

4^{as} JORNADAS de Segurança aos Incêndios Urbanos



Instituto Politécnico de Bragança

Atas dos Artigos



TÍTULO:

Atas dos Artigos das 4^{as} Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos

EDIÇÃO:

ALBRASCI (Associação Luso-Brasileira para a Segurança Contra Incêndio)

EDITORES:

Débora Ferreira (IPB), Elza Fonseca (IPB), João Carlos Viegas (LNEC), João Paulo C. Rodrigues (UC - ALBRASCI), José Pedro Lopes (ANPC), Luís Mesquita (IPB), Nuno Lopes (UA), Paulo Piloto (IPB)

DESIGN GRÁFICO:

Soraia Maduro – CIPweb IPB

EDIÇÃO:

1^a, Novembro de 2014

ISBN:

978-989-97210-2-9

DEPÓSITO LEGAL:

382800/14

IMPRESSÃO:

Bringráfica – Indústrias Gráficas, Lda

OBSERVAÇÃO:

Nenhuma parte desta obra pode ser reproduzida sem autorização escrita dos autores e da editora

PREFÁCIO

A Segurança Contra Incêndio de Edifícios (SCIE) atingiu a sua maturidade em Portugal fruto do desenvolvimento sustentado que tem tido na última década não só ao nível da investigação com a realização de vários projetos nacionais e europeus em várias instituições Portuguesas, como com o aparecimento de formação avançada (mestrado e doutoramento) e formação profissional em várias áreas da SCIE e da criação duma regulamentação uniforme para a área, suportada por uma normalização também ela completa e abrangente de toda a área da SCIE. Este desenvolvimento trará enormes retornos não só ao nível da segurança das edificações, bens e pessoas, como económicos, com um reflexo positivo para a sociedade. Portugal está hoje na primeira linha do desenvolvimento na área da SCIE. Poderemos dizer que projetar e construir hoje é mais seguro em termos de SCIE do que há quinze anos atrás e por isso temos que nos sentir orgulhosos.

No acompanhamento deste desenvolvimento, os Laboratórios das instituições públicas Portuguesas também se apetrecharam com novos e importantes equipamentos, que permitem o ensaio e certificação dos produtos das indústrias nacionais, tornando estas mais competitivas na sua ação não só no mercado nacional como internacional.

Portugal é hoje uma referência mundial na área da SCIE, sendo respeitado no Brasil e restantes PALOP como no resto do mundo. Neste relacionamento deve se destacar a ligação com o Brasil não só ao nível dos bombeiros, dos técnicos da empresas e dos professores e investigadores que na ALBRASCI – Associação Luso-Brasileira para a Segurança Contra Incêndio encontraram um espaço de discussão e colaboração em diferentes iniciativas em SCIE.

As Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos começaram em 2006, aquando da realização do primeiro Mestrado em Segurança Contra Incêndios Urbanos na Universidade de Coimbra, e em cada nova edição o sucesso vai-se renovando com o aparecimento de novos trabalhos científicos com um nível científico cada vez maior. Estas Jornadas têm constituído um fórum de debate alargado entre técnicos e demais interessados na área da SCIE.

As 4^{as} Jornadas em SCIE (4JORNINC) realizam-se este ano em Bragança, no Instituto Politécnico, pois esta é uma Escola que ao longo das últimas décadas tem realizado trabalho na área e criou um grupo de investigação que tem atuado ao maior nível em termos nacionais e internacionais. O número e qualidade das publicações submetidas a este evento foi muito bom pelo que o sucesso das 4JORNINC está assegurado.

Para finalizar queria agradecer a sua participação nestas Jornadas que serão certamente do seu maior interesse e profícuas para o seu desenvolvimento profissional.

João Paulo C. Rodrigues

COMISSÃO ORGANIZADORA

Débora Ferreira (IPB)
Elza Fonseca (IPB)
João Paulo C. Rodrigues (UC - ALBRASCI)
João Carlos Viegas (LNEC)
Luís Mesquita (IPB)
Nuno Lopes (UA)
José Pedro Lopes (ANPC)
Paulo A. G. Piloto (IPB)



Laboratório Nacional de Engenharia Civil

A small, detailed illustration of a building facade with multiple windows and a central entrance, positioned below the LNEC logo.

COMISSÃO CIENTÍFICA

Aldina M. da Cruz Santiago (FCTUC)
António Moura Correia (IPC)
A. Sérgio Miguel (U Minho)
Carlos Ferreira de Castro (Action Modulers)
Carlos Pina dos Santos (LNEC)
Cristina Calmeiro dos Santos (IPCB)
Débora Ferreira (IPB)
Elza Fonseca (IPB)
José Carlos M. Góis (FCTUC)
João Carlos Viegas (LNEC)
João Ferreira (IST)
João Paulo C. Rodrigues (FCTUC)
João Pinheiro (CDOS Bragança – ANPC)
João Ramôa Correia (IST)
Joaquim Barros (U Minho)
Jorge Gil Saraiva (LNEC)
Lino Forte Marques (FCTUC)
Luís Laím (FCTUC)
Luís Mesquita (IPB)
Miguel Chichorro Gonçalves (FEUP)
Nuno Lopes (UA)
Paulo A. G. Piloto (IPB)
Paulo Jorge M. F. Vila Real (UA)
Paulo Lourenço (U Minho)
Pedro Martins Arezes (U Minho)
Pedro Vieira Carvalheira (FCTUC)
Rui Faria (FEUP)
Vítor Carlos T. Abrantes (FEUP)

ÍNDICE

PREFÁCIO	i
COMISSÃO ORGANIZADORA	iii
COMISSÃO CIENTÍFICA	iv
PALESTRAS	1
O DIMENSIONAMENTO AO FOGO DE ESTRUTURAS E OS EUROCÓDIGOS ESTRUTURAIS	3
PREVENÇÃO E PROTEÇÃO CONTRA OS RISCOS DERIVADOS DE ATMOSFERAS EXPLOSIVAS.....	27
GRAU DE PRONTIDÃO DOS MEIOS DE SOCORRO E A EFICÁCIA DOS BOMBEIROS PORTUGUESES	37
CONTROLO DE FUMO EM GRANDES ÁTRIOS.....	47
VALIDAÇÃO NUMÉRICA DE ENSAIOS EXPERIMENTAIS EM CONDIÇÕES DE INCÊNDIO.....	61
ARTIGOS	111
SESSÃO DE ARTIGOS 1:	111
ANÁLISE DA REGULAMENTAÇÃO PORTUGUESA DE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS E PROPOSTA DA SUA APLICAÇÃO EM MOÇAMBIQUE.....	113
UMA VISÃO SISTÊMICA DA SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO EM EDIFICAÇÕES NO BRASIL E A POSSIBILIDADE DE IMPLANTAÇÃO DE UM REGULAMENTO NACIONAL.....	127
ANÁLISE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO SEGUNDO OS PRECEITOS DE DESEMPENHO, DURABILIDADE E SEGURANÇA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO CONFORME AS PRESCRIÇÕES NORMATIVAS BRASILEIRAS.....	139
SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO EM INSTALAÇÕES DE ARMAZENAMENTO DE MERCADORIAS.....	149
INCÊNDIOS EM TÚNEIS RODOVIÁRIOS – ENSAIOS À ESCALA REAL	157
IMPLEMENTAÇÃO DA DIRETIVA ATEX NO SETOR INDUSTRIAL	167
CONCEÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE REDES SECAS.....	177
COMPUTATIONAL SIMULATION ON THE PERFORMANCE OF AIR PLANE JETS FOR SMOKE CONTROL.....	187
CARACTERIZAÇÃO DOS JATOS GERADOS POR VENTILADORES DE IMPULSO.....	199
SESSÃO DE ARTIGOS 2:	213
ANÁLISE DO PERIGO DE INCÊNDIO NA ANTIGA VILA DOS PESCADORES EM PORTO ALEGRE (RIO GRANDE DO SUL - BRASIL).....	215
ADEQUAÇÃO DO MÉTODO DE GREENER À AVALIAÇÃO DO RISCO DE INCÊNDIO NOS CENTROS URBANOS ANTIGOS.....	225
ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NA AVALIAÇÃO DO RISCO DE INCÊNDIO DE EDIFÍCIOS INDUSTRIAIS.....	235

AVALIAÇÃO DE RISCO DE INCÊNDIO URBANO – PROPOSTA DE UM MÉTODO PARA ANÁLISE E GESTÃO DO EDIFICADO EXISTENTE	245
ORGANIZAÇÃO E GESTÃO DA SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS: PRINCIPAIS GRUPOS DE INTERESSE.....	253
A SEGURANÇA OPERACIONAL NA ATIVIDADE DE SALVAMENTO E DE COMBATE A INCÊNDIOS	263
SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO EM EDIFÍCIOS GESTÃO NO USO DOS EDIFÍCIOS	273
ESTUDO DA EVACUAÇÃO EM CASO DE INCÊNDIO EM EDIFÍCIOS.....	283
O CONTROLO DE FUMO POR MEIOS ATIVOS E A EVACUAÇÃO EM LOCAIS DE RISCO.....	293
SESSÃO DE ARTIGOS 3:	305
ANÁLISE NUMÉRICA DA ENCURVADURA POR ESFORÇO TRANSVERSO EM VIGAS SUJEITAS A INTERAÇÃO ENTRE ESFORÇO TRANSVERSO E MOMENTO FLETOR A TEMPERATURAS ELEVADAS	307
ESTUDO PARAMÉTRICO DA RESISTÊNCIA AO FOGO DE VIGAS EM C ENFORMADAS A FRIO	319
EFFECT OF ELEVATED TEMPERATURES ON THE BOND STRENGTH OF FRP-STRENGTHENED BRICKS	331
ESTUDIO NUMÉRICO DE VIGAS PARCIALMENTE EMBEBIDAS SOMETIDAS A FLEXIÓN A ALTAS TEMPERATURAS.....	341
RESISTÊNCIA AO FOGO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE AÇO INOXIDÁVEL COM SECÇÕES TUBULARES QUADRADAS DE CLASSE 4 SUJEITOS A FLEXÃO COMPOSTA COM COMPRESSÃO	351
COMPORTAMENTO AO FOGO DE ELEMENTOS DE COMPARTIMENTAÇÃO DE BASE GESSO SUJEITOS A INCÊNDIO NATURAL	363
COMPORTAMENTO AO FOGO DE VIGAS DE BETÃO ARMADO REFORÇADAS À FLEXÃO COM LAMINADOS DE CFRP COLADOS EXTERIORMENTE. ESTUDO EXPERIMENTAL	375
ANÁLISE NUMÉRICA DE VIGAS MISTAS PARCIALMENTE REVESTIDAS DE AÇO E CONCRETO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO.....	387
ANÁLISE TÉRMICA DE PILARES DE AÇO EXPOSTOS A INCÊNDIOS LOCALIZADOS.....	399
SESSÃO DE ARTIGOS 4:	411
PROPAGAÇÃO DE CHAMAS ATRAVÉS DE VÃOS DE FACHADA EM EDIFÍCIOS.....	413
COMPORTAMENTO AO FOGO DE COLUNAS DE GFRP. ESTUDO EXPERIMENTAL	425
BETÕES CORRENTES EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO.....	435
ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS MODELOS DE CÁLCULO DA EN1993-1-2 PARA O DIMENSIONAMENTO AO FOGO DE VIGAS C EM AÇO ENFORMADAS A FRIO.....	445
BETÃO COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE AÇO E TÊXTEIS RECICLADAS DE PNEU SUJEITO A ALTAS TEMPERATURAS.....	457
ANÁLISE TÉRMICA 2D E 3D DE UM PAVIMENTO/COBERTURA EM MADEIRA COM PERFURAÇÕES.....	467
RESISTÊNCIA AO FOGO DE VIGAS EM MADEIRA E SECÇÕES DE PERFIS EM AÇO.....	475

4^{as} Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos
Instituto Politécnico de Bragança - Portugal - 6-7 de Novembro de 2014

REDUÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DAS SECÇÕES METÁLICAS PARCIALMENTE EMBEBIDAS COM BETÃO SUJEITAS AO FOGO	483
COMPORTAMENTO AO FOGO DE PAREDES EM TABIQUE.....	493
SESSÃO DE ARTIGOS 5:.....	505
RESISTÊNCIA AO FOGO DE LAJES CELULARES EM MADEIRA COM DIFERENTES PERFURAÇÕES – ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	507
RESISTÊNCIA AO FOGO DE LAJES CELULARES EM MADEIRA COM DIFERENTES PERFURAÇÕES – ANÁLISE NUMÉRICA.....	517
RESISTÊNCIA AO FOGO DE BLOCOS DE BETÃO LEVE À BASE DE CAROÇO DE ESPIGA DE MILHO	527
REAÇÃO AO FOGO DE BETÃO COM E SEM FIBRAS DE POLIPROPILENO – ANÁLISE EXPERIMENTAL E VALIDAÇÃO NUMÉRICA.....	537
VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO FOGO DE ELEMENTOS NÃO UNIFORMES EM AÇO - VALIDAÇÃO NUMÉRICA DO MÉTODO GERAL DO EC3.....	549
FORMULAÇÃO E COMPORTAMENTO DE TINTAS INTUMESCENTES.....	559
ESTUDIO NUMÉRICO DE VIGAS PARCIALMENTE EMBEBIDAS SOMETIDAS A FLEXIÓN EXPUESTAS A FUEGO ISO834.....	569
COMPORTAMENTO AO FOGO DE PERFIS C E Z ENFORMADOS A FRIO	579
ENSAIOS DE REAÇÃO AO FOGO DE TINTAS INTUMESCENTES COM GRANULADO DE CORTIÇA.....	589
FATOR DE REDUÇÃO DO NÍVEL DE CARREGAMENTO, η_n : VALORES DE PROJETO E CONSEQUÊNCIAS DA SIMPLIFICAÇÃO APONTADA NO EC2-1-2.....	599
NÍVEL DE CARREGAMENTO À TEMPERATURA NORMAL, n : VALORES DE PROJETO E VALORES MÁXIMOS APONTADOS NO EC2-1-2	609

REDUÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DAS SECÇÕES METÁLICAS PARCIALMENTE EMBEBIDAS COM BETÃO SUJEITAS AO FOGO

David Almeida*
Aluno
IPB - Bragança

Paulo Piloto
Professor
IPB - Bragança

A.B Ramos-Gavilán
Professora
U. Salamanca

Luís Mesquita
Professor
IPB - Bragança

RESUMO

A Resistência ao fogo de secções parcialmente embebidas em betão depende da evolução da temperatura durante o tempo de exposição. O Eurocódigo 4, parte 1.2 [1], propõe a análise da secção transversal, utilizando o método das quatro componentes (banzos, alma, reforço e betão) para determinar a temperatura média das componentes e a redução da geometria efetiva, para várias classes de resistência ao fogo (R30, R60, R90 e R120). Este trabalho tem como objetivo avaliar os coeficientes empíricos e as expressões apresentadas no anexo informativo G para determinação da: temperatura do banzo; redução da altura efetiva da alma; secção resistente do betão e temperatura média; redução das características de rigidez e resistência do reforço. Será utilizado um método avançado de cálculo (elementos finitos não-linear material em regime transiente) para avaliar o efeito da temperatura em todos estes parâmetros.

PALAVRAS-CHAVE: Secções parcialmente embebidas; Resistência ao fogo; Métodos simplificados de cálculo; Métodos avançados de cálculo.

1. INTRODUÇÃO

Os elementos de secção parcialmente embebida com betão são normalmente constituídos por perfis metálicos laminados, revestidos com betão reforçado entre os banzos. A secção composta é responsável pelo aumento da rigidez à flexão e torção, quando comparada com a mesma secção do perfil metálico. Para além destas vantagens, o betão reforçado é responsável pelo aumento da resistência ao fogo destes elementos. A Resistência ao fogo de secções parcialmente embebidas em betão depende da evolução da temperatura. Segundo o Eurocódigo 4, parte 1.2 [1], a análise do comportamento ao fogo pode ser feita pelo método das quatro

*Autor correspondente – Instituto Politécnico de Bragança. Campus Santa Apolónia, 5301-857 Bragança.

Telef.: +351 273 303157, Fax: +351 273 313051, E-mail: djra16@hotmail.com

componentes (Banzos, alma, aço de reforço e betão) quando expostas à ação do fogo padrão e para diferentes classes de resistência ao fogo (R30, R60, R90 e R120). Este estudo tem como objetivo avaliar os parâmetros do anexo G: temperatura média do banzo, redução da altura efetiva da alma, área residual e temperatura média do betão e redução das características do reforço. Para estudar o efeito da ação do fogo nestas secções foram analisados dois tipos de secção reta, correspondentes à gama de perfis IPE 200-500 e HEB 160-500. Na figura 1 estão representados os parâmetros de caracterização da secção, identificadas as quatro componentes e apresentada a malha de elementos finitos utilizada. Será utilizado o método dos elementos finitos em regime transiente, com um método de solução não linear para avaliar o efeito da ação do fogo nestas secções. O método de elementos finitos pressupõe a solução da Eq. 1 no domínio (Ω) e da Eq. 2 na fronteira ($\partial\Omega$). Nestas equações: T representa a variável temperatura de cada material; $\rho(T)$ define a massa específica; $C_{p(T)}$ define o calor específico; $\lambda(T)$ define a condutividade térmica; α_c especifica o coeficiente de convecção; T_g representa a temperatura da curva de incêndio padrão; Φ especifica o fator de forma; ε_m representa a emissividade de cada material; ε_f especifica a emissividade do compartimento de incêndio; σ especifica a constante de Stefan-Boltzmann. É assumida a utilização da curva de incêndio padrão ISO834 [2] na envolvente da secção (4 faces expostas), permitindo especificar T_g .

$$\nabla \cdot (\lambda(T) \cdot \nabla T) = \rho(T) \cdot C_{p(T)} \cdot \partial T / \partial t \quad (\Omega) \quad (1)$$

$$(\lambda(T) \cdot \nabla T) \cdot \hat{n} = \alpha_c (T_g - T) + \Phi \cdot \varepsilon_m \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot (T_g^4 - T^4) \quad (\partial\Omega) \quad (2)$$

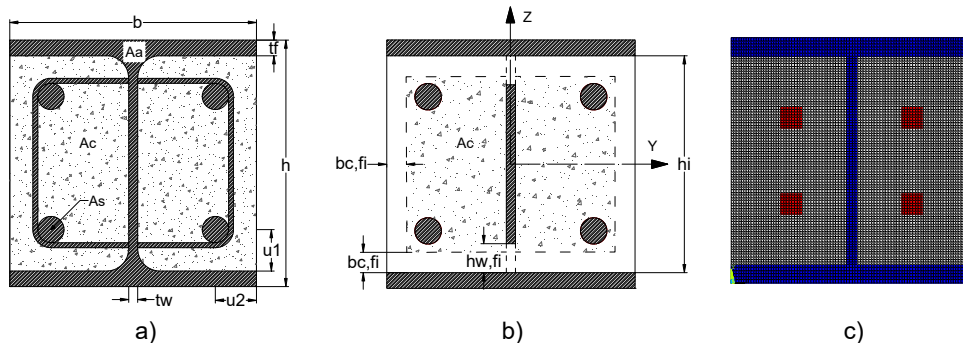


Figura 1: Secção parcialmente embebida com betão: a) parâmetros da secção, b) secção reduzida para dimensionamento ao fogo, c) modelo de elementos finitos 2D.

2. SECÇÕES PARCIALMENTE EMBEBIDAS

As secções analisadas foram caracterizadas, tendo em consideração o método tabular de projeto de colunas em condições de incêndio [1], caracterizando as dimensões mínimas da secção reta (b, h), distâncias mínimas de recobrimento do reforço (u) e percentagem mínima de reforço ($A_s / (A_s + A_c)$). As secções devem ainda ser caracterizadas em função do nível de carregamento $\eta_{fi,t}$, e pela razão entre a espessura da alma t_w e a espessura do banzo t_f , ver figura 1. Este método tabular aplica-se às classes de aço estrutural S235, S275 e S355 e para percentagem mínima de reforço entre 1% e 6%. Na tabela 1 estão definidas as dimensões principais, em particular o número de varões de reforço, o diâmetro de cada varão Φ , as dimensões de recobrimento nas direções y (u_2) e z (u_1).

Redução das caract. das secções met. parcialmente embebidas com betão sujeitas ao fogo

Tabela 1 - Características das secções em estudo.

Perfil	Nº de varões	h_j [mm]	Φ [mm]	A_s [mm ²]	A_c [mm ²]	u_1 [mm]	u_2 [mm]	u [mm]	$\frac{A_s}{A_s + A_c}$	$\frac{t_w}{t_f}$	A_m/V [m ⁻¹]
HEB160	4	134.0	12	452	19916	40	40	40	2,22	0,62	25,00
HEB180	4	152.0	12	452	25616	40	40	40	1,74	0,61	22,22
HEB200	4	170.0	20	1257	31213	50	50	50	3,87	0,60	20,00
HEB220	4	188.0	25	1963	37611	50	50	50	4,96	0,59	18,18
HEB240	4	206.0	25	1963	45417	50	50	50	4,14	0,59	16,67
HEB260	4	225.0	32	3217	53033	50	50	50	5,72	0,57	15,38
HEB280	4	244.0	32	3217	62541	50	50	50	4,89	0,58	14,29
HEB300	4	262.0	32	3217	72501	50	50	50	4,25	0,58	13,33
HEB320	4	279.0	32	3217	77275	50	50	50	4,00	0,56	12,92
HEB340	4	297.0	40	5027	80509	50	50	50	5,88	0,56	12,55
HEB360	4	315.0	40	5027	85536	50	50	50	5,55	0,56	12,22
HEB400	4	352.0	40	5027	95821	70	50	59	4,98	0,56	11,67
HEB450	4	398.0	40	5027	108801	70	50	59	4,42	0,54	11,11
HEB500	4	444.0	40	5027	121735	70	50	59	3,97	0,52	10,67
IPE200	4	183.0	12	452	16823	50	40	45	2,62	0,66	30,00
IPE220	4	201.6	20	1257	19730	50	40	45	5,99	0,64	27,27
IPE240	4	220.4	20	1257	23825	50	40	45	5,01	0,63	25,00
IPE270	4	249.6	25	1963	30085	50	40	45	6,13	0,65	22,22
IPE300	4	278.6	25	1963	37848	50	40	45	4,93	0,66	20,00
IPE330	4	307.0	25	1963	44854	50	40	45	4,19	0,65	18,56
IPE360	4	334.6	32	3217	50988	50	40	45	5,93	0,63	17,32
IPE400	4	373.0	32	3217	60715	70	40	53	5,03	0,64	16,11
IPE450	4	420.8	32	3217	72779	70	40	53	4,23	0,64	14,97
IPE500	4	468.0	40	5027	83800	70	50	59	5,66	0,64	14,00

3. MÉTODO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO

O Eurocódigo 4 parte 1.2 [1] possibilita a determinação da rigidez da secção em torno do eixo mais fraco e a capacidade de resistência plástica da secção, considerando o contributo das quatro componentes, assumindo a secção exposta à ação do fogo padrão pelos quatro lados. Cada componente deverá ser avaliada com base na evolução da temperatura em cada componente e do efeito que esta produz na redução das características resistentes, na redução do módulo de elasticidade e na redução da secção efetiva. O valor de projeto da resistência plástica por compressão e o valor de projeto da rigidez à flexão em relação ao eixo de menor inércia podem ser determinados pela soma pesada das componentes.

A temperatura média nos banzos, $\theta_{f,t}$, deve ser determinada através da Eq. 3. O parâmetro $\theta_{0,t}$ é um valor de referência da temperatura para um determinado período de exposição à ação do fogo t , k_t representa o coeficiente empírico representado na tabela 2.

$$\theta_{f,t} = \theta_{0,t} + k_t(A_m/V) \quad (3)$$

Tabela 2 - Parâmetros para determinação da temperatura no Banzo.

Resistência ao fogo padrão	$\theta_{0,t}$ [°C]	k_t [m ⁰ C]
R30	550	9,65
R60	680	9,55
R90	805	6,15
R120	900	4,65

O efeito da ação do fogo, por condução do calor, afeta o comportamento da alma do perfil. Parte da secção desta componente, $h_{w,fi}$, pode ser desprezada para o cálculo da capacidade

resistente e da rigidez à flexão. O valor da redução da componente pode ser determinado através da Eq. 4, tendo em consideração o valor do coeficiente H_t .

$$h_{w,fi} = 0.5(h - 2t_f)(1 - \sqrt{1 - 0.16(H_t/h)}) \quad (4)$$

Tabela 3 - Parâmetros para a redução da altura da alma.

Resistência ao fogo padrão	Ht [mm]
R30	350
R60	770
R90	1100
R120	1250

O efeito direto da ação do fogo nas partes laterais da secção e o efeito indireto por condução permitem definir uma isotérmica limite com capacidade resistente para o betão. Essa isotérmica permite definir uma secção residual, definida pelo parâmetro $b_{c,fi}$ em duas direcções y e z. O parâmetro da espessura é definido na tabela 4, tendo em consideração o fator de secção. A temperatura média no betão $\theta_{c,t}$ é obtida através da tabela 5, em função do fator de secção A_m/V e para diferentes classes de resistência ao fogo padrão.

Tabela 4 - Redução da secção de betão.

Resistência ao fogo	$b_{c,fi}$ [mm]
R30	4.0
R60	15.0
R90	$0.5(A_m/V)+22.5$
R120	$2.0(A_m/V)+24.0$

Tabela 5 - Temperatura média na secção resistente do betão.

R30		R60		R90		R120	
A_m/V [m ⁻¹]	$\theta_{c,t}$ [°C]	A_m/V [m ⁻¹]	$\theta_{c,t}$ [°C]	A_m/V [m ⁻¹]	$\theta_{c,t}$ [°C]	A_m/V [m ⁻¹]	$\theta_{c,t}$ [°C]
4	136	4	214	4	256	4	265
23	300	9	300	6	300	5	300
46	400	21	400	13	400	9	400
		50	600	33	600	23	600
				54	800	38	800
						41	900
						43	1000

O fator de redução $k_{y,t}$ para o limite da tensão de cedência e o fator de redução $k_{E,t}$ para o módulo de elasticidade do aço de reforço é definido em função da resistência ao fogo padrão e do valor médio da geometria u das distâncias de recobrimento do aço de reforço do betão, ver tabela 6. O valor médio da geometria u é definido a partir das distâncias de recobrimento u_1 e u_2 , definidas desde o eixo do aço de reforço para a superfície exterior do betão, nas duas direcções z e y da secção, respetivamente.

$$u = \sqrt{u_1 \cdot u_2} \quad (5)$$

$$u = \sqrt{u_2 \cdot (u_2 + 10)} \quad , (u_1 - u_2) > 10 [mm] \quad (6)$$

$$u = \sqrt{u_1 \cdot (u_1 + 10)} \quad , (u_2 - u_1) > 10 [mm] \quad (7)$$

Tabela 6 - Fator de redução $k_{y,t}$ e $k_{E,t}$ para o aço de reforço.

u [mm]	$k_{y,t}$	$k_{y,t}$	$k_{y,t}$	$k_{y,t}$	$k_{E,t}$	$k_{E,t}$	$k_{E,t}$	$k_{E,t}$
	R30	R60	R90	R120	R30	R60	R90	R120
40	1,000	0,789	0,314	0,170	0,830	0,604	0,193	0,110
45	1,000	0,883	0,434	0,223	0,865	0,647	0,283	0,128
50	1,000	0,976	0,572	0,288	0,888	0,689	0,406	0,173
55	1,000	1,000	0,696	0,367	0,914	0,729	0,522	0,233
60	1,000	1,000	0,822	0,436	0,935	0,763	0,619	0,285

4. MÉTODO AVANÇADO DE CÁLCULO

O cálculo da temperatura na secção foi efetuado pelo método dos elementos finitos (Ansys). Foi utilizado o elemento "PLANE55", com 4 nós e 1 grau de liberdade que permite efetuar uma análise térmica não linear, num domínio bidimensional, em regime transiente. Este elemento utiliza funções de interpolação lineares para determinação da matriz de condutividade e 4 pontos de integração (2x2), ver figura 2. O modelo utiliza uma discretização de 4, 6 e 8 elementos na espessura da alma, banzo e em ambas as direções do reforço. Foi considerado contacto perfeito entre os diferentes materiais ou componentes. Na superfície exterior da secção foram impostas as condições fronteira, de acordo com o Eurocódigo 1 parte 1.2 [3]. As propriedades dos materiais foram definidas de acordo com os Eurocódigos correspondentes a cada material, considerando betão com teor de água de 3% em peso e uma condutibilidade térmica correspondente ao limite superior [4-5]. Na figura 3 estão representados exemplos de campos de temperatura correspondentes às classes de resistência ao fogo. Este método de cálculo utilizou os seguintes critérios: Para determinação da temperatura dos banzos e determinação das características de resistência e rigidez do aço do reforço foi utilizado o critério da média aritmética dos nós correspondentes; Para determinação da redução da altura da alma foi utilizado o critério da isotérmica de 400 °C [6]; Para determinação da secção residual resistente do betão foi considerado o critério da isotérmica de 500 °C [5].

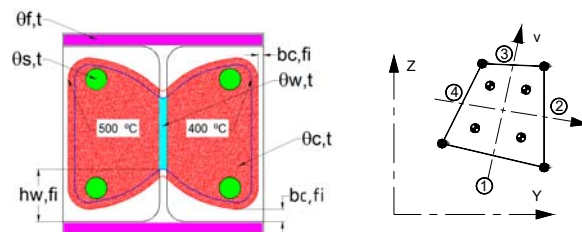


Figura 2 – Condições limites e elemento finito "PLANE55".

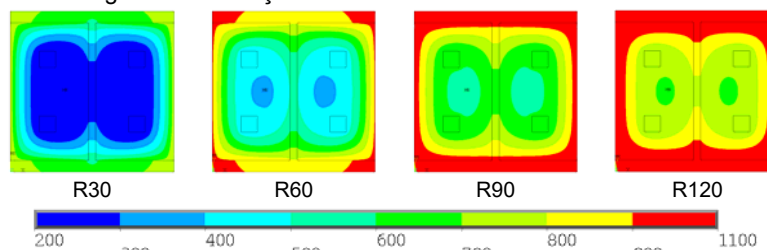


Figura 3 – Resultados de simulação numérica. Secção HEB 200 para 4 classes de resistência.

5 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS E NOVAS PROPOSTAS

Após a realização de 24 simulações numéricas, foram determinados os valores das temperaturas médias das várias componentes da secção, para cada classe de resistência ao fogo padrão. Este procedimento foi utilizado com os critérios mencionados para comparação dos resultados. Na figura 4 está representado o valor médio da temperatura do banzo para as diferentes secções em estudo. Cada gráfico apresenta os resultados do método simplificado de cálculo (secção 3), os resultados do método avançado de cálculo (secção 4) e as novas propostas de cálculo. Para algumas secções deste estudo, o Eurocódigo 4 parte 1.2 [1] apresenta valores conservadores e para outros casos apresenta valores inseguros. A temperatura média do banzo das secções HEB e IPE é segura para classe de resistência R30, parcialmente segura para a classe de resistência R60 e insegura para as restantes classes. Na figura 4 está apresentada a nova proposta de cálculo. Esta nova proposta é baseada na utilização da mesma equação (3) do Eurocódigo 4 e numa nova aproximação bilinear da temperatura em função de um novo fator empírico k_t e de um valor de referência $\theta_{o,t}$, ver tabela 7.

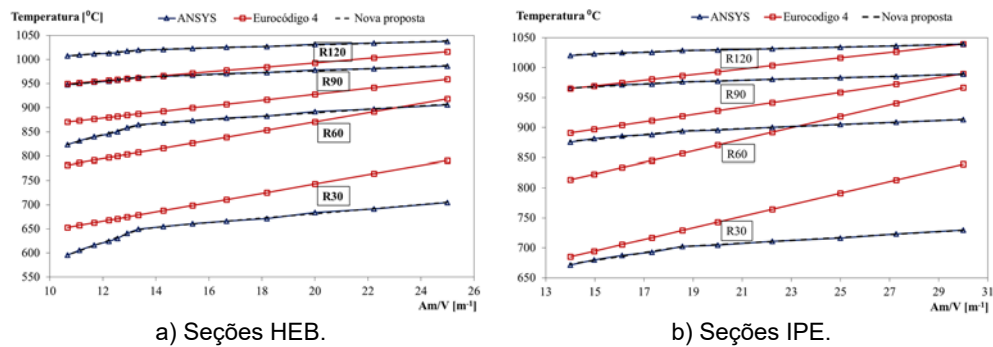


Figura 4 – Resultados da temperatura média nos banzos das secções analisadas.

Tabela 7 - Parâmetros para determinação da temperatura no Banzo (secções HEB e IPE).

Secções	10<Am/V<14		14<=Am/V<25		10<Am/V<19		19<=Am/V<30	
Resistência	HEB		HEB		IPE		IPE	
ao fogo	$\theta_{o,t}$ [°C]	k_t [m°C]	$\theta_{o,t}$ [°C]	k_t [m°C]	$\theta_{o,t}$ [°C]	k_t [m°C]	$\theta_{o,t}$ [°C]	k_t [m°C]
R30	387	19,55	588	4,69	582	6,45	656	2,45
R60	665	14,93	819	3,54	824	3,75	862	1,72
R90	887	5,67	936	2,04	935	2,20	956	1,09
R120	961	4,29	998	1,62	997	1,68	1010	0,96

Para cada classe de resistência ao fogo padrão foi determinada a posição de todos os nós da alma que se encontravam com temperatura inferior à isotérmica de 400°C. Foi medida a distância dos nós posicionados nessa isotérmica e a extremidade interior dos banzos, $h_{w,fi}$. Para cada classe de resistência foi calculado o valor da redução da altura da alma, utilizando o método avançado de cálculo e comparado com o valor determinado pelo método simplificado de cálculo, ver figura 5. Os resultados numéricos apresentam uma forte dependência do fator de secção, independentemente da classe de resistência ao fogo, ao contrário do método simplificado do

Redução das caract. das secções met. parcialmente embebidas com betão sujeitas ao fogo

Eurocódigo. Os resultados do método simplificado de cálculo evidenciam falta de segurança para todas as classes de resistência e para todas as secções estudadas. Em alternativa ao método proposto pelo Eurocódigo 4 EN1994-1-2, [1], a nova proposta apresenta uma expressão paramétrica para relacionar os resultados obtidos com o fator de secção e com a classe de resistência, ver Eqs. (8-9), respetivamente para perfis HEB e IPE. Ambas as equações possuem os limites de aplicação apresentados na tabela 8.

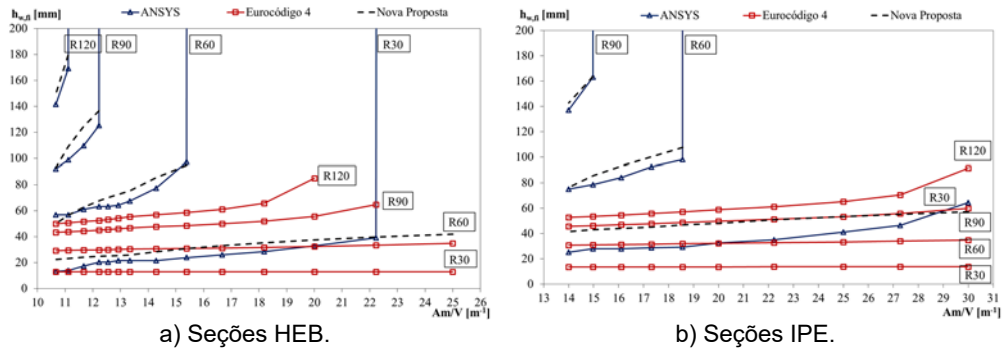


Figura 5 – Resultados da redução da altura da alma das secções.

$$2h_{w,fi} / h_i \times 100 = 0.0035 \times t^2 \times (A_m/V) - 0.03 \times t^{2.02} + (A_m/V) / 2 \quad , (HEB) \quad (8)$$

$$2h_{w,fi} / h_i \times 100 = 0.002 \times t^2 \times (A_m/V) - 0.03 \times t^{1.933} + (A_m/V) \quad , (IPE) \quad (9)$$

Tabela 8 - Limites de aplicação (perfis HEB e IPE).

Classe de resistência	Fator de secção (HEB)	Fator de secção (IPE)
R30	$A_m/V < 22.22$	$A_m/V < 30.00$
R60	$A_m/V < 15.38$	$A_m/V < 18.56$
R90	$A_m/V < 12.22$	$A_m/V < 14.97$
R120	$A_m/V < 11.11$	-

A temperatura média aritmética da secção efetiva da alma foi determinada pelo conjunto de nós que verificam a condição limite, ver figura 6. Nos gráficos desta figura estão representados os resultados inferidos do método simplificado, método avançado e a nova proposta.

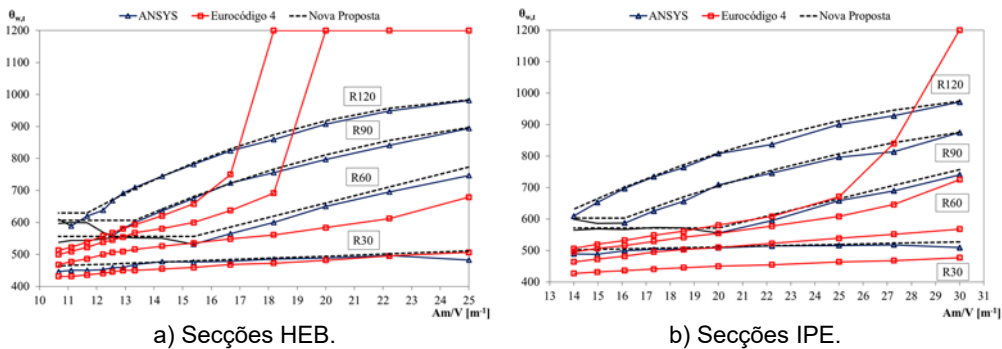


Figura 6 – Temperatura média da alma, para diferentes classes de resistência e secções.

Para cada classe de resistência ao fogo padrão, foram determinados todos os nós de betão do modelo que se encontravam na isotérmica de 500 °C. Foram medidas as distâncias entre os nós dessa condição limite e as extremidades interior dos banzos e exterior da secção, $b_{c,fi,vertical}$ e $b_{c,fi,horizontal}$, respetivamente. Os gráficos da figura 7 representam a comparação dos resultados. De acordo com a norma EN1994-1-2 [1], a redução da coordenada, $b_{c,fi}$, varia pouco com o fator de secção, em particular para classes de resistência inferiores a R90. Os resultados numéricos evidenciam a falta de segurança da norma, para todas as classes de resistência ao fogo. Na figura 7 está apresentada uma nova proposta para determinação da camada horizontal, $b_{c,fi,horizontal}$, e vertical, $b_{c,fi,vertical}$, de betão. Nas tabelas 9 e 10 é apresentada a nova formulação para determinação da camada exterior de betão a descontar.

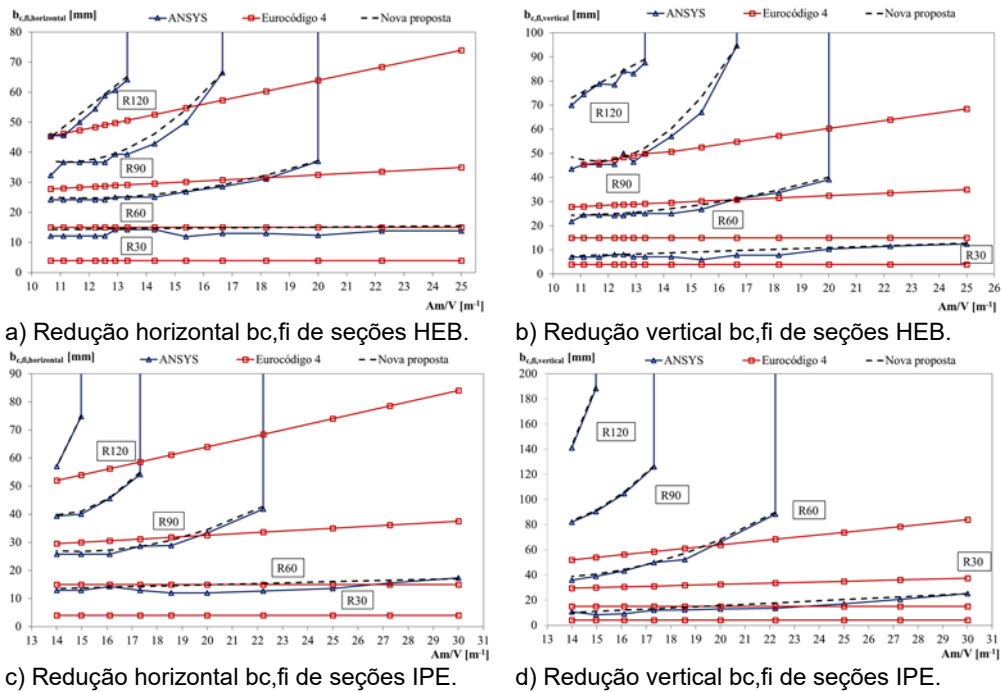


Figura 7 – Resultados da redução da secção resistente do betão.

Tabela 9 - Redução da espessura de betão em secções HEB.

$$b_{c,fi} = a \times (A_m/V)^2 + b \times (A_m/V) + c$$

Resistência ao fogo	$b_{c,fi,horizontal}$			$b_{c,fi,vertical}$			Fator de secção
	a	b	c	a	b	c	
R30	0,0000	0,0809	13,5	0,000	0,372	3,5	$10 \leq Am/V \leq 25$
R60	0,1825	-4,2903	50,0	0,1624	-3,2923	41,0	$10 \leq Am/V \leq 20$
R90	1,0052	-22,575	163,5	1,8649	-43,287	298,0	$10 \leq Am/V \leq 17$
R120	0,0000	7,5529	-35,5	0,000	6,0049	9,0	$10 \leq Am/V \leq 13$

Redução das caract. das secções met. parcialmente embebidas com betão sujeitas ao fogo

Tabela 10 - Redução da espessura de betão em secções IPE.

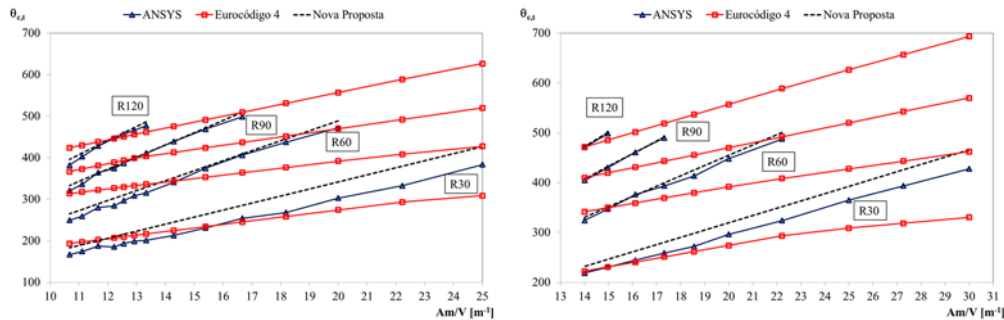
$$b_{c,fi} = a \times (A_m/V)^2 + b \times (A_m/V) + c$$

Resistência ao fogo	$b_{c,fi, horizontal}$			$b_{c,fi, vertical}$			Fator de secção
	a	b	c	a	b	c	
R30	0,0000	0,2206	10,5	0,0000	0,9383	-3,0	$14 \leq A_m/V \leq 30$
R60	0,2984	-8,8924	93,0	0,5888	-15,116	135,0	$14 \leq A_m/V \leq 22$
R90	1,3897	-38,972	313,0	2,0403	-50,693	393,0	$14 \leq A_m/V \leq 17$
R120	0,0000	18,283	-199,0	0,0000	48,59	-537,0	$14 \leq A_m/V \leq 15$

A temperatura média da secção residual do betão está representada na figura 8. A nova proposta apresenta uma aproximação paramétrica dos resultados, em função da classe de resistência t e do fator de secção (A_m/V), ver Eqs. 10 e 11.

$$\theta_{c,t} = +3.1 \times t^{0.5} \times (A_m/V) + 0.003 \times t^{1.95} \quad , (HEB) \quad (10)$$

$$\theta_{c,t} = +2.67 \times t^{0.5} \times (A_m/V) + 3.4 \times t^{0.61} \quad , (IPE) \quad (11)$$



a) Temperatura média do betão residual em secções HEB.

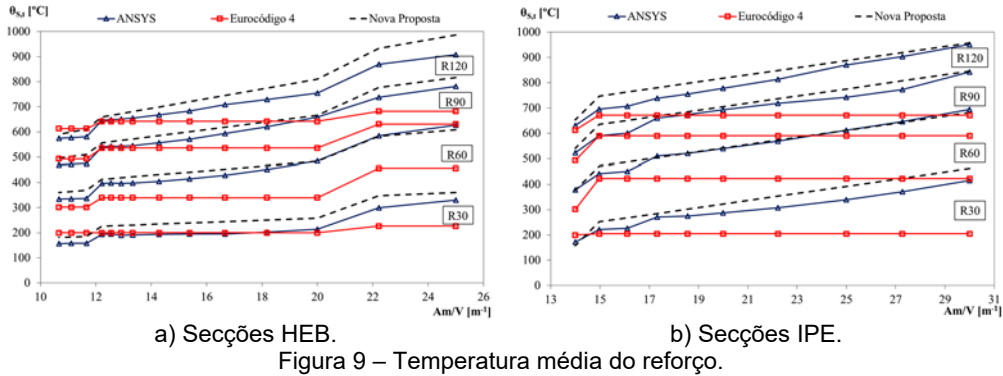
b) Temperatura média do betão residual em secções IPE.

Figura 8-Temperatura média do betão residual.

Na figura 9 está representada a temperatura média do reforço, $\theta_{s,t}$, para os resultados da simulação numérica. É apresentada ainda a comparação de resultados com os valores inferidos do Eurocódigo EN1994-1-2, [1]. Em alternativa, são apresentadas expressões paramétricas para determinação da temperatura média do reforço. As equações 12 e 13 permitem determinar a temperatura média do reforço para dois tipos de secção.

$$\theta_{s,t} = 0.1 \times t^{1.1} \times (A_m/V) + 7.5 \times t - 0.1 \times t^{1.765} - 8 \times u + 390 \quad , (HEB) \quad (12)$$

$$\theta_{s,t} = 14.0 \times (A_m/V) + 11.0 \times t - 0.1 \times t^{1.795} - 8 \times u + 115 \quad , (IPE) \quad (13)$$



6. CONCLUSÕES

Da análise dos resultados representados relativos às quatro componentes (evolução da temperatura média no banzo, redução da altura da alma, secção residual e temperatura média do betão e a redução da rigidez do reforço), é possível concluir que o método simplificado, proposto no anexo G do EN1994-1-2 se encontra inseguro para algumas classes de resistência ao fogo, comparativamente aos resultados numéricos. Neste artigo são apresentadas novas formulações, com garantia de segurança, assumindo que as novas expressões analíticas são conservadoras em relação aos resultados da simulação numérica.

REFERÊNCIAS

- [1] CEN - EN 1994-1-2; "Eurocode 4 - Design of composite steel and concrete structures- Part 1-2: General rules - Structural fire design"; Brussels, August 2005.
- [2] ISO 834-1. "Fire-resistance tests - Elements of building construction – Part 1: general requirements". 1999.
- [3] CEN - EN 1991-1-2; "Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire"; Brussels, November 2002.
- [4] CEN - EN 1993-1-2. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design. Brussels, April 2005.
- [5] CEN - EN 1992-1-2. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design. Brussels, December 2004.
- [6] Cajot Louis-Guy, Gallois Louis, Debruyckere Rik, Franssen Jean-Marc, Simplified design method for slim floor beams exposed to fire, Nordic Steel Construction Conference 2012, Oslo, Norway, 5-7 September 2012.