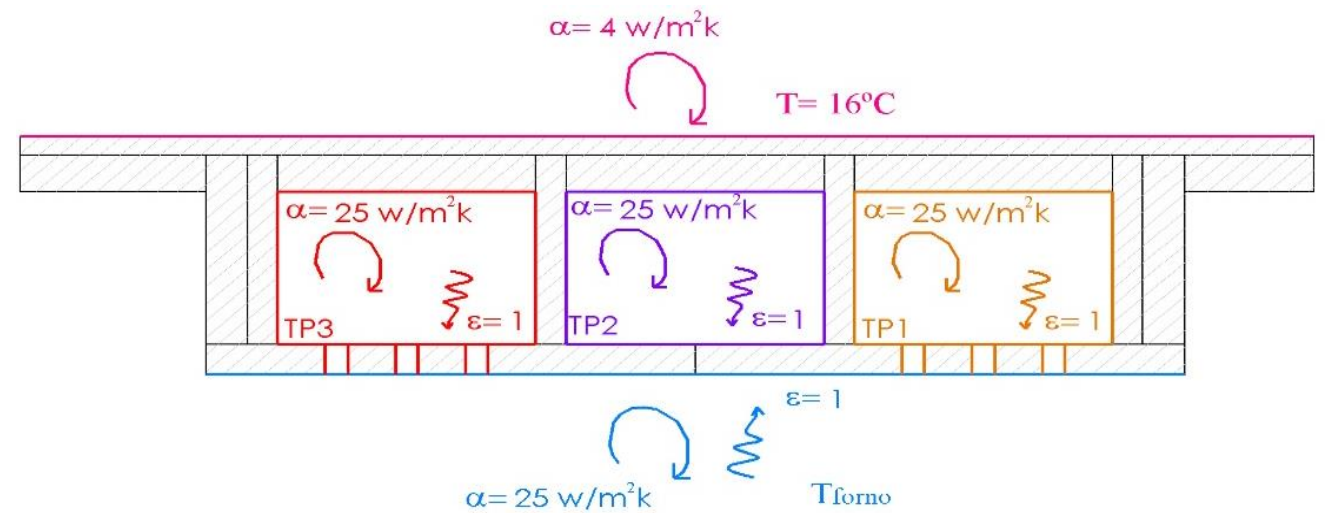
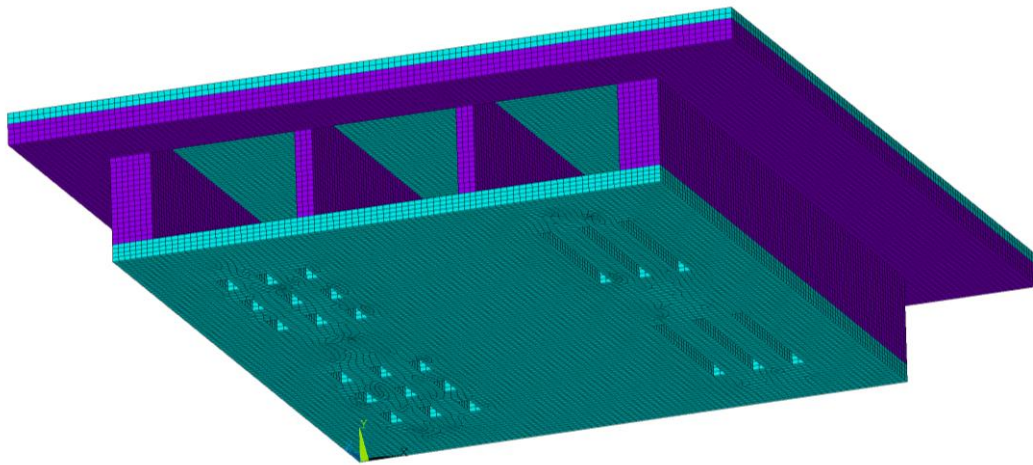


Célula	[mm/min] Laje 01 (EXP)	[mm/min] Laje 01 (NUM)	[mm/min] Laje 02 (EXP)	[mm/min] Laje 02 (NUM)
1	1.00	1.40	1.00	1.20
2	0.65	1.00	0.80	0.70
3	1.20	1.30	1.40	1.30



RESISTÊNCIA AO FOGO DE LAJES EM MADEIRA (ISOLAMENTO) – NUMÉRICO

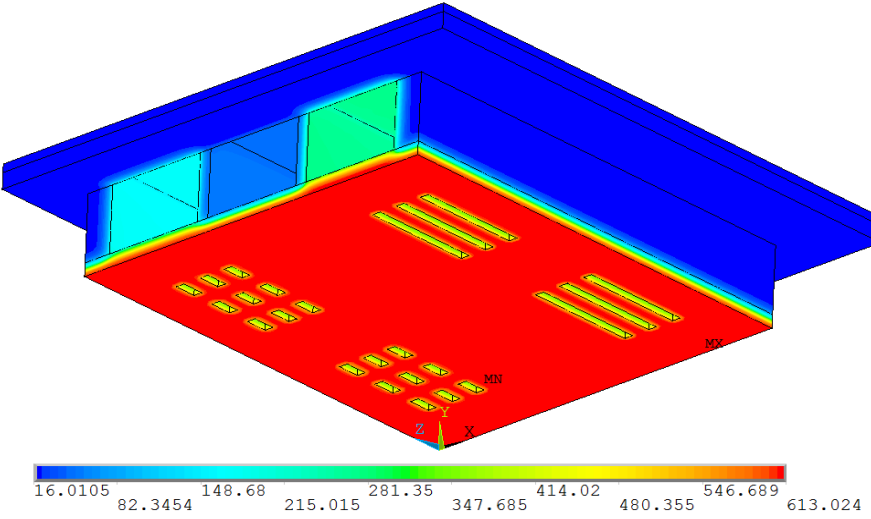
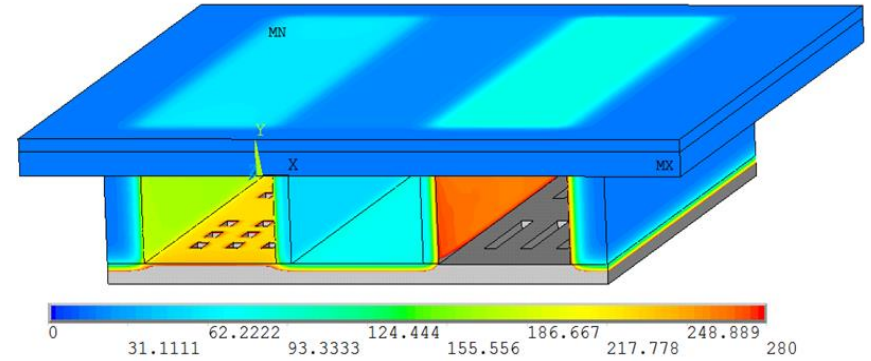
- Elementos hexaédricos do tipo SOLID70 de 8 nós, 1 GDL por nó (temperatura).
- A malha da laje é constituída por 127696 elementos finitos e 160917 nós (teste de convergência).



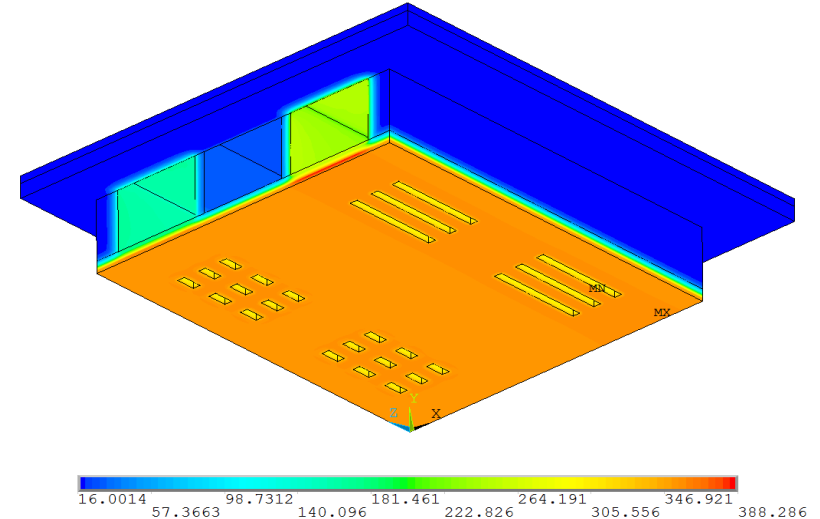
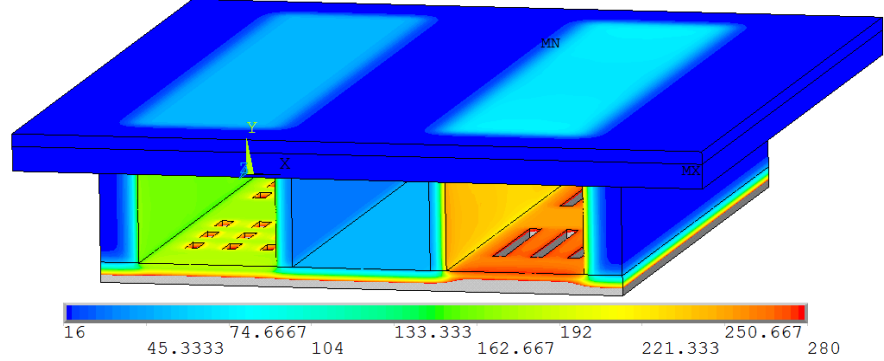
RESISTÊNCIA AO FOGO DE LAJES EM MADEIRA (ISOLAMENTO) - NUMÉRICO

- Campo de temperatura

Laje 1 (1500 s)

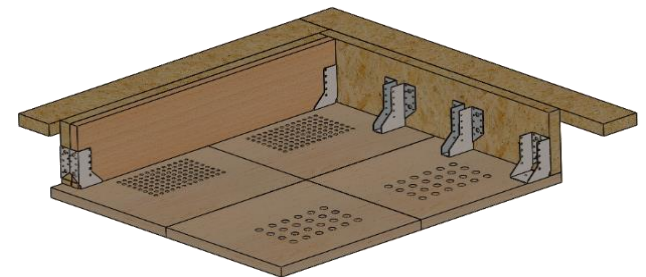
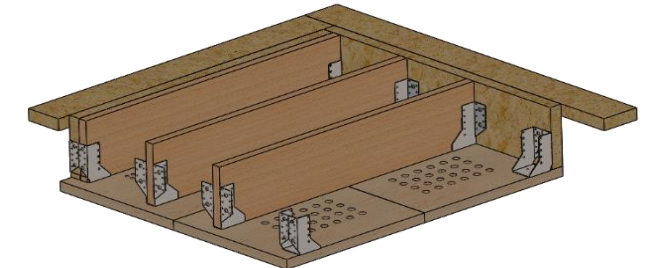
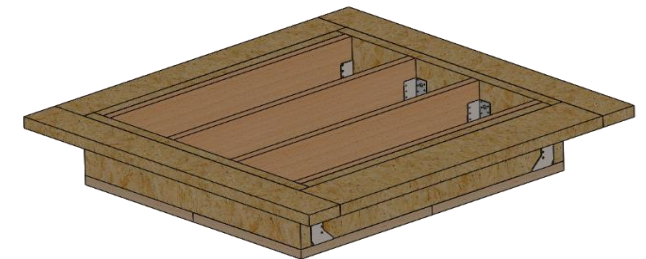
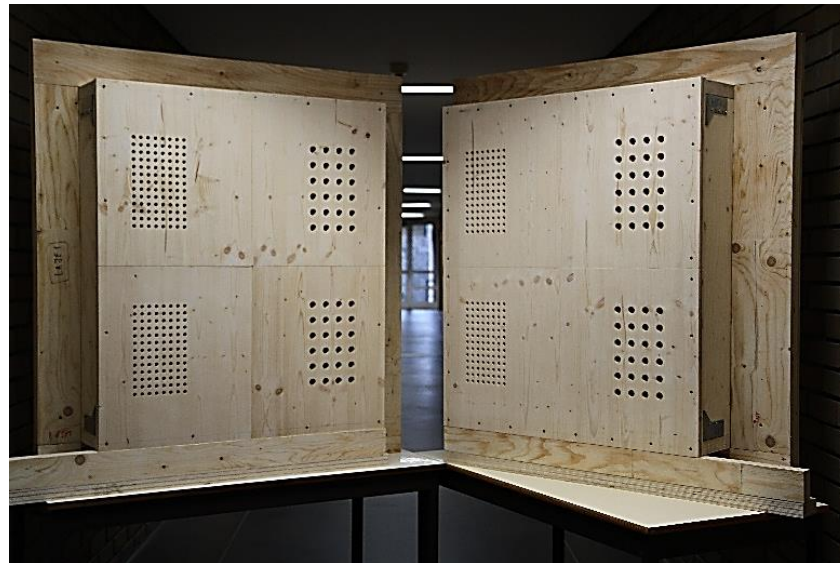
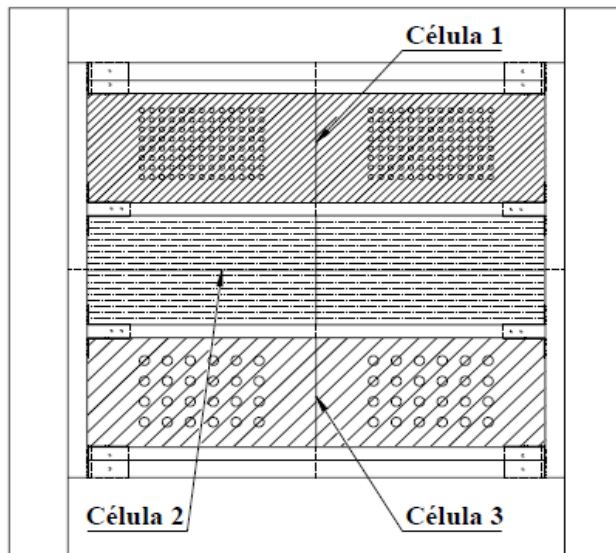


Laje 2 (950 s)



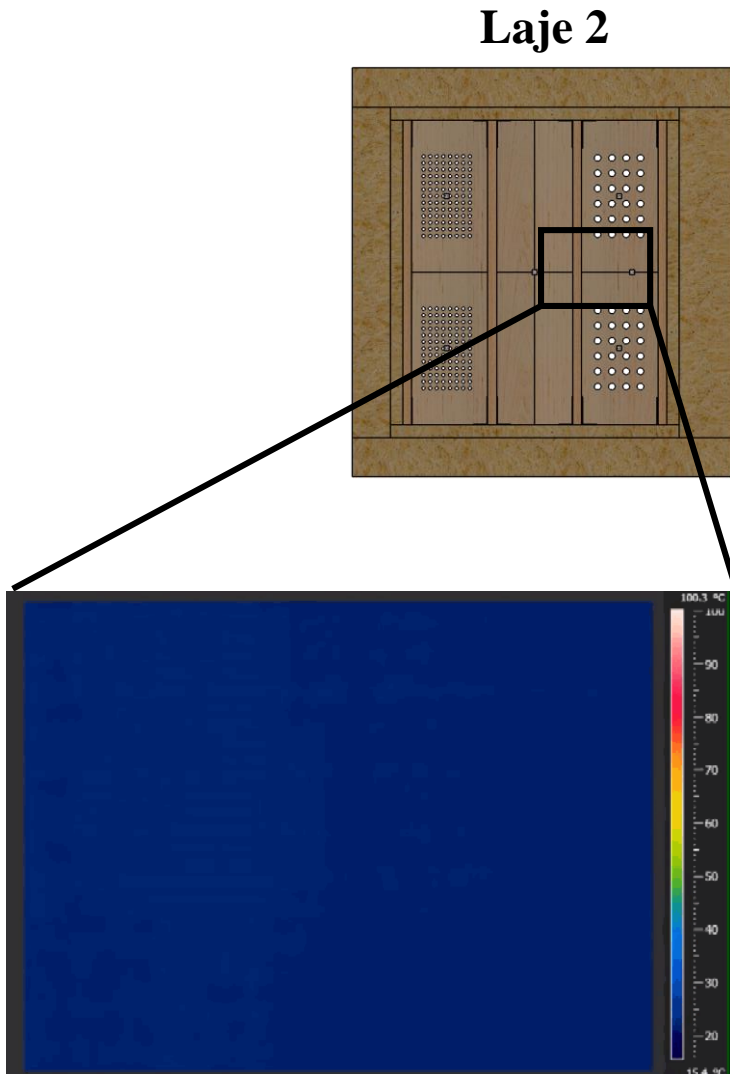
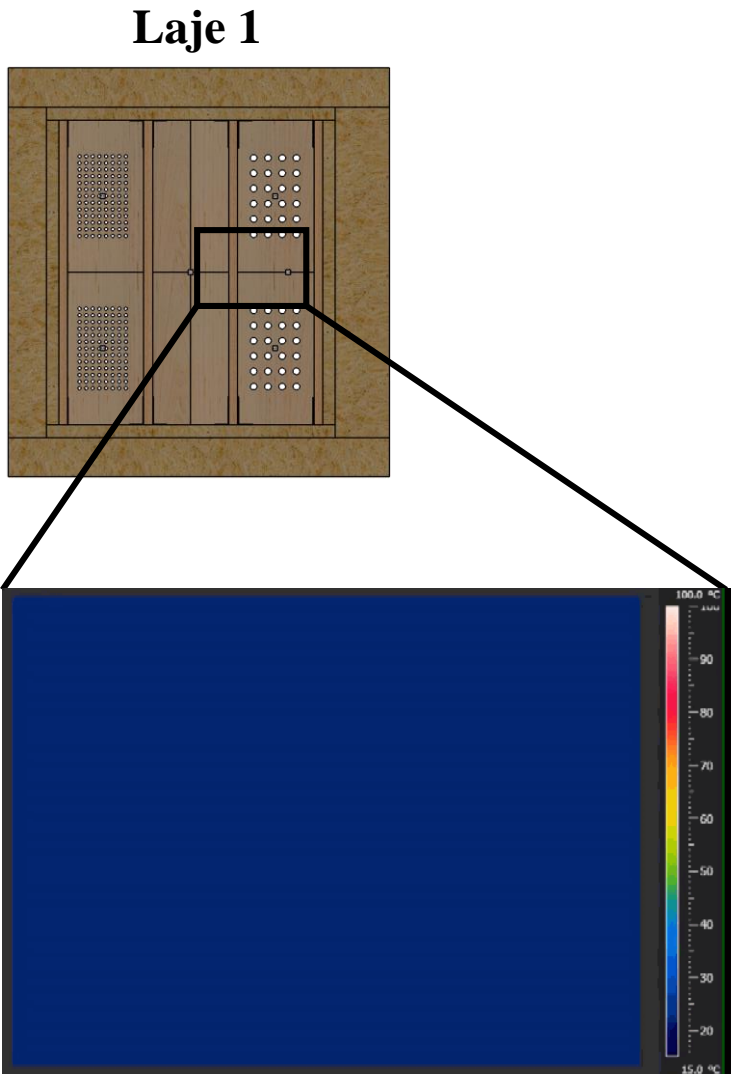
RESISTÊNCIA AO FOGO DE LAJES EM MADEIRA (ISOLAMENTO) - CIRCULARES

- As lajes são constituídas por:
 - Pavimento, painel tricapa (1150x1232x20mm);
 - Teto, painel tricapa (870x996,80x32mm);
 - 4 vigas, painel tricapa, nas células (918,8x200x27mm);
 - Armadura exterior, vigas Kerto S: 2 (918,8x200x37mm), 2 (870x200x39mm).
 - Conectores metálicos Simpson: 4 SAI300/64/2;4 SAE300/70/2.
 - Célula 1= furação $\varnothing 10 \times 13 \times 8 \times 2 \text{mm}$, (16 328mm²), Célula 2= sem furação, Célula 3= furação $\varnothing 20 \times 6 \times 4 \times 2 \text{mm}$ (15 072mm²).



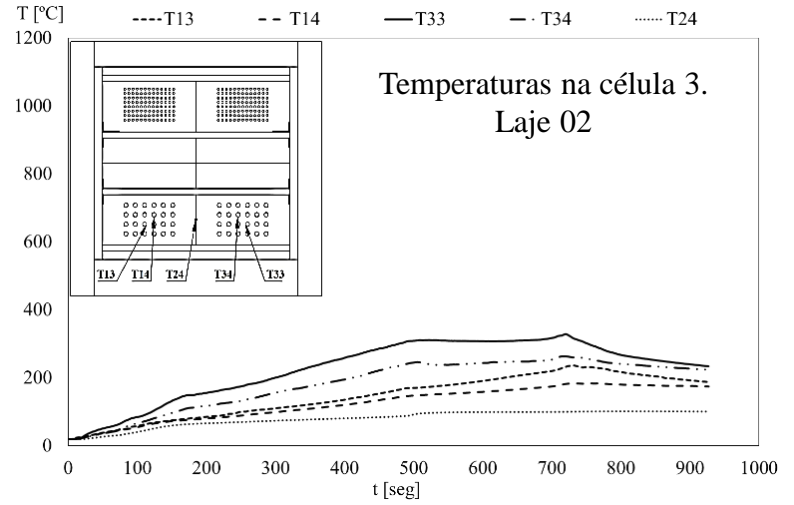
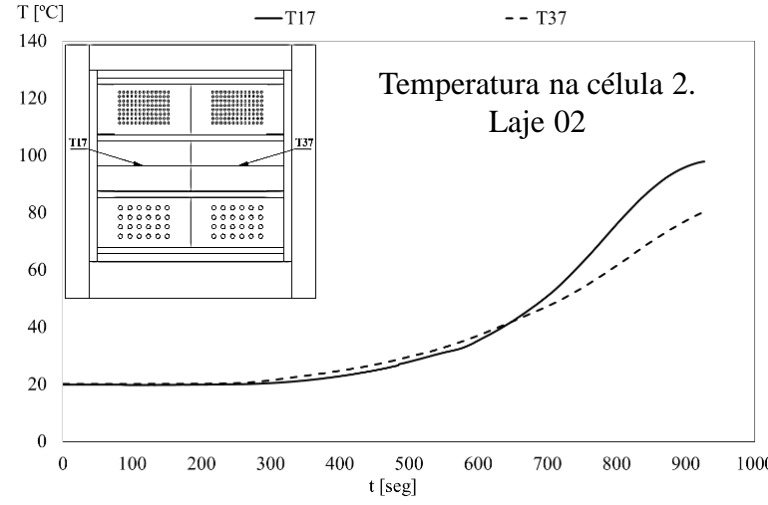
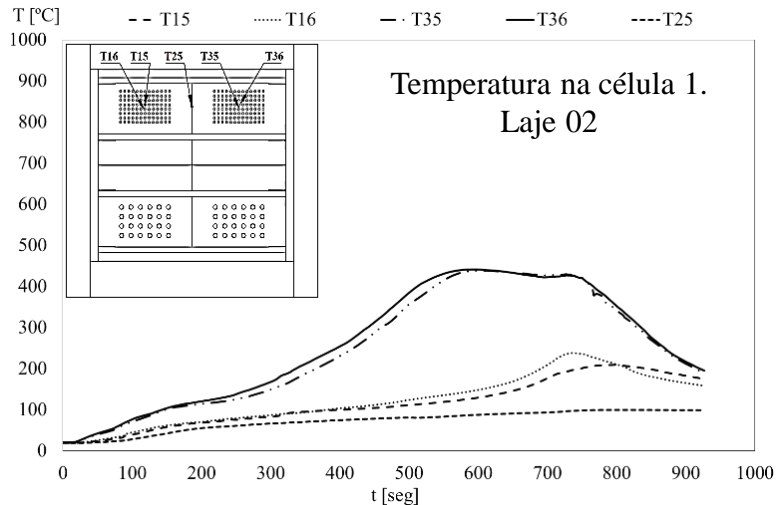
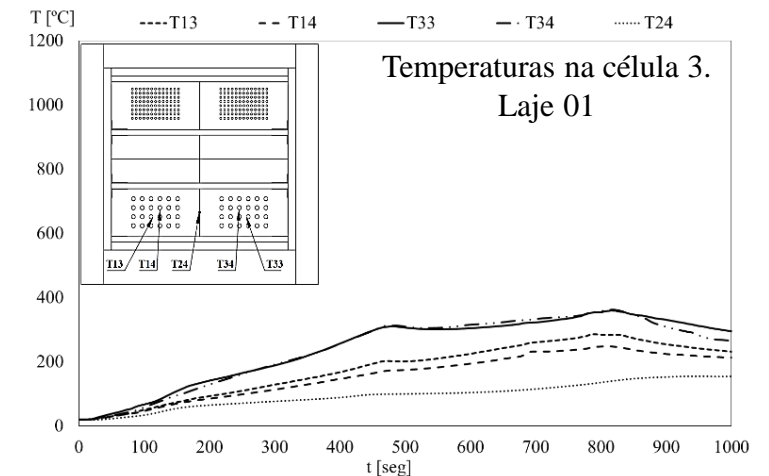
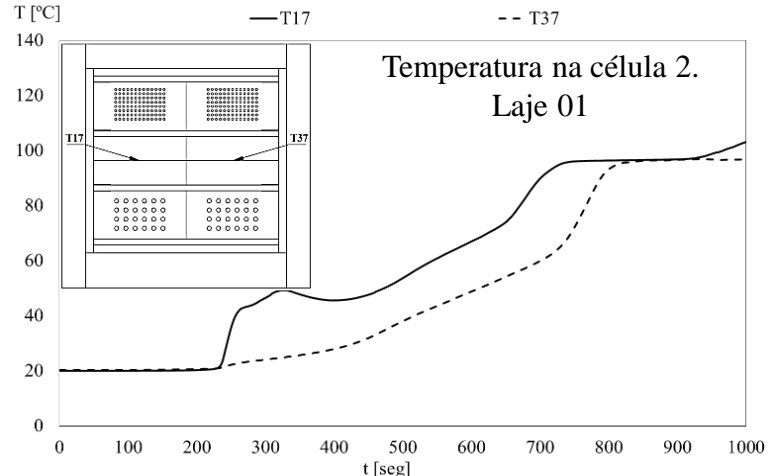
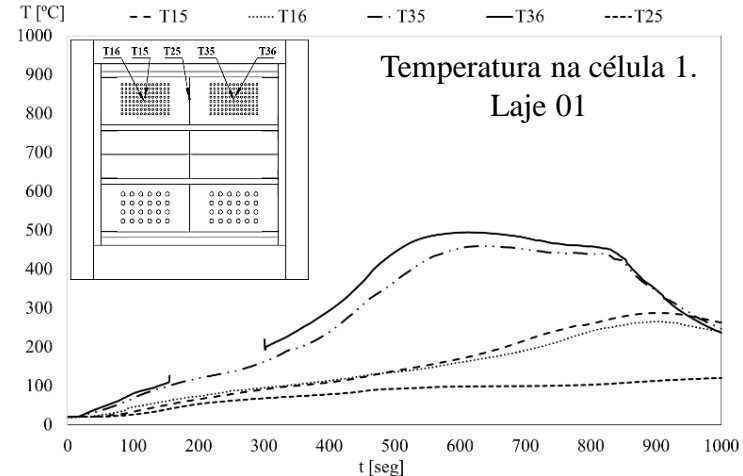
RESISTÊNCIA AO FOGO DE LAJES EM MADEIRA (ISOLAMENTO) - CIRCULARES

- Temperatura na face não exposta: Termografia de infravermelhos



RESISTÊNCIA AO FOGO DE LAJES EM MADEIRA (ISOLAMENTO) - CIRCULARES

- Temperatura nas 3 células das lajes.



RESISTÊNCIA AO FOGO DE LAJES EM MADEIRA (ISOLAMENTO) - CIRCULARES

- Velocidade de carbonização

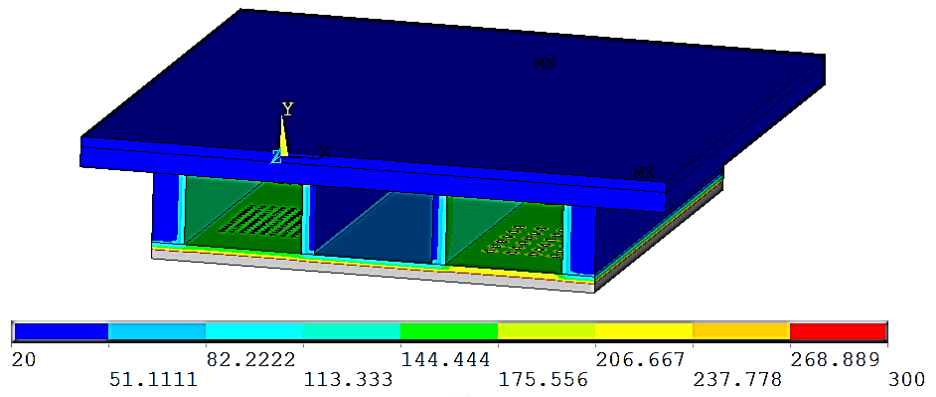
Célula	[mm/min] Laje 01 (EXP)	[mm/min] Laje 01 (NUM)	[mm/min] Laje 02 (EXP)	[mm/min] Laje 02 (NUM)
1	1.67	1.12	1.60	1.07
2	1.30	1.12	1.21	1.07
3	1.80	1.17	1.64	1.12



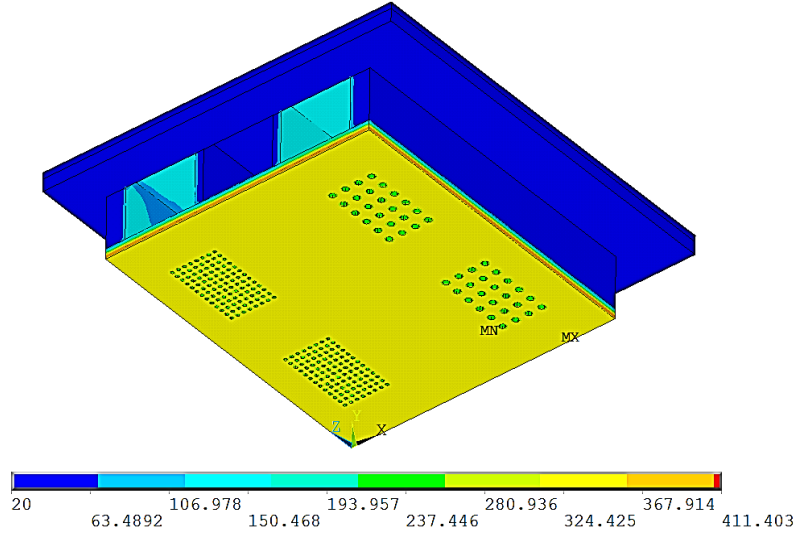
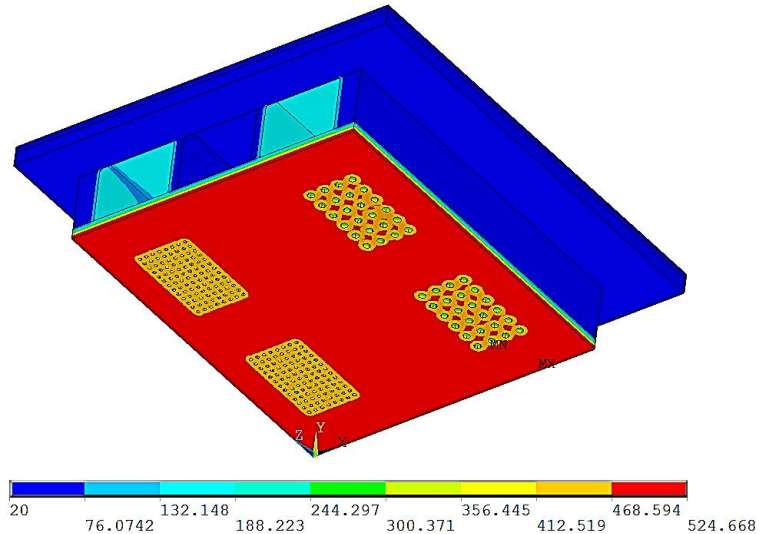
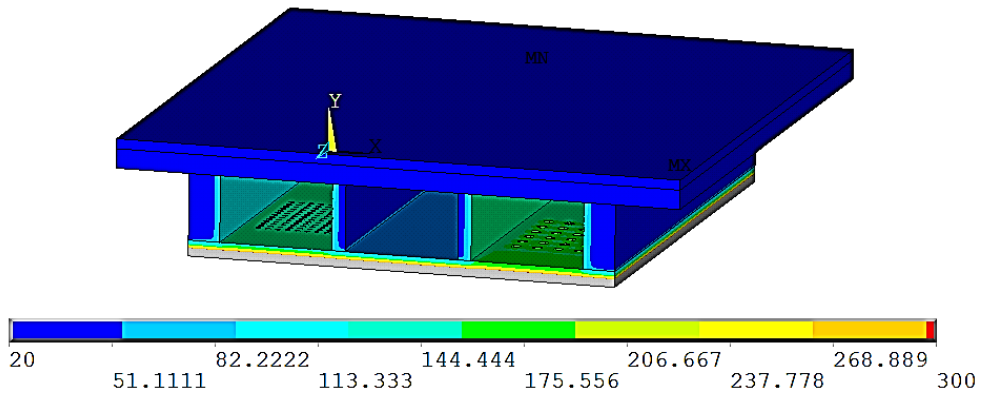
RESISTÊNCIA AO FOGO DE LAJES EM MADEIRA (ISOLAMENTO) - NUMÉRICO

- Campo de temperatura

Laje 1 (900 s)



Laje 2 (900 s)



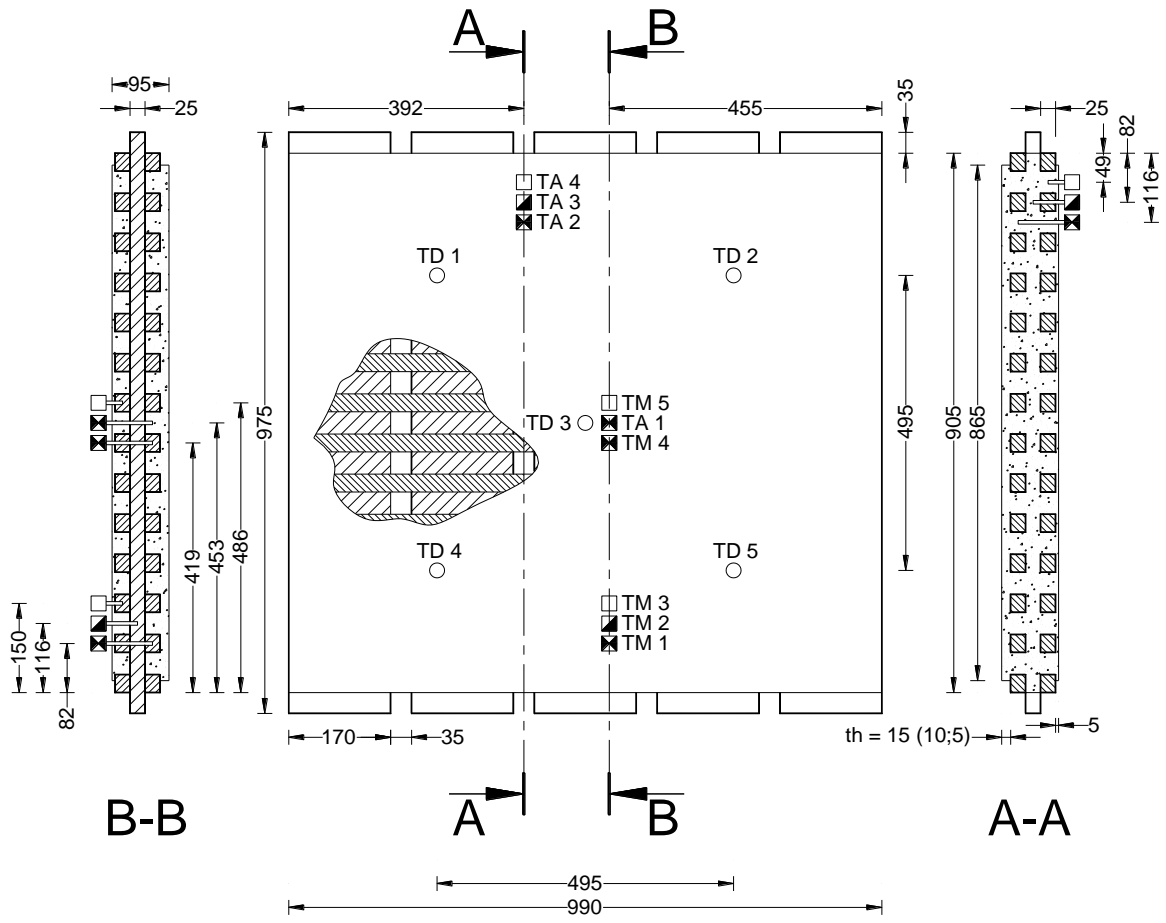
RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES EM TABIQUE (ISOLAMENTO).

- Parede de tabique com madeira de pinho nacional com preenchimento e acabamento à base de uma argamassa terrosa bastarda de terra e cal.
 - Estrutura de madeira (capacidade portante). Placas de pinho verticais (170×25 mm²) guias horizontais (30×25 mm²) separadas em 37 mm pregadas de ambos os lados.
 - Argamassa terrosa com cal (isolamento)



RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES EM TABIQUE (ISOLAMENTO).

- 3 paredes (990×975 mm²) com 3 espessuras de argamassa: 15 mm, 10 mm and 5 mm
- Termopares incluídos em diferentes posições.
- Temperatura da face não exposta com os habituais termopares de disco.



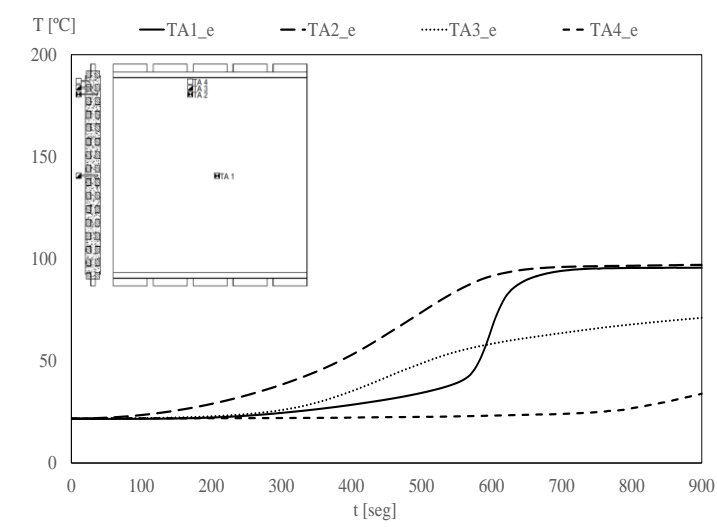
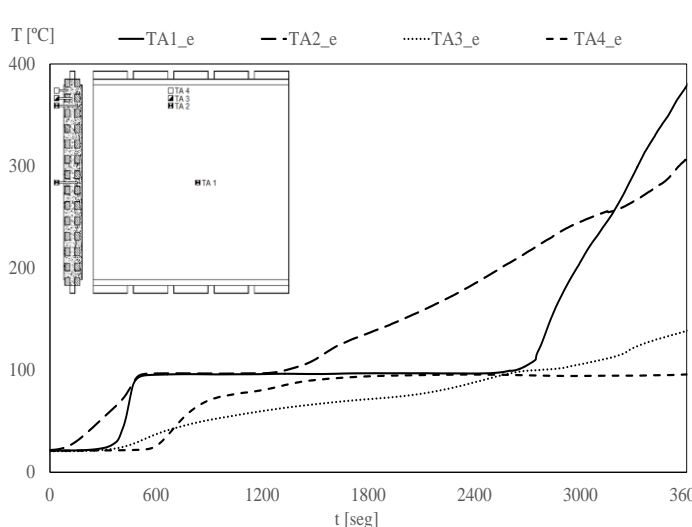
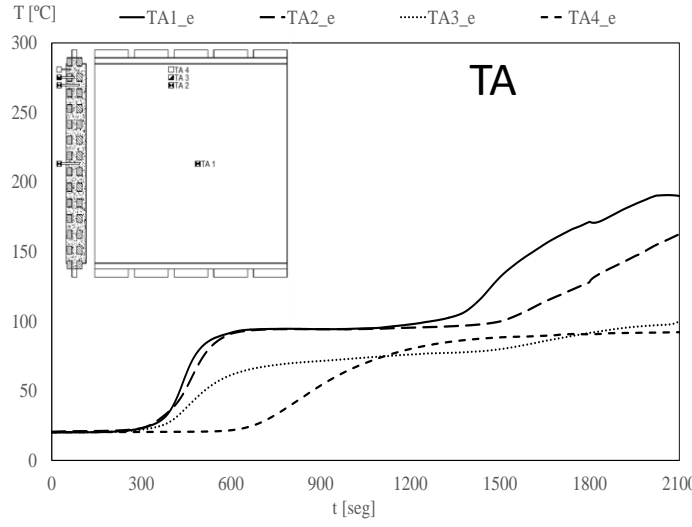
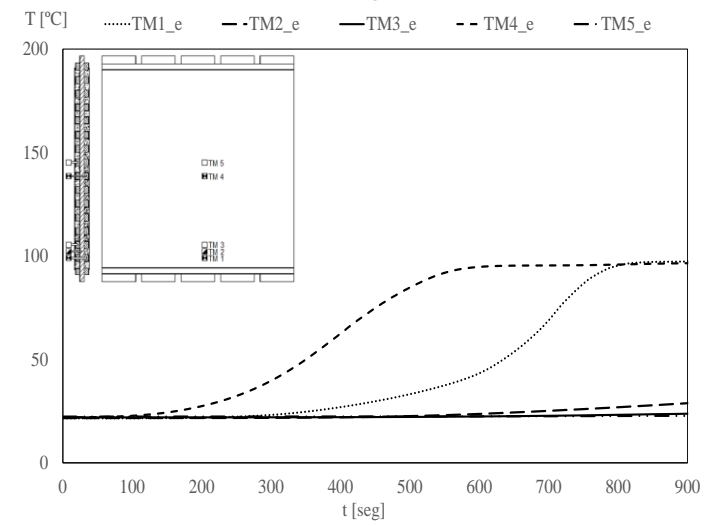
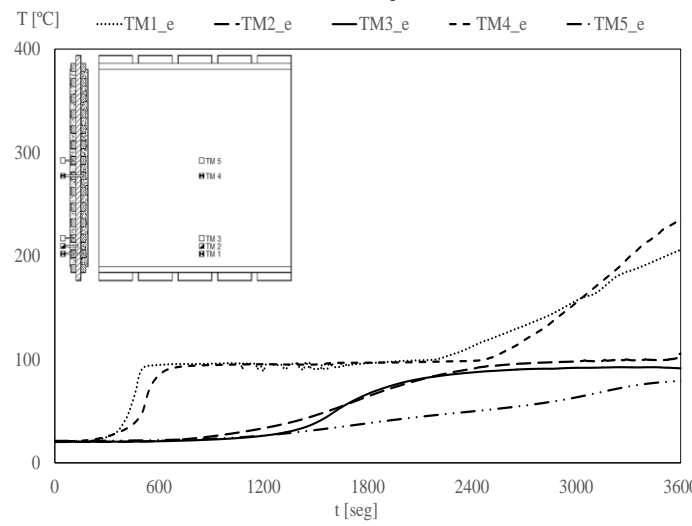
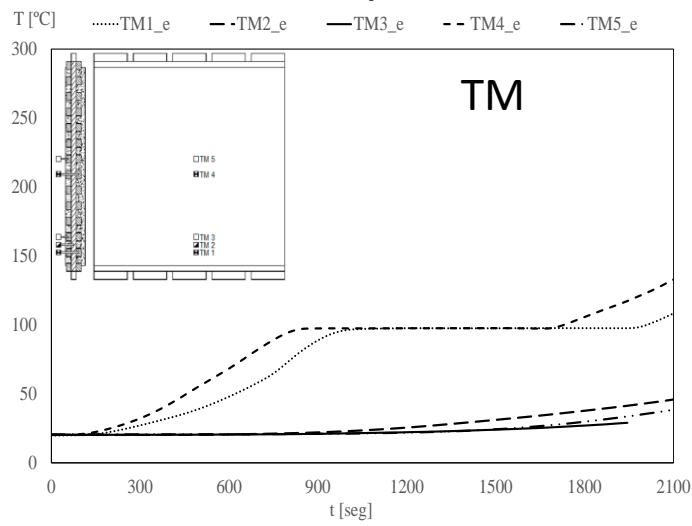
○ Thermocouple applied on the unexposed face
 □ Thermocouple at 17.5 mm depth from the unexposed face
 ▣ Thermocouple at 42.5 mm depth from the unexposed face
 ▤ Thermocouple at 67.5 mm depth from the unexposed face

RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES EM TABIQUE (ISOLAMENTO).

• Parede de tabique com 15 mm

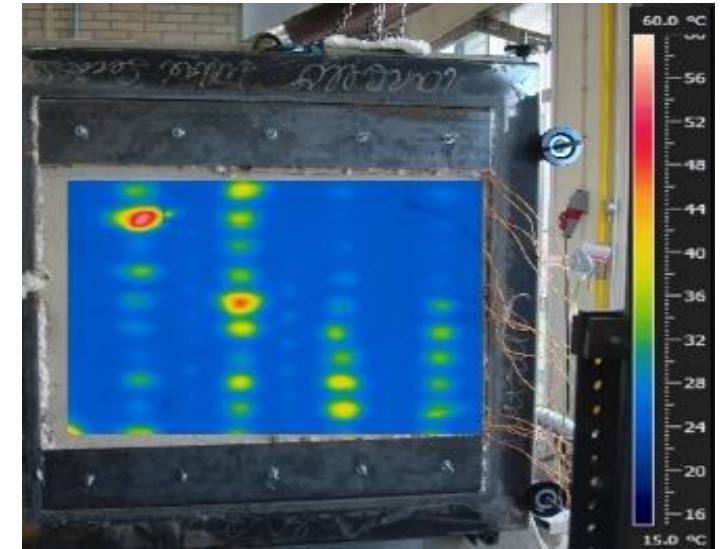
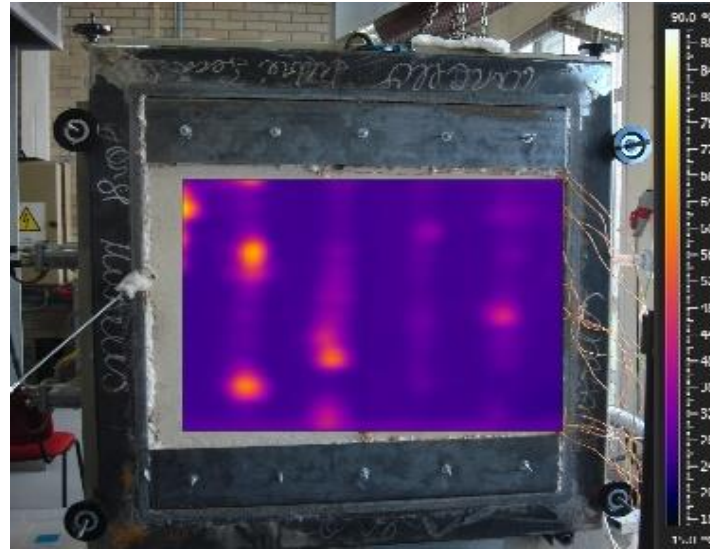
• Parede de tabique com 10 mm

• Parede de tabique com 5 mm



RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES EM TABIQUE (ISOLAMENTO).

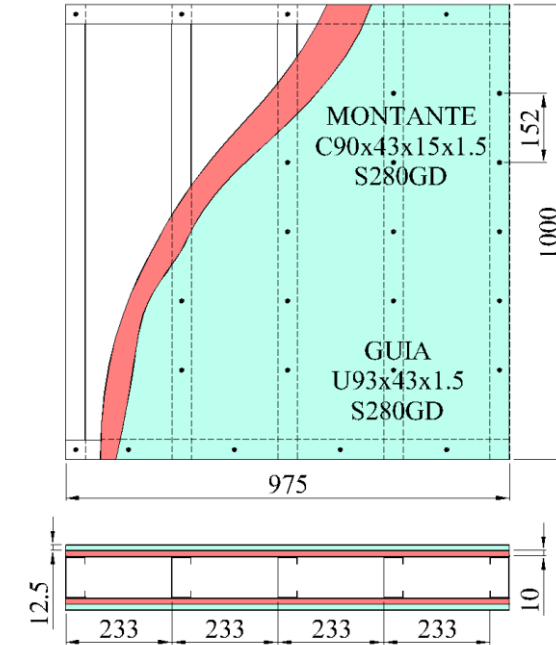
- Parede de tabique com 15 mm
- Parede de tabique com 10 mm
- Parede de tabique com 5 mm



- O critério de isolamento foi verificado para o tempo de duração dos ensaios.
- O critério de integridade também foi conseguido.
- Na fase final do teste foi verificada uma quantidade significativa de liberação de fumo derivado da combustão de madeira.

RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES EM AÇO ENFORMADO A FRIO (ISOLAMENTO).

- Avaliação da resistência ao fogo de Paredes em aço enformado a frio:
 - protegido com diferentes tipos de materiais.
 - 3 tipos de estruturas LSF.
- Paredes Não Portantes:
 - EN13501-2, EN1363-1, EN1364-1;
 - Integridade (E) ou Capacidade de Isolamento (I);
 - EI60, EI90, EI120 (COMPARTIMENTAÇÃO)
- Paredes Portantes:
 - EN13501-2, EN1363-1, EN1365-1;
 - Capacidade de suporte de carga (R):
 - R60, R90, R120 (SUPORTE);
 - Capacidade de suporte de carga, isolamento e estanquidade:
 - REI60, REI90, REI120 (SUPORTE E COMPARTIMENTAÇÃO).

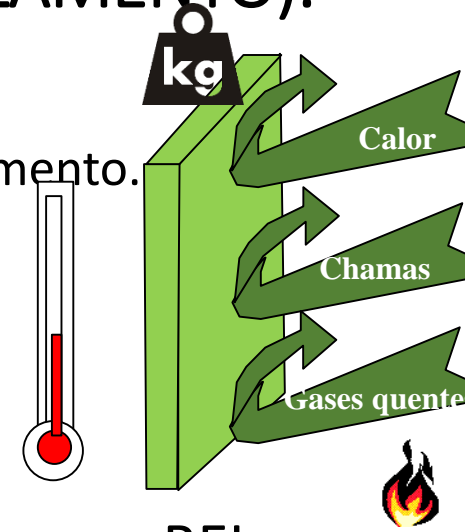


Lagomar, Bragança, Portugal, Junho 2017



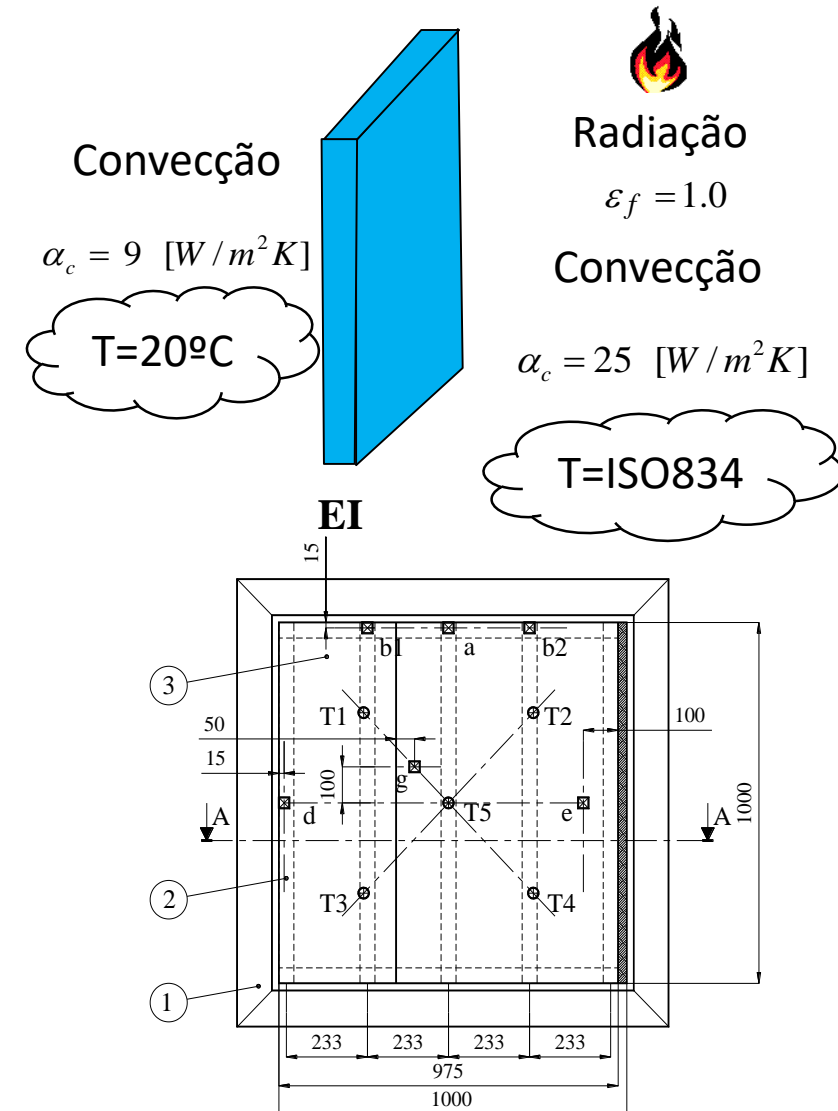
RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES DE AÇO ENFORMADO A FRIO (ISOLAMENTO).

- A capacidade resistente (R) é a capacidade de suportar carga de teste:
 - Sem exceder os critérios especificados com relação ao deslocamento ou taxa de deslocamento.
 - A avaliação deve ser feita com base em:
 - contração vertical limite ($C = h / 100$ [mm]), ou ;
 - taxa de contração vertical limite ($dC / dt = 3.h / 1000$ [mm / min]).
 - A medição do deslocamento horizontal é um requisito obrigatório.
- A estanquidade (E) é a capacidade de resistir ao fogo de um lado:
 - Sem transmissão de fogo para o lado não exposto (passagem de chamas ou gases quentes). Evita a ignição de qualquer material próximo à superfície não exposta.
 - A avaliação será feita com base em:
 - rachaduras ou aberturas em excesso de determinadas dimensões, ou;
 - ignição de uma almofada de algodão ou chamas sustentadas no lado não exposto.
- O isolamento (I) é a capacidade de resistir ao fogo de um lado:
 - Sem transmissão de transferência de calor significativa para o lado não exposto. Evita a ignição de qualquer material próximo à superfície não exposta.
 - A avaliação será feita com base em:
 - aumento médio da temperatura na face não exposta limitado a 140°C acima da temperatura média inicial, ou;
 - aumento máximo de temperatura em qualquer ponto limitado a 180°C acima da temperatura média inicial.



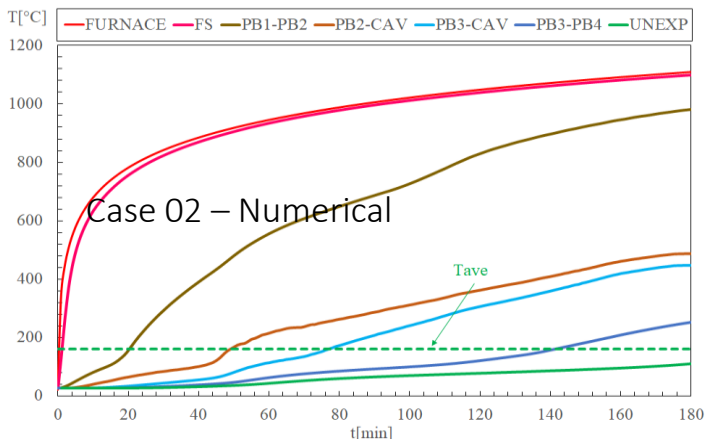
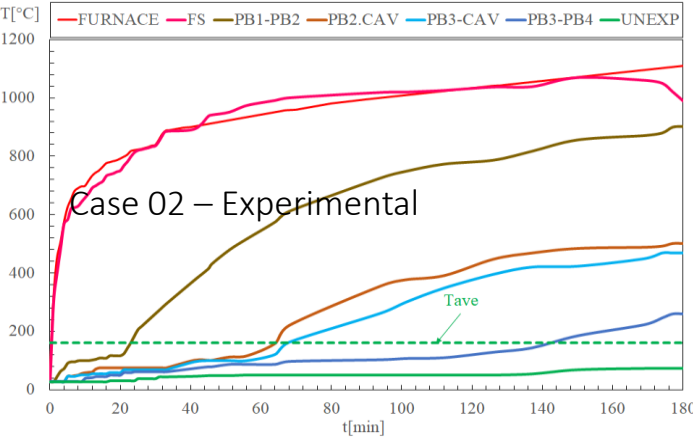
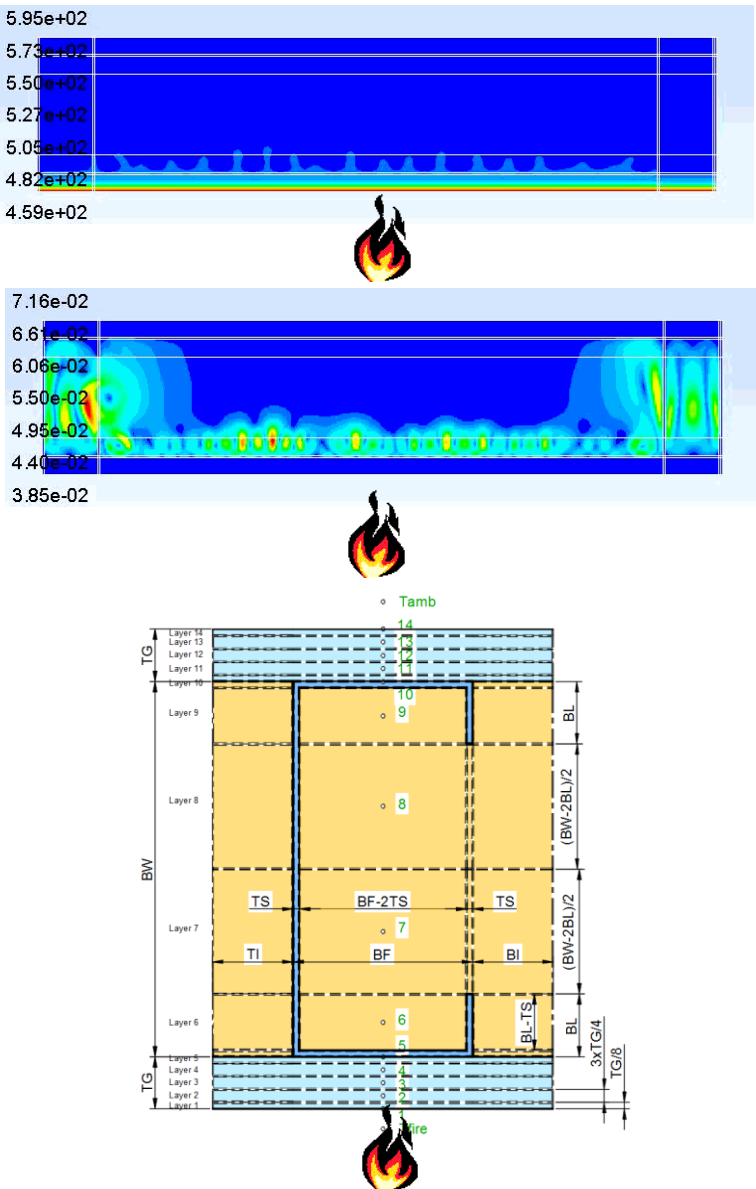
RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES DE AÇO ENFORMADO A FRIO (ISOLAMENTO).

- EN 1991-1-2 (Ações: Definição da carga térmica):
 - Superfícies expostas: considerar radiação e convecção;
 - Temperatura do gás definida pela norma ISO834;
 - Coeficiente de convecção: $25 \text{ W/m}^2\text{K}$;
 - Lado não Exposto: considerar convecção + radiação ou convecção apenas;
 - Temperatura do ambiente não exposto definido pela temperatura ambiente;
 - Coeficiente de convecção : $9 \text{ W/m}^2\text{K}$.
- EN 1364-1 (Resistência ao fogo de paredes não portantes)
 - Especifica os locais onde a temperatura deve ser medida/ calculado no lado não exposto.



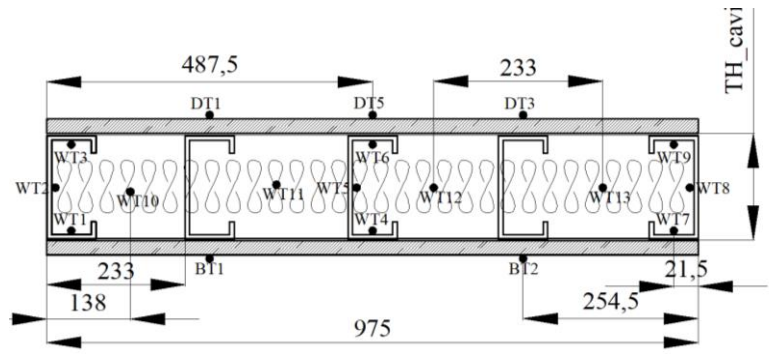
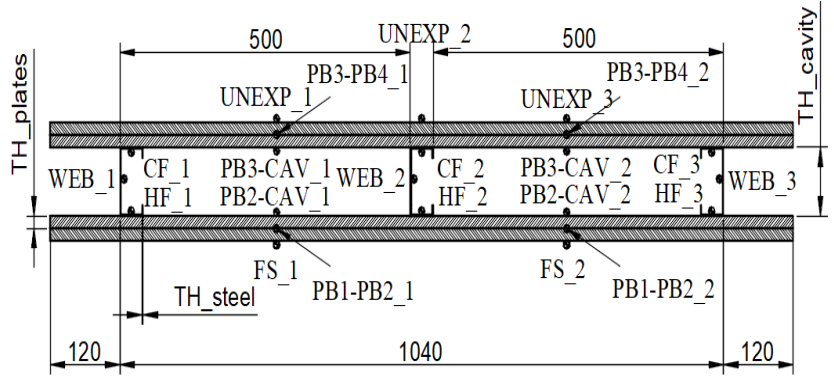
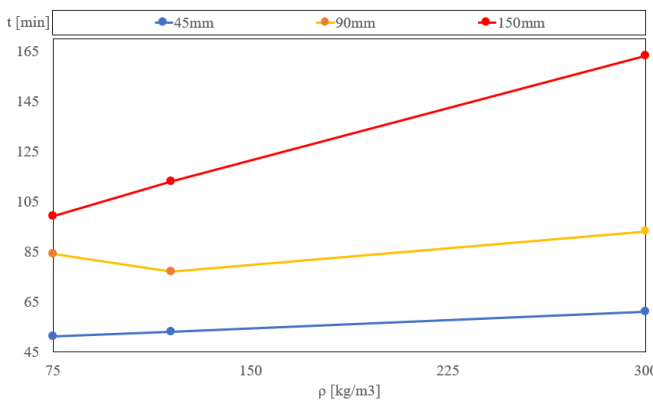
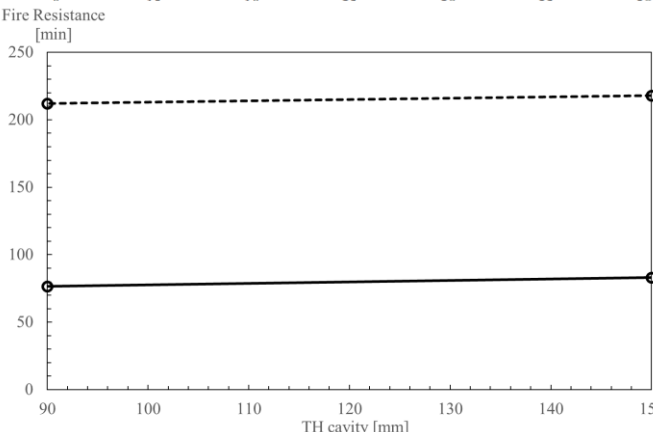
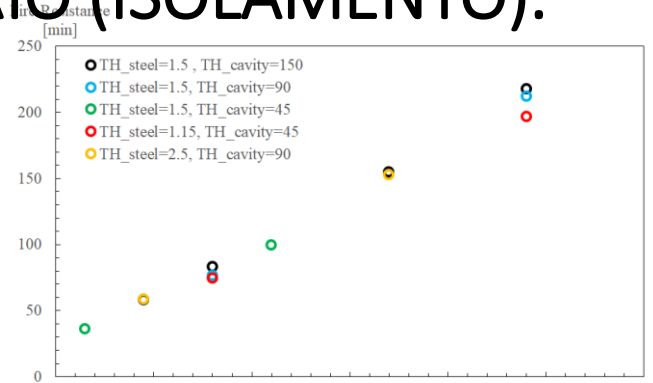
RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES DE AÇO ENFORMADO A FRIO (ISOLAMENTO).

- Investigação em curso no IPB:
 - Modelos numéricos precisos, baseados na análise térmica, com interação da estrutura e do fluido;
 - Validação dos modelos numéricos com testes experimentais desenvolvidos no IPB e por outros investigadores;
 - Desenvolvimento do modelo simplificado (unidimensional) de transferência de calor, diferenças com modelos 2D inferiores a 5%.



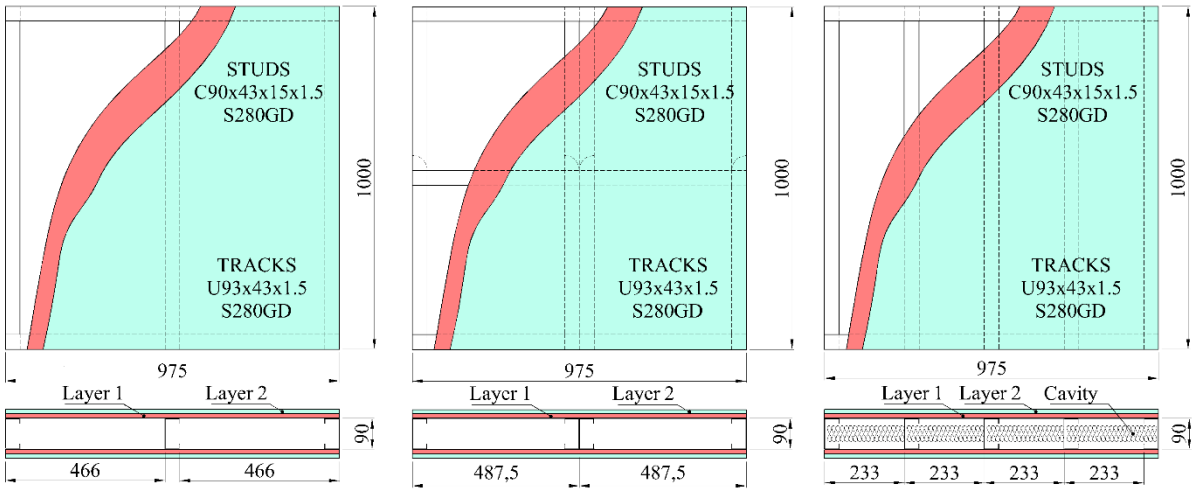
RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES DE AÇO ENFORMADO A FRIO (ISOLAMENTO).

- Estudo paramétrico para analisar o comportamento ao fogo das paredes divisórias, em particular para avaliar o efeito: da espessura do aço, espessura da cavidade, espessura das placas de gesso.
 - A espessura do aço não tem efeito térmico significativo na montagem da parede.
 - Tendência linear entre a resistência ao fogo e a espessura da placa de gesso (um aumento de 8 minutos para cada 1 mm de placas de gesso).
 - A espessura da cavidade da parede sem isolamento não tem efeito térmico significativo na montagem da parede.
 - A resistência ao fogo aumenta com a densidade do material de isolamento quando a espessura da cavidade for superior a 150 mm.



RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES DE AÇO ENFORMADO A FRIO (ISOLAMENTO).

- 15 ensaios experimentais de paredes não portantes, com validação numérica 3D e previsão da capacidade portante.
- A motivação será determinar o efeito do fogo em: placas mistas de proteção; estrutura metálica LSF; o isolamento da cavidade.

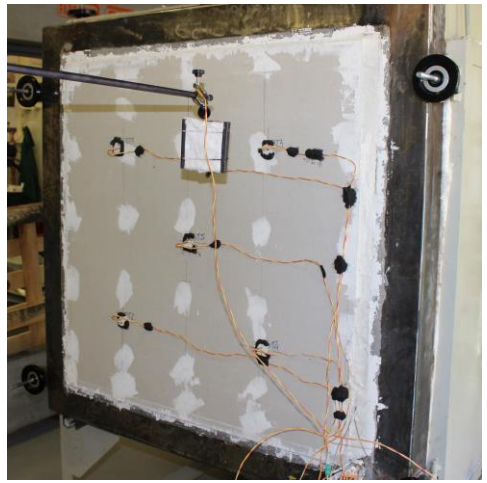


Amostra ID	LSF Número de montantes	Material / espesura [mm] Camada 1	Material / espesura [mm] Camada 2	Material / espesura [mm] Camada 3	Cavidade/ densidade [kg/m3] Insolamento
00	5	Gesso 2 / 12.5	-		
01	5	Gesso 1/ 12.5	-		-
02	5	Gesso 1/ 12.5	Gesso /12.5		-
03	5	Gesso 1/ 12.5	-		Rockwool / 75
04	5	Cortiça / 10	Gesso 2 / 12.5		-
05	3	Cortiça / 10	Gesso 2 / 12.5		
06	4	Cortiça / 10	Gesso 1 / 12.5		
07	5	Madeir.OSB / 10	Gesso 2 / 12.5		-
08	3	Gesso 1 / 12.5			
09	4	Gesso 1 / 12.5			
10	3	Gesso 1/ 12.5	-		Rockwool / 75
11	3	Gesso 1/ 12.5	Gesso /12.5		
12	3	Gesso 1/ 12.5	Cortiça / 10	Gesso /12.5	
13	5	Gesso 1/ 12.5	Cortiça / 10	Gesso /12.5	
14	5	Madeir. OSB / 10	Gesso 1/ 12.5	Gesso 1/ 12.5	
15	3	Gesso 1/ 12.5			Cerâmico



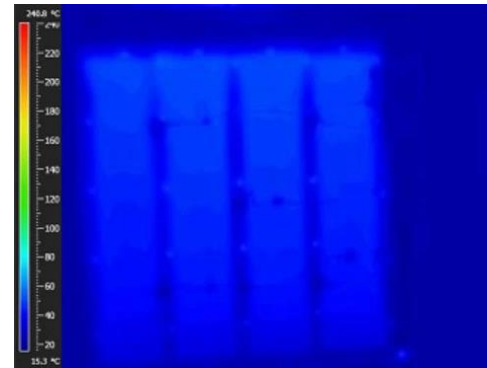
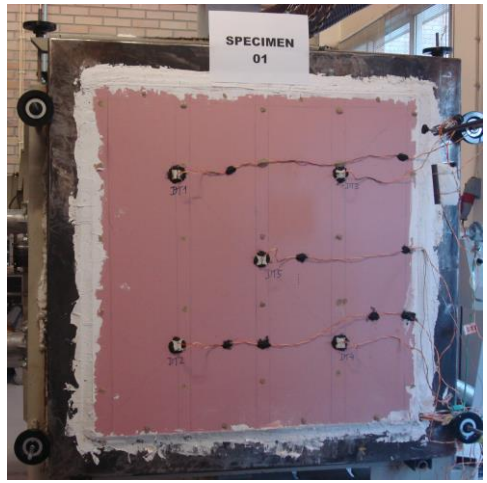
RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES DE AÇO ENFORMADO A FRIO (ISOLAMENTO).

• AMOSTRA 0



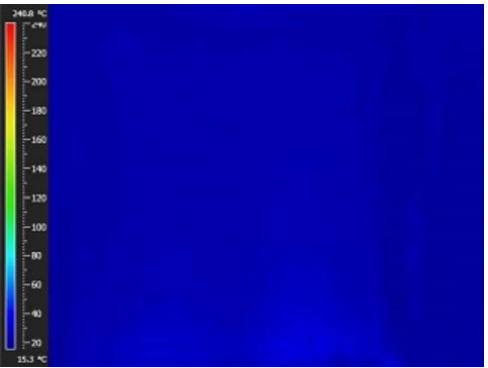
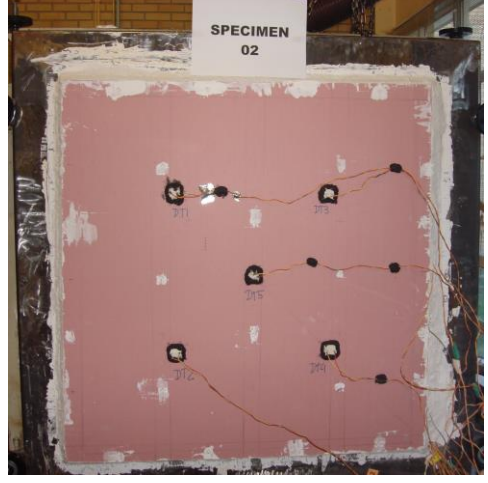
•FR (I)=45min (IR).

• AMOSTRA 1



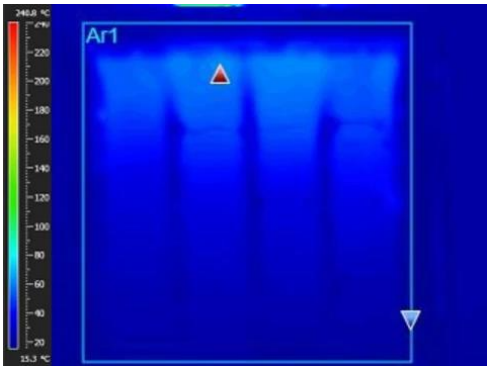
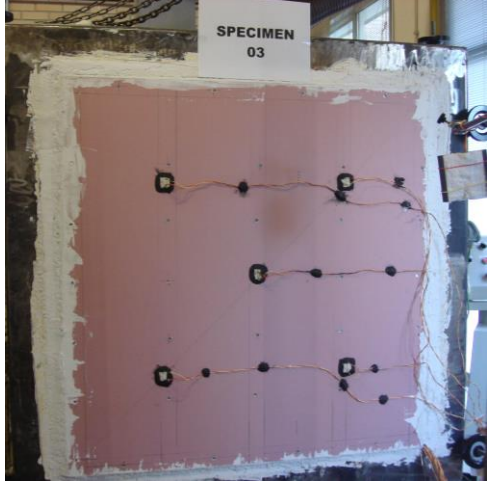
•FR(I) = 70min (Tave) e 62min (IR);
•Encurvadura local da alma.

• AMOSTRA 2



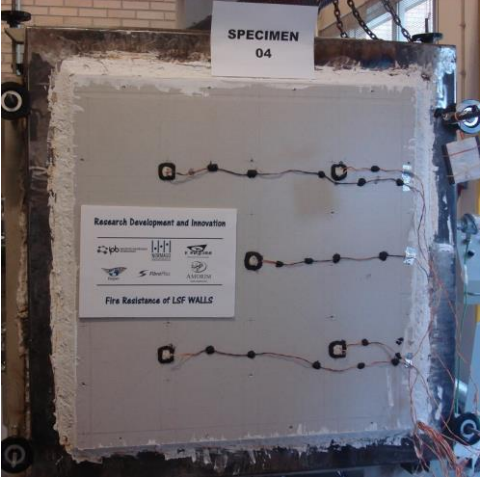
•FR (I)= 118min (Tmax - DT5) e 117min (IR);
•Encurvadura local da alma.

• AMOSTRA 3



•FR (I)=87min (Tmax - DT5) e 72min (IR);
•Encurvadura local da alma e encurvadura distorsional.

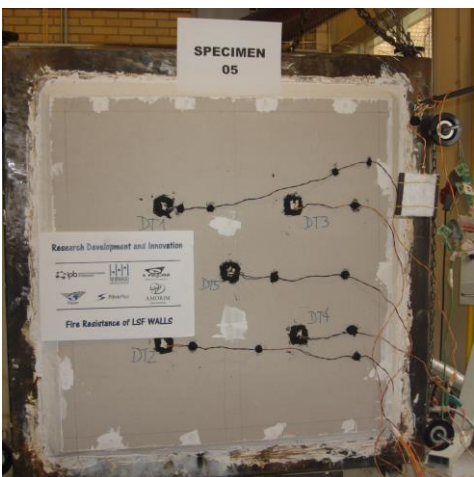
• AMOSTRA 4



• FR (I)=51min (Tmax - DT5) e 60min (IR);
•Encurvadura local da alma e global do montante

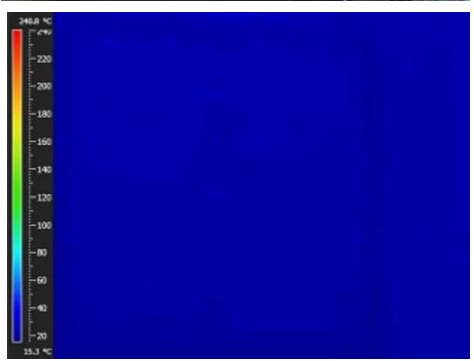
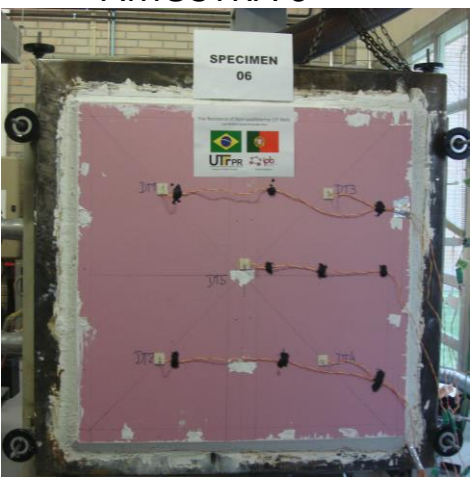
RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES DE AÇO ENFORMADO A FRIO (ISOLAMENTO).

• AMOSTRA 5



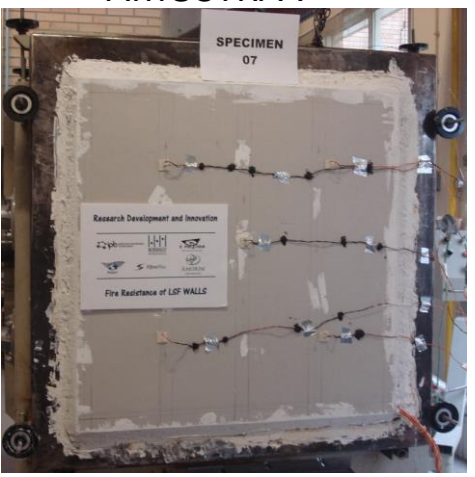
•FR (I)=64 min (Tmax, DT5) e 67min (IR);
 •Encurvadura global (montante central), encurvadura da alma e encurvadura distorsional.

• AMOSTRA 6



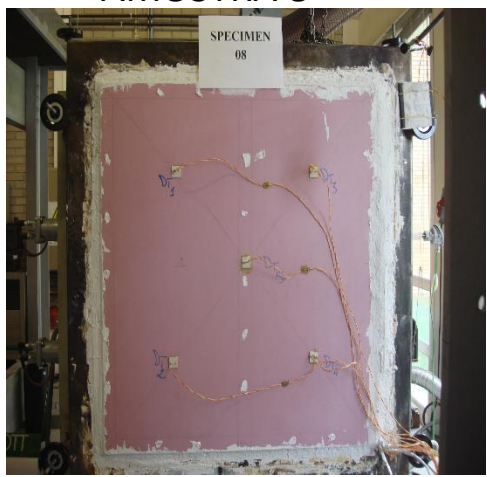
•FR (I)= 69min (Tmax, DT5) e 72 min (IR);
 •encurvadura da alma e encurvadura distorsional.

• AMOSTRA 7



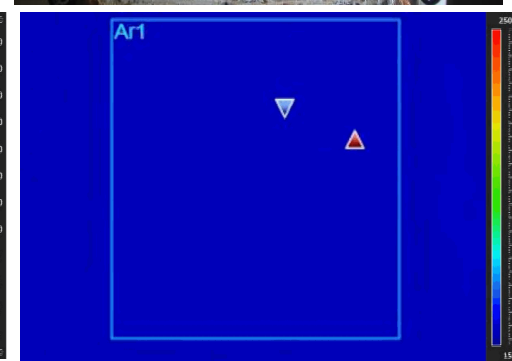
•Fr (I)= 75min (Tmax,DT3) e 77 (IR);
 •Encurvadura global, encurvadura da alma e encurvadura distorsional.

• AMOSTRA 8



•FR (I)=53min (Tmax, DT1/ Tave) e 52min (IR);
 •Encurvadura global.

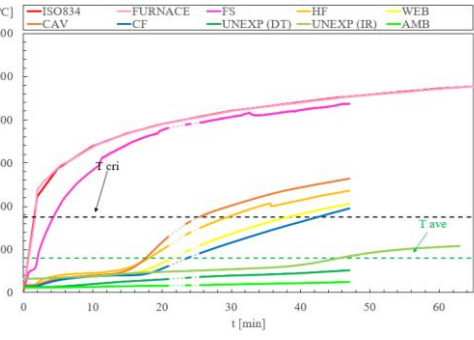
• AMOSTRA 9



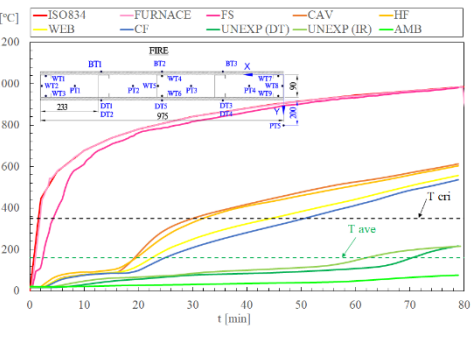
•DR (I)= 64min (Tave) e 60min (IR);
 •encurvadura da alma e encurvadura distorsional.

RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES DE AÇO ENFORMADO A FRIO (ISOLAMENTO).

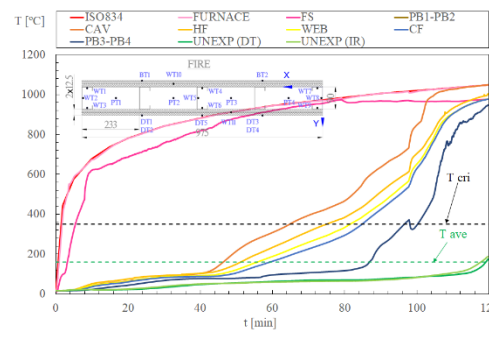
• AMOSTRA 0



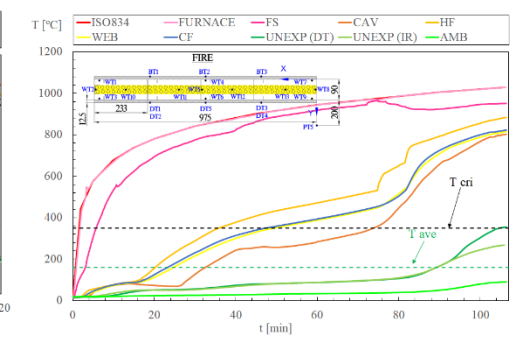
• AMOSTRA 1



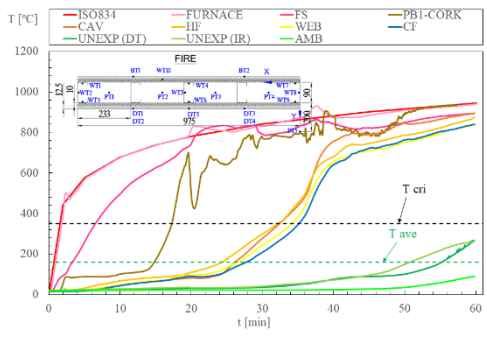
• AMOSTRA 2



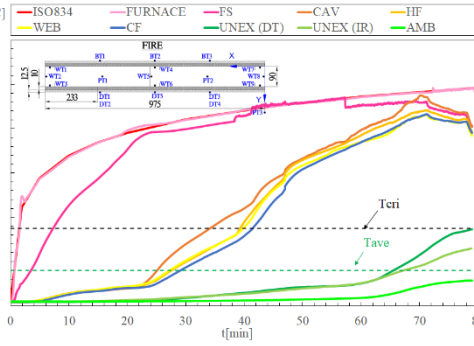
• AMOSTRA 3



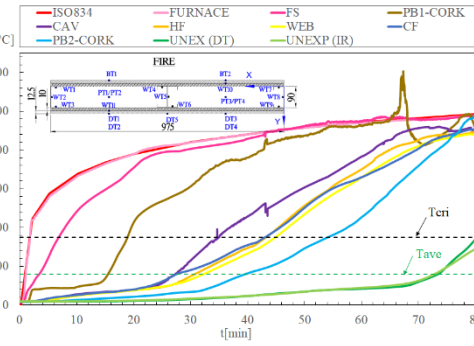
• AMOSTRA 4



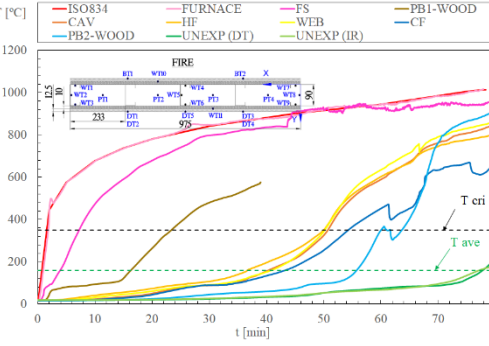
• AMOSTRA 5



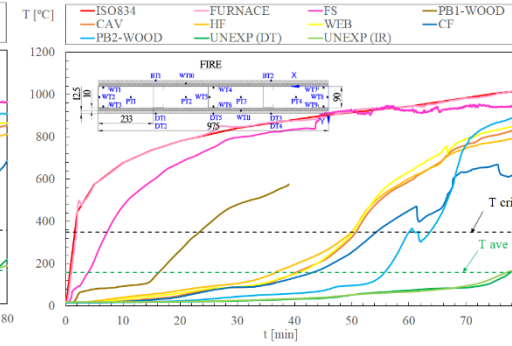
• AMOSTRA 6



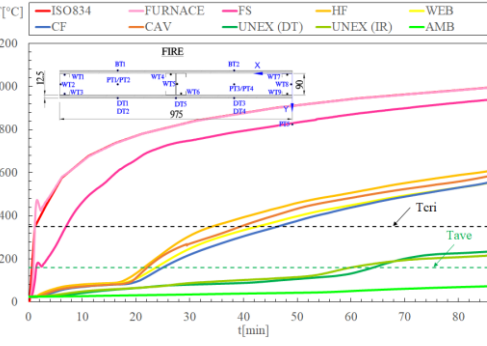
• AMOSTRA 7



• AMOSTRA 8



• AMOSTRA 9



RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES DE AÇO ENFORMADO A FRIO (ISOLAMENTO).

• AMOSTRA 0



• AMOSTRA 1



• AMOSTRA 2



• AMOSTRA 3



• AMOSTRA 4



• AMOSTRA 5



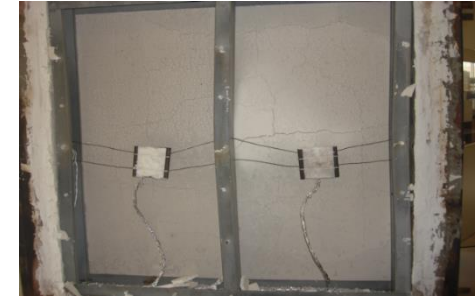
• AMOSTRA 6



• AMOSTRA 7



• AMOSTRA 8



• AMOSTRA 9



RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES DE AÇO ENFORMADO A FRIO (ISOLAMENTO).

- Aumentar o número de montantes, geralmente aumenta a resistência ao fogo da parede LSF, (comparação das amostras 01/08/09 ou a comparação das amostras 05/06).
 - Possível justificação: O maior número de cavidades que são criadas e o maior número de parafusos que são aplicados às placas em camadas.
- Aumentar a espessura do gesso também aumenta a resistência ao fogo (comparação de 01/02).
 - Justificação : maior resistência térmica. A investigação numérica anterior também permite aos autores concluir que para cada 1 mm adicional de espessura de gesso a resistência ao fogo aumenta 8 minutos.

AMOSTRA ID	LSF Número de montantes	Material / espessura [mm] Camada 1	Material / espessura [mm] Camada 2	Cavidade / densidade [kg/m3] Isolamento	T max=200 (DT) [min]	T ave=160 (DT) [min]	T ave=160 (IR) [min]
00	5	Gesso 2 / 12.5	-	-			45
01	5	Gesso 1/ 12.5	-	-	70	71	62
02	5	Gesso 1/ 12.5	Gesso /12.5	-	119	118	117
03	5	Gesso 1/ 12.5	-	Rockwool / 75	89	87	89
04	5	Cortiça / 10	Gesso 2 / 12.5	-	55	51	50
05	3	Cortiça / 10	Gesso 2 / 12.5	-	63	65	67
06	4	Cortiça / 10	Gesso 1 / 12.5	-	70	73	72
07	5	Madeira OSB / 10	Gesso 2 / 12.5	-	77	75	77
08	3	Gesso 1 / 12.5	-	-	53	53	52
09	4	Gesso 1 / 12.5	-	-	65	64	60



RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES DE AÇO ENFORMADO A FRIO (ISOLAMENTO).

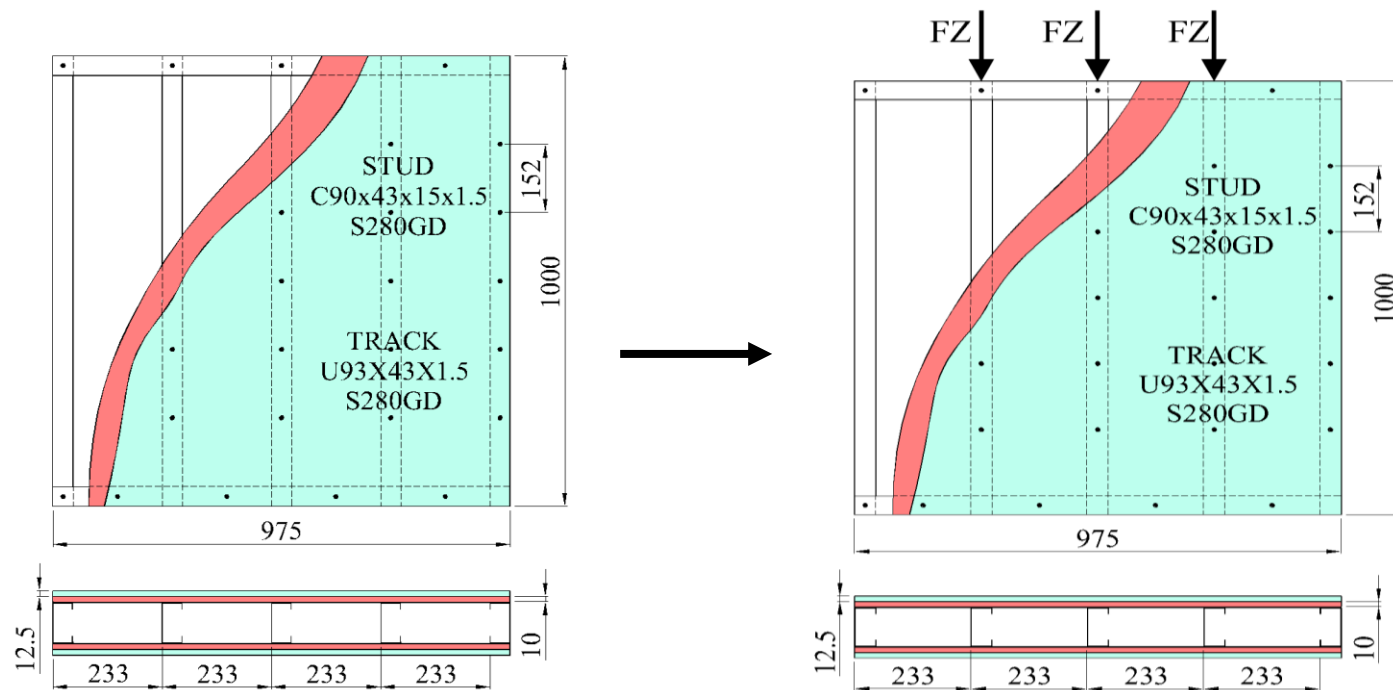
- A comparação de 01/02/03 também permite concluir que a duplicação da camada de gesso é uma solução com melhor desempenho em comparação com o uso de material isolante na cavidade.
- A solução composta com gesso e OSB apresenta melhor resistência ao fogo quando comparada à solução composta com gesso e cortiça (comparação das amostras 04/07).
 - Justificação: provavelmente devido à maior rigidez apresentada pela placa de madeira e devido à diferente taxa de liberação de calor de ambos os materiais.

AMOSTRA ID	LSF Número de montantes	Material / espessura [mm] Camada 1	Material / espessura [mm] Camada 2	Cavidade / densidade [kg/m3] Isolamento	T max=200 (DT) [min]	T ave=160 (DT) [min]	T ave=160 (IR) [min]
00	5	Gesso 2 / 12.5	-	-			45
01	5	Gesso 1/ 12.5	-	-	70	71	62
02	5	Gesso 1/ 12.5	Gesso /12.5	-	119	118	117
03	5	Gesso 1/ 12.5	-	Rockwool / 75	89	87	89
04	5	Cortiça / 10	Gesso 2 / 12.5	-	55	51	50
05	3	Cortiça / 10	Gesso 2 / 12.5	-	63	65	67
06	4	Cortiça / 10	Gesso 1 / 12.5	-	70	73	72
07	5	Madeira OSB / 10	Gesso 2 / 12.5	-	77	75	77
08	3	Gesso 1 / 12.5	-	-	53	53	52
09	4	Gesso 1 / 12.5	-	-	65	64	60



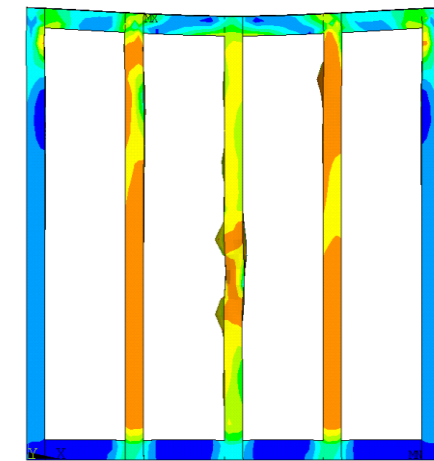
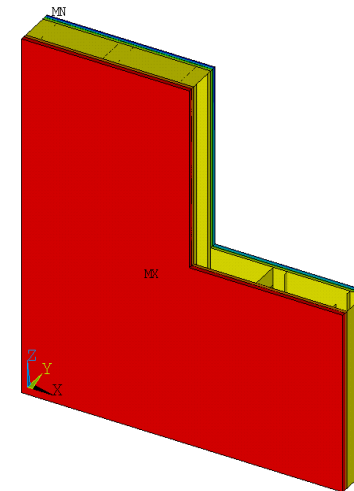
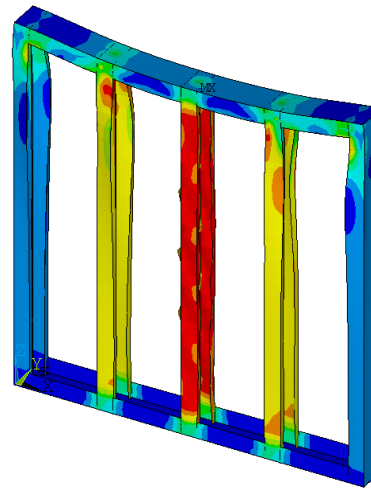
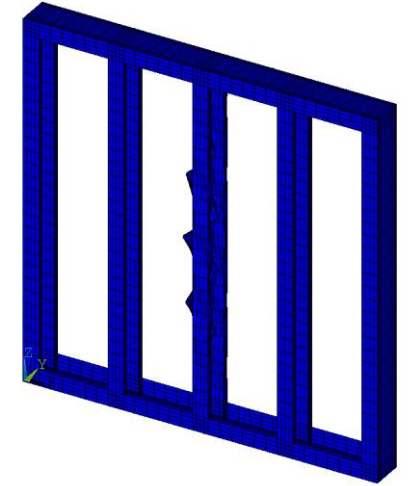
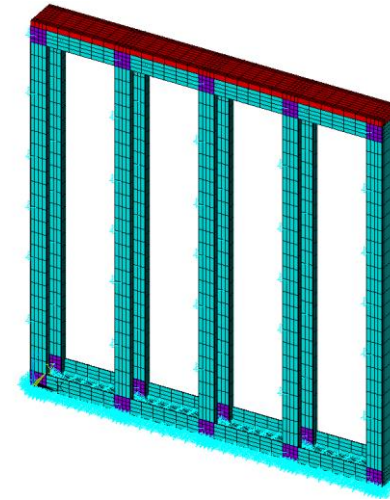
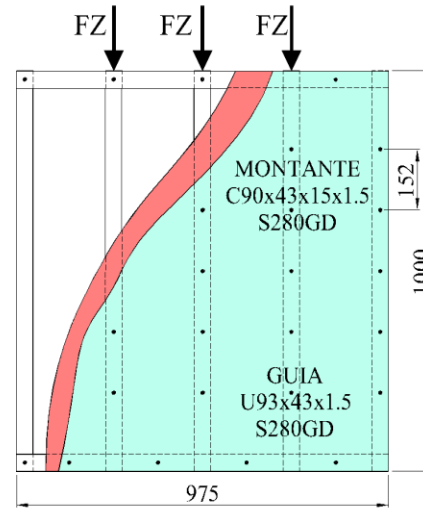
RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES DE AÇO ENFORMADO A FRIO (CARGA).

- Validação do modelo numérico 3D para comportamento térmico para paredes não portantes.
- Previsão da resistência ao fogo para a parede de suporte de carga, usando o mesmo projeto da parede não portante.



RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES DE AÇO ENFORMADO A FRIO - NUMÉRICO

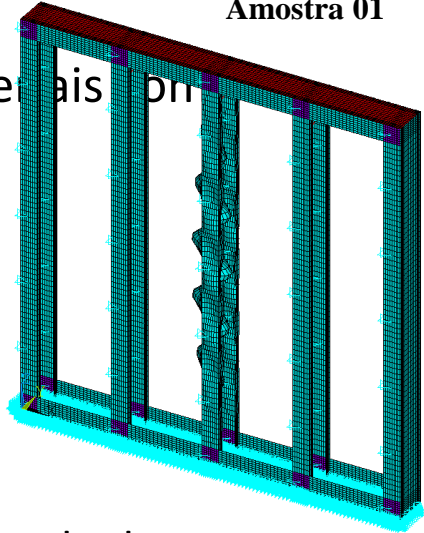
- Modelo com elementos sólidos de casca e elementos sólidos hexaédricos
 - Etapa 1: Análise de estabilidade elástica: Carga crítica e modo de instabilidade
 - Etapa 2: Determinação da capacidade resistente à temperatura ambiente.
 - Etapa 3: Determinação do efeito térmico da ação do fogo.
 - Etapa 4: Determinação da resistência ao fogo para diferentes valores de carga (40, 50, 60, 70 e 80% da capacidade resistente à temperatura ambiente)



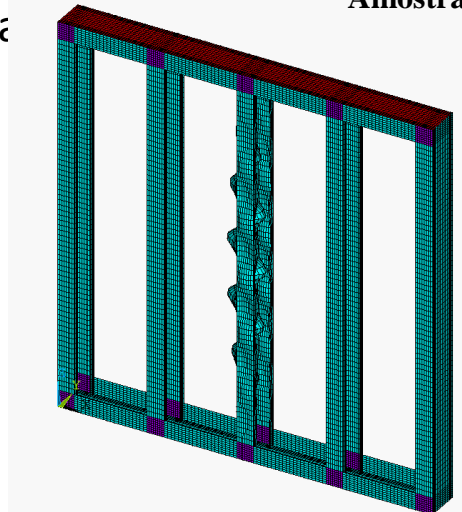
RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES DE AÇO ENFORMADO A FRIO - NUMÉRICO

- Etapa 1: Análise de encurvadura elástica :
 - Elementos finitos lineares com integração completa; Comportamento elástico de materiais com geometria perfeita; Modo de extração: o método Block Lanczos;
 - Condições de limite incluem o efeito de:
 - Fixação ao quadro de teste;
 - Fixação das placas externas (placas não incluídas no modelo).
 - Características do modelo:
 - Juntas são modeladas com sobreposição da região do parafuso, usando dupla espessura;
 - O primeiro valor próprio é selecionado, correspondendo à carga crítica mais baixa e a um modo de instabilidade local;
 - O valor máximo de deslocamento também foi registrado para a definição do fator de escala para atualizar as imperfeições geométricas da estrutura.

Condições fronteira:
Amostra 01



Modo de instabilidade 1:
Amostra 01



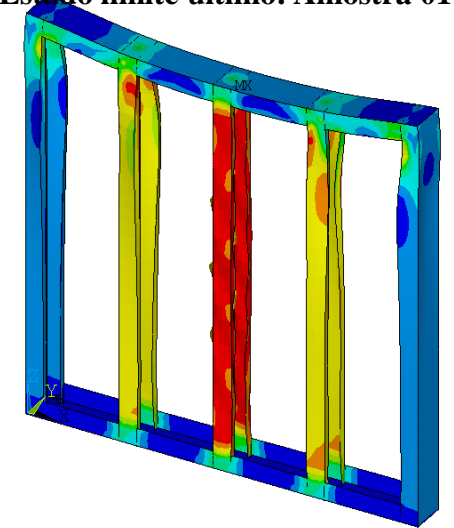
Amostra ID	LSF Número Montantes	Material / espessura [mm] Camada 1	Material / espessura [mm] Camada 2	Cavidade / densidade [kg/m3] Insulation	Carga crítica FZ [N]	Modo de instabilidade
00	5	Gesso 2 / 12.5	-	-	91953	Encurvadura alma
01	5	Gesso 1/ 12.5	-	-	91953	Encurvadura alma
02	5	Gesso 1/ 12.5	Gesso 1/12.5	-	91953	Encurvadura alma
03	5	Gesso 1/ 12.5	-	Rockwool / 75	91953	Encurvadura alma
04	5	Cortiça / 10	Gesso 2 / 12.5	-	91953	Encurvadura alma
05	3	Cortiça / 10	Gesso 2 / 12.5	-	46684	Encurvadura alma
06	4	Cortiça / 10	Gesso 1 / 12.5	-	91052	Encurvadura distorsional na guia horizontal
07	5	Wood OSB / 10	Gesso 2 / 12.5	-	91953	Encurvadura alma
08	3	Gesso 1 / 12.5	-	-	46684	Encurvadura alma
09	4	Gesso 1 / 12.5	-	-	91052	Encurvadura distorsional na guia horizontal



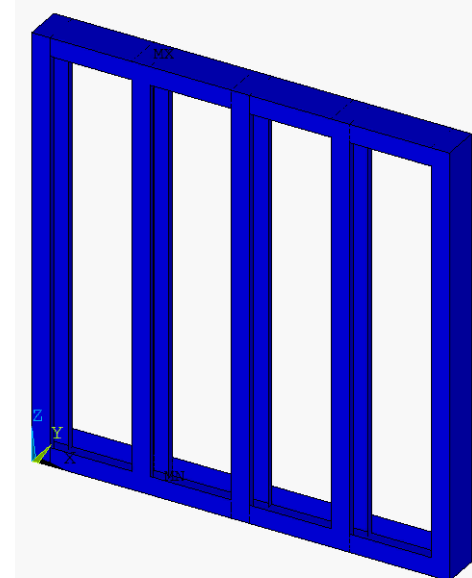
RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES DE AÇO ENFORMADO A FRIO -NUMÉRICO

- Etapa 2: Análise não linear de material e geométrico:
 - Elementos finitos lineares com integração total; Comportamento do material: elástico e perfeitamente plástico com limite de tensão de 280 MPa; Materiais com capacidade de suportar carga (Aço formado a frio);
 - Imperfeição geométrica: As posições nodais são atualizadas com base nos valores máximos de imperfeição da web (Schafer & Peköz, 1998);
 - Condições de limite incluem o efeito de:
 - Fixação ao quadro de teste;
 - Fixação das placas externas (placas não incluídas no modelo);
 - Características do modelo:
 - Juntas são modeladas com superposição da região da pista do parafuso, usando dupla espessura;
 - Método de solução incremental e iterativa, baseado no método do comprimento do arco;
 - O critério de convergência: baseado no deslocamento, com um valor de referência zero e com uma tolerância de 5%.

Estado limite último: Amostra 01

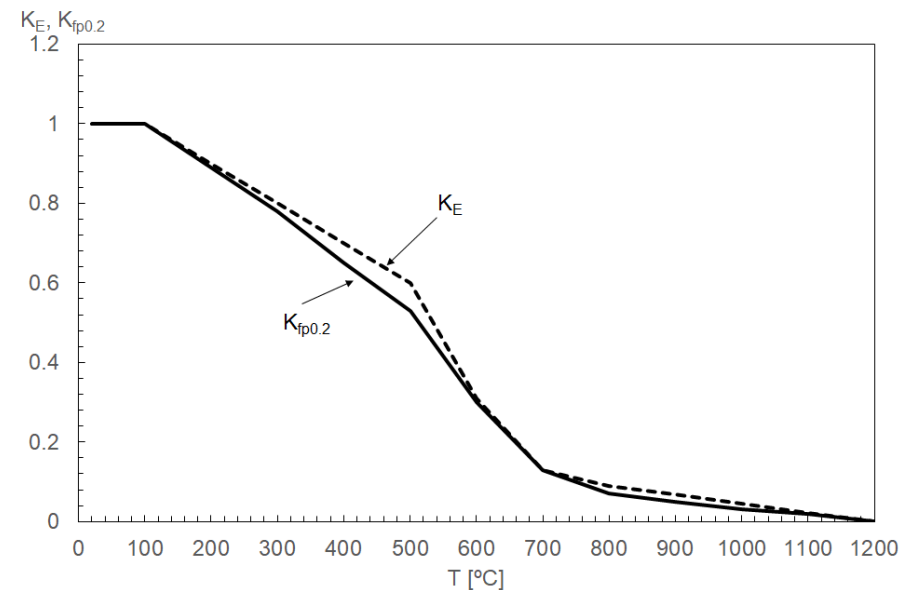
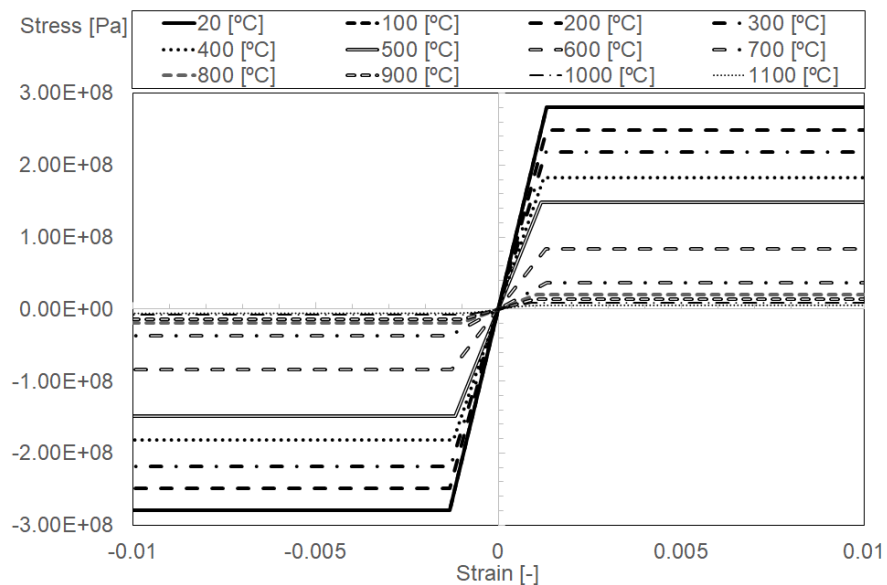


Tensão von Mises - Amostra 01



RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES DE AÇO ENFORMADO A FRIO - NUMÉRICO

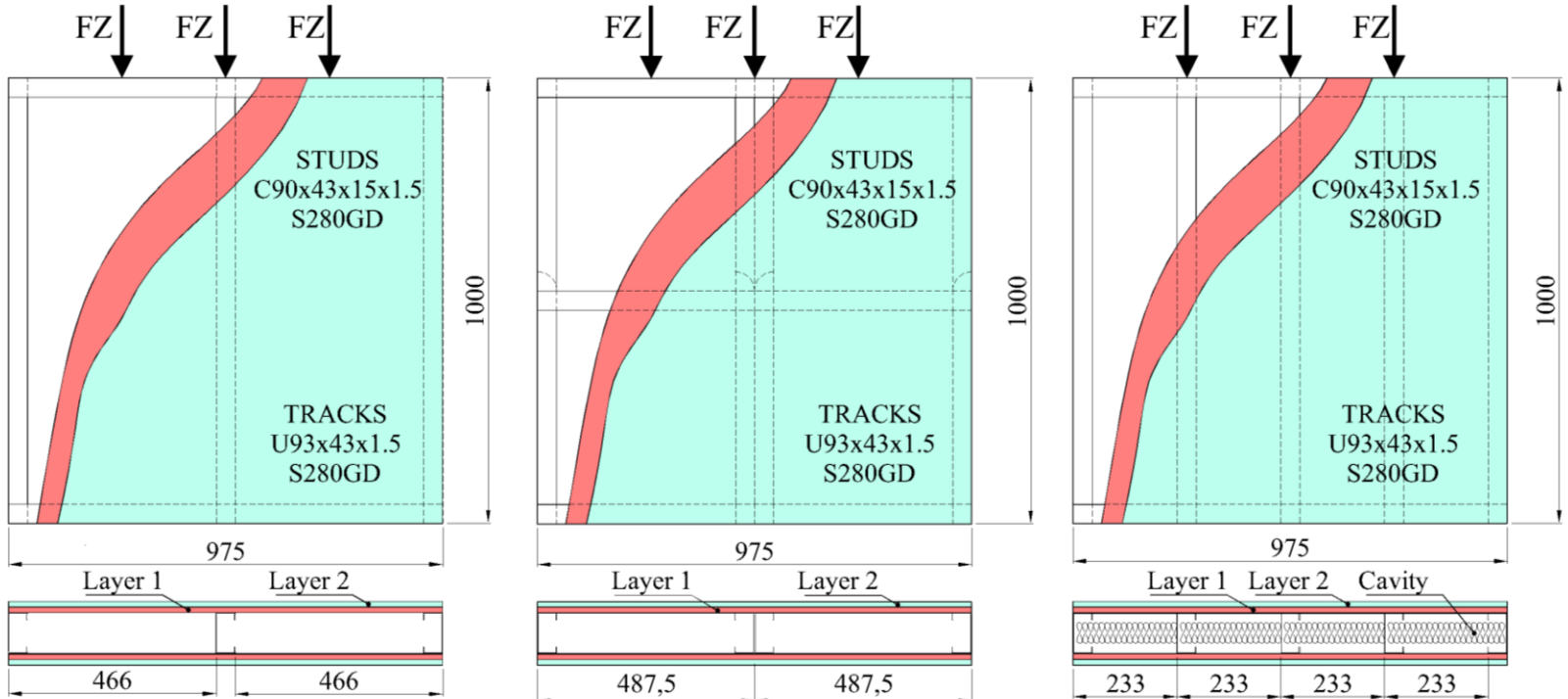
- O aço formado a frio difere do aço laminado a quente:
 - A resistência começa a diminuir com a temperatura após 100 °C;
 - A rigidez diminui com a temperatura após 100 °C.



RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES DE AÇO ENFORMADO A FRIO - NUMÉRICO

- Para cada tipo de estrutura LSF foi definida a capacidade de carga máxima

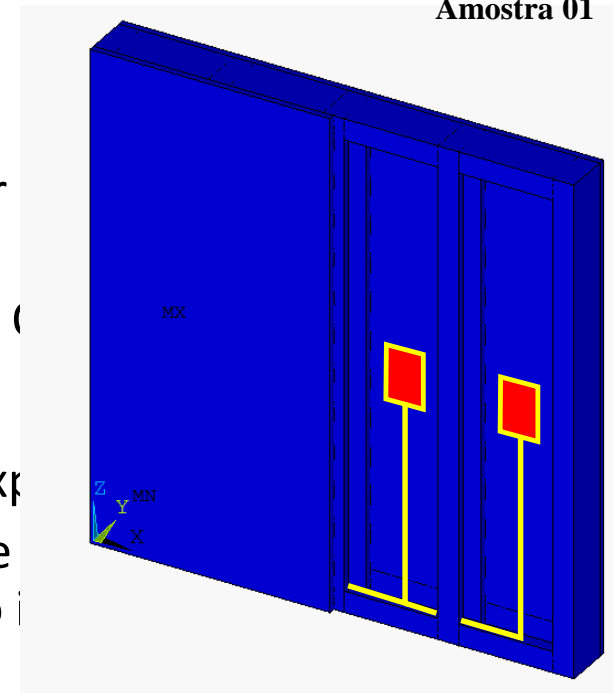
Specimen ID	LSF Number of studs	LOAD BEARING FZ [N]
00/01/02/03/04/07	5	78612
065/09	4	80938
05/08	3	39137



RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES DE AÇO ENFORMADO A FRIO -NUMÉRICO

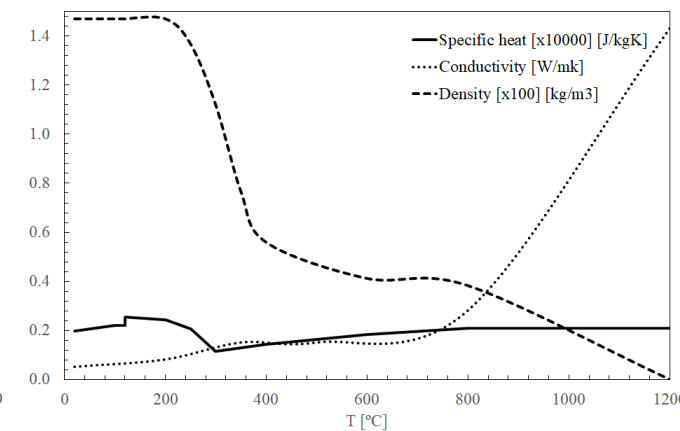
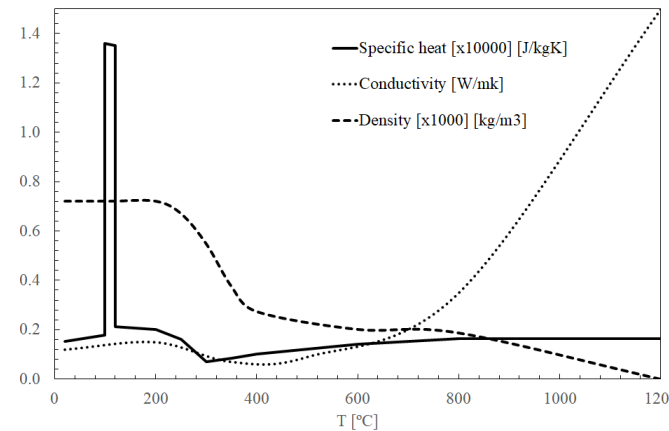
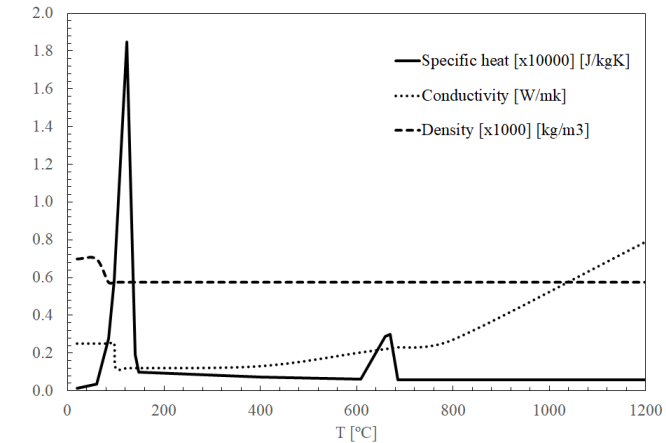
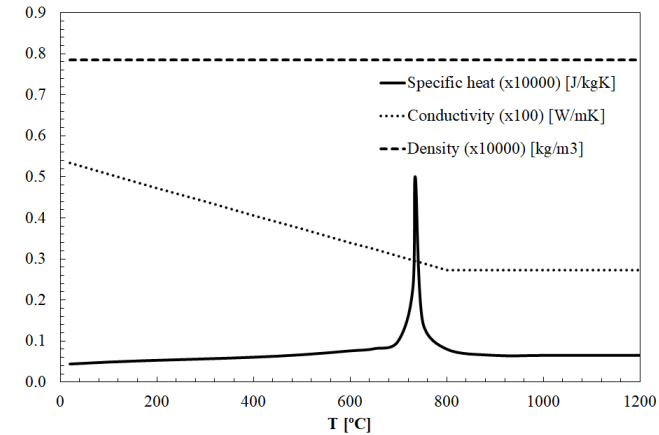
- Etapa 3: Validação do efeito térmico, usando uma análise térmica transitória não linear:
 - Elementos finitos de concha multicamadas foram usados para modelar a LSF e elementos finitos sólidos foram usados para representar as camadas da placa (elementos finitos lineares com integração total);
 - Comportamento material: comportamento não linear para condutividade, calor específico e densidade;
 - Materiais com capacidade de transferir calor: Tudo incluído: aço, gesso, cortiça, (
- Condições de limite incluem o efeito de:
 - Ações em estruturas submetidas ao fogo padrão EN1991-1-2 (expostas e não exp
 - Condições aplicadas na cavidade, com a temperatura global dada pela média de utilizando coeficientes de transferência apropriados. Esta condição de contorno i efeito das fissuras e o efeito da taxa de ignição e liberação de calor do material combustível.
- Tempo incremental de 60 s, com possibilidade de redução para 1 s, com critério de convergência baseado no fluxo de calor, com valor de tolerância de 1E-03 e valor mínimo de referência 1E-06.

Campo de temperatura:
Amostra 01



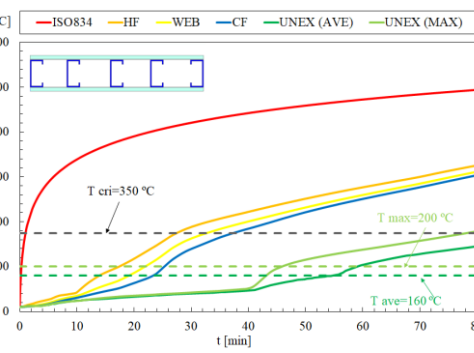
RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES DE AÇO ENFORMADO A FRIO - NUMÉRICO

- Propriedades térmicas a temperatura elevada:
 - As propriedades do aço estão de acordo com EN 1993-1-2;
 - As propriedades de gesso do tipo X estão de acordo com a referência de Mohamed A. Sultan (Sultan, 1996);
 - As propriedades da cortiça foram assumidas o a mesma forma da madeira, mas devidamente ajustadas com os valores determinados à temperatura ambiente e a remoção do pico de C_p ;
 - As propriedades madeira estão de acordo com EN 1995-1-2.
- A maioria das propriedades é fictícia para incluir fenômenos físicos de transformação.

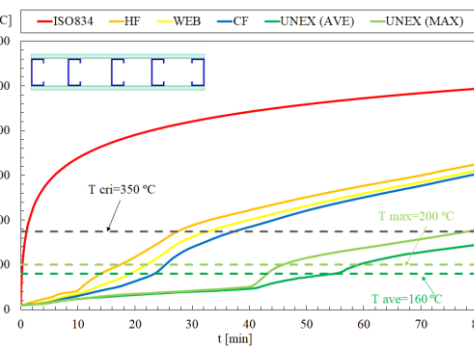


RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES DE AÇO ENFORMADO A FRIO - NUMÉRICO

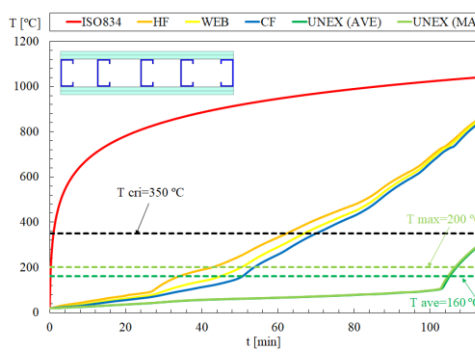
• AMOSTRA 0



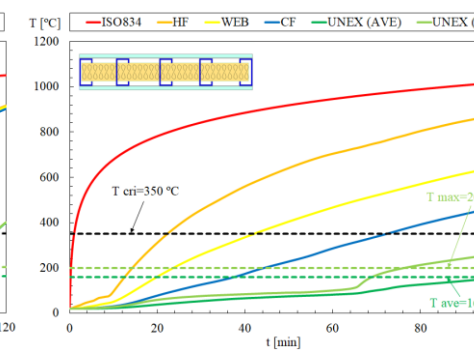
• AMOSTRA 1



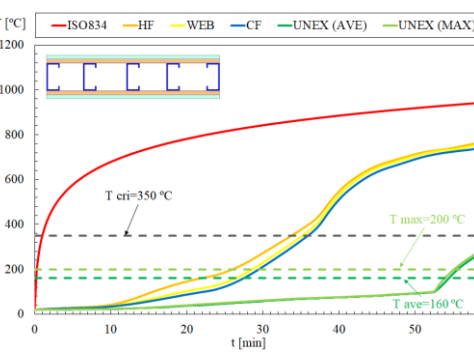
• AMOSTRA 2



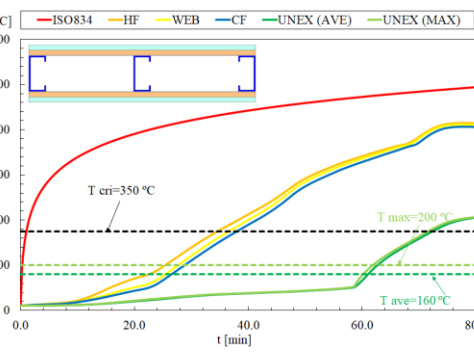
• AMOSTRA 3



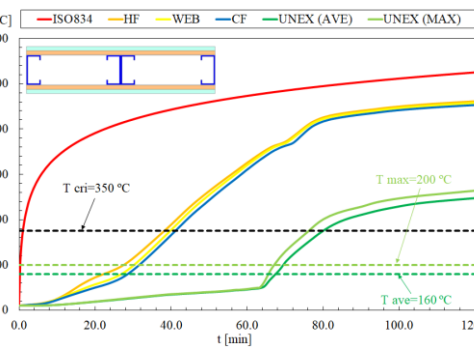
• AMOSTRA 4



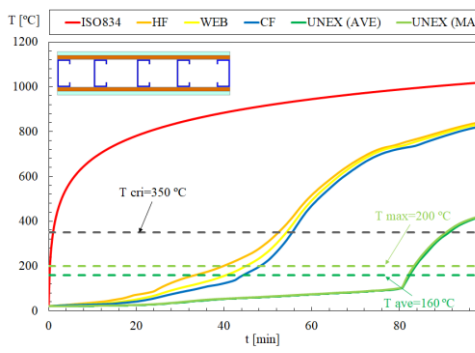
• AMOSTRA 5



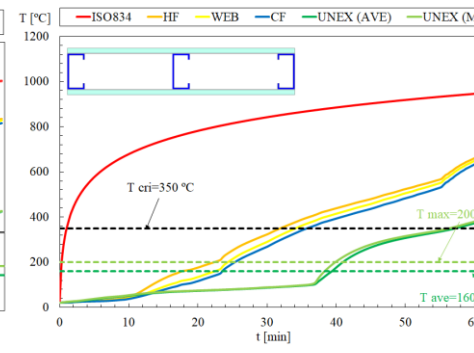
• AMOSTRA 6



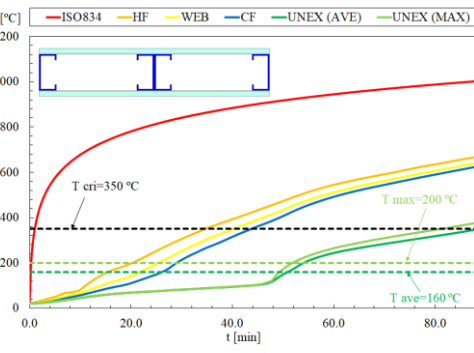
• AMOSTRA 7



• AMOSTRA 8

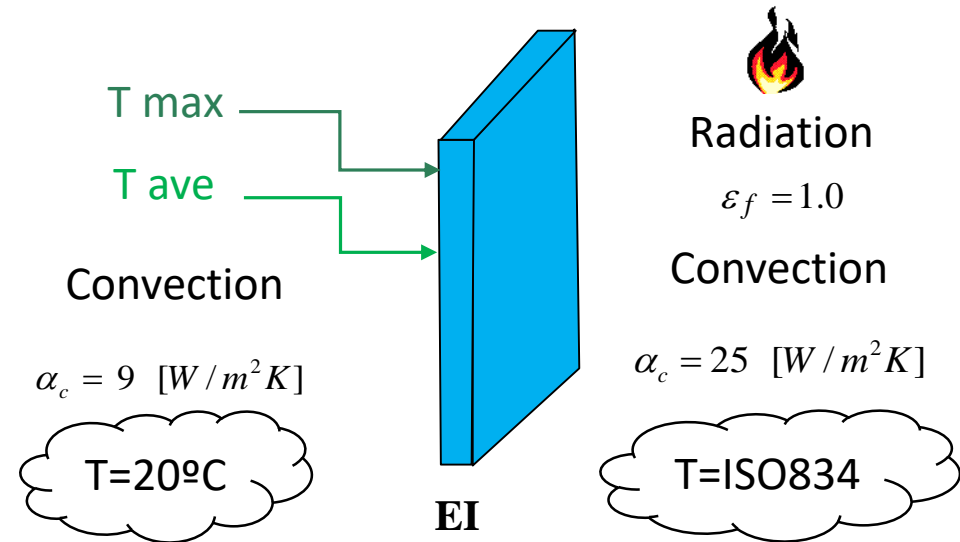


• AMOSTRA 9



RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES DE AÇO ENFORMADO A FRIO -NUMÉRICO

- Comparação dos resultados para o lado não exposto:
 - Com base nos critérios utilizados para teste experimental :
 - aumento médio da temperatura na face não exposta, 140 ° C acima da temperatura média inicial, ou;
 - aumento máximo da temperatura em qualquer ponto limitado na face não exposta, 180 ° C acima da temperatura média inicial.
 - O erro relativo está entre 1% e 35%.

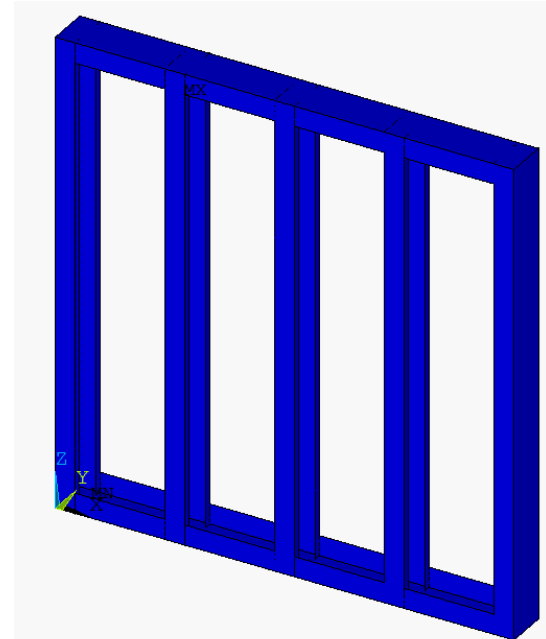


Amostra ID	T max=200 (DT) [min]	T ave=160 (DT) [min]	T ave=160 (IR) [min]	T max=200 (DT) [min]	Difference T max [%]	T ave=160 (DT) [min]	Difference T max [%]
	Exp	Exp	Exp	Exp	(Exp-Num)/Exp	Num	(Exp-Num)/Exp
01	70	71	62	54	22	45	35
02	119	118	117	105	11	106	10
03	89	87	89	99	11	76	12
04	55	51	50	54	1	55	7
05	63	65	67	61	3	61	6
06	70	73	72	67	4	67	8
07	77	75	77	82	6	83	10
08	53	53	52	39	26	39	26
09	65	64	60	51	21	50	21

RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES DE AÇO ENFORMADO A FRIO - NUMÉRICO

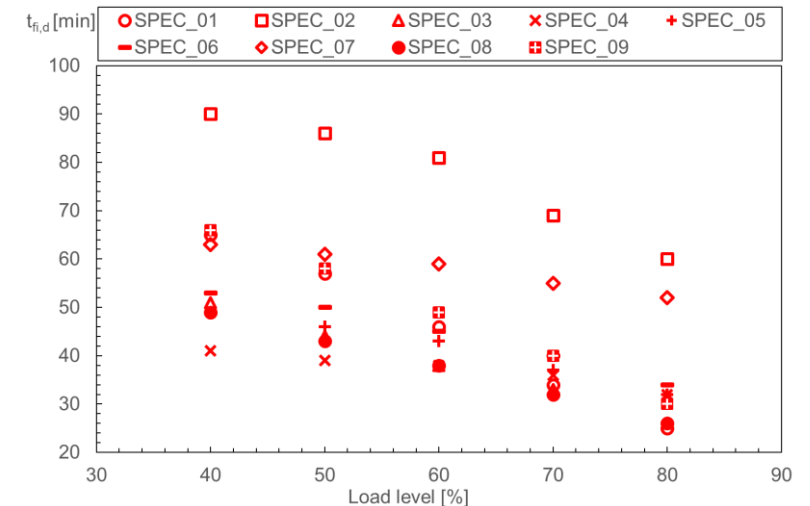
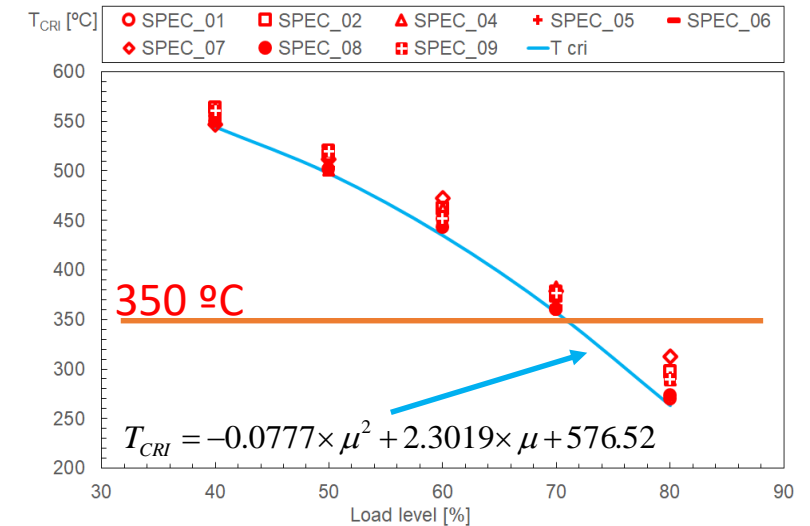
- Etapa 4: Resistência ao fogo, dependendo do nível de carga, usando uma análise não linear de material e geométrico:
 - A resistência ao fogo é aproximada para diferentes níveis de carga (40, 50, 60, 70 e 80%);
 - Este último passo força uma modificação do elemento finito da casca, enquanto elementos sólidos são removidos do modelo;
 - O comportamento de tensão - deformação usa um modelo elástico perfeitamente plástico a temperatura elevada;
 - As restrições para os deslocamentos são exatamente as mesmas que as consideradas na etapa estrutural anterior (primeiro e segundo passo);
 - Assume-se que as placas de gesso, cortiça e OSB não contribuem para o cálculo da capacidade de carga, mas o efeito térmico destes materiais é considerado durante a etapa anterior e considerado nesta última etapa, lendo o campo de temperatura da LSF para cada passo do tempo;
 - análise estática incremental e iterativa, com carga constante, com um intervalo de tempo igual a 60 s, com possibilidade de ser reduzida para 0,1 s;
 - O método de Newton Raphson usa um critério de convergência baseado em deslocamento com um valor de referência zero e uma tolerância de 5%.

Estado limite último: Amostra 01



RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES DE AÇO ENFORMADO A FRIO -NUMÉRICO

- Uma análise paramétrica foi desenvolvida com 45 simulações para determinar a resistência ao fogo para diferentes níveis de carga (μ).
 - Os resultados incluem o tempo em minutos completos e a temperatura crítica para a estrutura do LSF.
 - Potenciais modos de deformada: Encurvadura local da alma e distorsional dos montantes.
 - A resistência ao fogo diminui com o aumento do nível de carga.
 - A temperatura crítica média de todos as amostras é aproximadamente a mesma para cada nível de carga, permitindo definir a relação entre T_{cri} e μ .
 - o método de cálculo simples apresentado na norma EN1993-1-2 ($T_{cri} = 350 \text{ }^\circ\text{C}$) é conservador para a maioria dos casos simulados e inseguro para o caso do nível de carga superior a 70%.



CONCLUSÕES E AGRADECIMENTOS

- Foram apresentados alguns dos resultados experimentais desenvolvidos no IPB.
- Todos os ensaios estão documentados em referências dos autores e resultaram de trabalhos de investigação dos intervenientes.
- Todos os modelos numéricos apresentados foram validados por ensaios experimentais. Os modelos apresentados podem ser simples ou complexos, conforme o interesse e detalhe de comparação.
- Agradecimento especial a todos os meus colegas do Instituto Politécnico de Bragança e de outras instituições de ensino superior, com as quais se mantém relações de colaboração científica.
- Agradecimento especial a todas as empresas que têm mantido relações de transferência de tecnologia.



APAET: TERTÚLIAS SOBRE EXPERIMENTAÇÃO – Coimbra ISEC, 13 de Dezembro de 2018



INSTITUTO
SUPERIOR DE
ENGENHARIA
DE COIMBRA



Resistência ao Fogo de Elementos de Estruturas

Paulo Piloto

Departamento de Mecânica Aplicada, Instituto Politécnico de Bragança



Paulo A. G. Piloto^{a(*)}

^a Instituto Politécnico de Bragança (IPB), Portugal
LAETA-INEGI Portugal

(*) ppiloto@ipb.pt

