

**Proposta de Novas Expressões para o Cálculo do
Fator de Massividade para Elementos Estruturais
de Aço em Contacto com Paredes**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Civil – Especialização em Construção Urbana

Autora

Paula Cristiana Ribeiro Lopes

Orientador

Prof. Doutor António José Pedroso de Moura Correia

Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Coimbra, junho, 2016

AGRADECIMENTOS

Pretendo expressar o meu agradecimento a todas as pessoas que tornaram possível a realização não só deste trabalho mas de todo o meu percurso académico.

Desde já, quero agradecer ao meu orientador, Professor Doutor António José Pedroso de Moura Correia pela orientação científica deste trabalho, pela oportunidade que me deu de dar seguimento a um estudo seu, pela disponibilidade, entusiasmo, paciência, dedicação e amizade.

Aos meus colegas de licenciatura, nomeadamente, Catarina Moreira, Pedro Fernandes e Rafael Pinto, e de mestrado, Patrícia Mendes, Tânia Godinho, Hugo Nunes e João Pedro Pereira, com quem partilhei horas de estudo, de trabalho e empenho e com quem discuti dúvidas e dificuldades. Obrigada pela amizade e camaradagem.

Às minhas colegas de trabalho, Ângela Pedroso, Rita Dinis, Vanda Luís e Liliana Patrícia, e à chefe, D. Augusta Dinis, agradeço todo o apoio e compreensão.

A todos os meus amigos, nomeadamente, à Daniela Martins, agradeço o incentivo.

À minha família, especialmente pais, tia, Zé e avós que me incentivaram e ajudaram a crescer e a ultrapassar todos os obstáculos que foram surgindo e por último mas não menos importante, quero agradecer ao meu namorado Hugo e ao meu filho Eduardo por todo o carinho e compreensão pela minha ausência durante este período.

A todos, um **MUITO OBRIGADA!**

RESUMO

No estudo da resistência ao fogo de um elemento estrutural considera-se que este já se encontra inserido no sistema estrutural do edifício a que pertence. É muito importante contemplar o contacto entre pilares e paredes, o que do ponto de vista do comportamento da estrutura ao fogo se torna geralmente favorável já que ocorre a redução de temperaturas. Por outro lado, verifica-se o efeito de “Thermal Bowing” que não é mais do que um aquecimento diferencial das secções que pode causar momentos desfavoráveis nas mesmas provocando um efeito de arco, levando à sua instabilidade. Assim, torna-se necessário avaliar com exatidão a evolução do campo de temperaturas no plano da secção transversal dos elementos de aço inseridos em parede.

No Eurocódigo 3, parte 1-2, referente ao dimensionamento estrutural de elementos metálicos em situação de incêndio, são apresentadas várias expressões para o cálculo do fator de massividade de perfis metálicos, contudo vários casos de posicionamento pilares-paredes poderiam ser considerados já que os gradientes térmicos nesses casos são excessivamente elevados.

Propõem-se então expressões de cálculo de fatores de massividade para casos não inseridos no quadro 4.2 do referido Eurocódigo 3, parte 1-2. Tal foi possível utilizando modelos numéricos em elementos finitos com o programa ABAQUS, variando a secção transversal dos pilares, orientação da alma dos perfis em relação às paredes, e a posição e espessura das paredes, para obtenção dos pretendidos fatores de massividade.

Palavras-chave:

Pilares, paredes, segurança, incêndios, fator de massividade.

ABSTRACT

In the study of fire resistance of a structural element, it is considered that it is already inserted in the structural system of the building. It is very important to take into account the contact between the columns and the walls, which from the point of view of fire behavior of the structure becomes in general favourable since there is a reduction temperatures. Furthermore, it leads to the effect of "ThermalBowling" which is not more than one differential heating in the sections, causing unfavorable bending moments which may cause the same effect causing an arc, leading to instability. Thus, it is necessary to assess accurately the evolution of the temperature field in the plane of the cross section of the steel elements.

In Eurocode 3, part 1-2, the structural design of steel elements in a fire situation is shown with expressions for calculating the massivity factor of steel profiles, but several cases of positioning columns and the surrounding walls could be considered as causing extremely high thermal gradients.

It is proposed in this work new massivity factors calculation expressions for cases not included in Table 4.2 of Eurocode 3, part 1-2. This was achieved using numerical models with finite element with the ABAQUS programme, varying the cross-section of the columns, orientation of the web of the profiles in relation to the walls, and the position and thickness of the walls, to achieve the desired massivity factors.

Key words:

Columns, walls, security, fire, massiveness factor.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento do Tema.....	1
1.2. Objetivos do trabalho	1
1.2.1. Pilares inseridos em paredes	2
1.3. Organização da tese	3
2. ESTADO DA ARTE	5
2.1. Considerações gerais	5
2.2. Curvatura térmica e gradientes de temperatura	5
2.3. Trabalhos realizados	6
2.3.1. Trabalhos experimentais	6
2.3.2. Trabalhos numéricos.....	17
3. AÇÕES TÉRMICAS E PROPRIEDADES DOS MATERIAIS NO DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS	35
3.1. Introdução.....	35
3.2. Ações térmicas	36
3.2.1. Curvas nominais de incêndio	37
3.2.2. Cálculo das temperaturas nos elementos de aço pela EN 1993-1-2.....	40
3.3. Propriedades dos materiais	43
4. MODELAÇÃO DE PILARES INSERIDOS EM PAREDES COM ELEMENTOS FINITOS – ABAQUS	49
4.1. Introdução.....	49
4.2. Modelação com ABAQUS	49
4.2.1. Introdução	49
4.2.2. Modelos Numéricos.....	51
4.2.3. Elementos Finitos, Malha, Interações; Ações Térmicas	59
4.3. Resultados	60
4.3.1. Análise de temperaturas.....	60
5. RESULTADOS	63

5.1. Análise térmica.....	63
5.1.1. Figuras do perfil.....	63
5.1.2. Gráficos de temperatura.....	64
5.1.3. Resultados obtidos por elementos finitos e cálculo de temperaturas através do fator de massividade do Eurocódigo 3 – parte 1.2.....	67

6. PROPOSTA DE NOVAS EXPRESSÕES PARA O CÁLCULO DO FATOR DE MASSIVIDADE **77**

6.1. Caso A: $p > 0.5 \times b$	78
6.2. Caso B: $p < 0.5 \times b$	80
6.3. Caso C: $p > 0.5 \times h$	82
6.4. Caso D: $p < 0.5 \times h$	84

7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS **87**

7.1. Conclusões.....	87
7.1.1. Pilares de aço inseridos em paredes.....	87
7.2. Trabalhos futuros.....	89

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **91**

ANEXO A. Temperaturas nos pilares com alma paralela à parede **99**

A.1. Pilares inseridos em parede de 7 cm - Gráficos.....	99
A.2. Pilares inseridos em parede de 7 cm - Quadros.....	103
A.2.1. HD 320x127.....	103
A.2.2. IPE 180.....	104
A.2.3. HE 160 A.....	105
A.2.4. HE 160 AA.....	106
A.2.5. HE 450 M.....	107
A.2.6. HP 360x174.....	108
A.2.7. HP 250x62.....	109
A.2.8. HP 360x152.....	110
A.2.9. HP 305x79.....	111
A.2.10. HP 400x194.....	112
A.2.11. IPEA 100.....	113
A.2.12. IPE 400.....	114
A.2.13. IPEA 180.....	115
A.2.14. IPEO 270.....	116
A.2.15. UBP 356x368x133.....	117

B.2.10. HP 400x194.....	164
B.2.11. IPEO 180.....	165
B.2.12. IPE 400.....	166
B.2.13. IPEA 180.....	167
B.2.14. IPEO 270.....	168
B.2.15. UBP 356x368x133.....	169
B.2.16. UB 254x102x28.....	170
B.2.17. UB 406x178x54.....	171
B.2.18. UC 254x254x107.....	172
B.2.19. UC 356x406x551.....	173
B.2.20. W 250x250x131.....	174
B.2.21. W 460x280x235.....	175
B.2.22. W 920x420x390.....	176
B.3. Pilares inseridos em parede de 15 cm - Gráficos.....	177
B.4. Pilares inseridos em parede de 15 cm - Quadros.....	182
B.4.1. HD 320 x127.....	182
B.4.2. HE 450 AA.....	183
B.4.3. HE 450 A.....	184
B.4.4. HE 450 M.....	185
H.5. HP 250x62.....	186
B.4.6. HP 360x152.....	187
B.4.7. HP 360x174.....	188
B.4.8. HP 305x110.....	189
B.4.9. HP 400x194.....	190
B.4.10. HP 400x231.....	191
B.4.11. IPEA 270.....	192
B.4.12. IPEA 400.....	193
B.4.13. IPE 400.....	194
B.4.14. IPEO 270.....	195
B.4.15. UBP 356x368x133.....	196
B.4.16. UB 406x178x54.....	197
B.4.17. UB 254x102x28.....	198
B.4.18. UC 254x254x107.....	199
B.4.19. UC 356x406x551.....	200
B.4.20. W 250x250x131.....	201
B.4.21. W 250x250x167.....	202
B.4.22. W 460x280x235.....	203
B.4.23. W 920x420x344.....	204
B.4.24. W 920x420x390.....	205

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Provetes e posição dos termopares Correia et al. (2009 a,b)	7
Figura 2.2: Incêndio localizado num pilar a) Geometria do ensaio b) Temperaturas medidas num pilar sem proteção, durante o ensaio, (Wald, 2009)	10
Figura 2.3: Pormenores dos provetes de ensaio (Wei-young Wang et al., 2009)	11
Figura 2.4: Curvas temperatura versus tempo para os dois pilares ensaiados, (Wei-young Wang et al., 2009)	11
Figura 2.5: Malha de elementos finitos do programa Abaqus para o caso em estudo	12
Figura 2.6: Instalações experimentais usadas nos ensaios de resistência ao fogo de pilares a) pilares em contacto com paredes b) pilar isolado (Correia, 2011)	13
Figura 2.7: Instalação experimental a) Preparação dos ensaios na instalação experimental b) Esquema da instalação experimental do laboratório, (Dwaikat et al., 2012)	14
Figura 2.8: Esquema do isolamento dos pilares, com as dimensões em milímetros, (Dwaikat et al., 2012)	15
Figura 2.9: Variação dos tempos críticos de pilares de aço, em função da esbelteza, para diferentes níveis de carregamento e diferentes tipos de rigidez da estrutura circundante, (Correia et al., 2012a)	16
Figura 2.10: Casos de estudo analisados por Silva (2006) a) viga de aço em contacto com laje e parede b) pilar em contacto com paredes (alma perpendicular) c) pilares em contacto com paredes (alma paralela) d) secção fechada de viga em contacto com laje e parede	18
Figura 2.11: Diferentes valores dos fatores de forma analisados por Silva (2006) a) alma do pilar paralela à parede b) alma do pilar perpendicular à parede (Vista em planta), (Pamplona Guimarães (2007))	19
Figura 2.12: Perfis de temperatura e tensões de cedência com a posição do eixo neutro em diferentes locais, (Garlock et al., 2008)	21
Figura 2.13: Esquema da estrutura analisada e posição da ação térmica, (Landesmann e Baptista (2005))	23
Figura 2.14: A figura (a) a localização do centro e gravidade, (b) componentes do momento, e (c) o desempenho P-M normalizado para uma coluna W14 × 314 submetida ao fogo em três lados e aplicada $P = 25\%$ da inicial P_y , (Garlock et al. (2006))	25
Figura 2.15: Momentos fletores no pilar, esforços axiais na viga e deslocamento lateral no pilar – induzidos pela ação do incêndio, (Garlock et al., 2008)	25
Figura 2.16: Comparação de curvas de interação P-M plásticas para a secções com carga no eixo forte e fraco para $t = 25$ min (Garlock et al (2008))	26
Figura 2.17: Análise resistência plástica de um pilar de aço em contacto com paredes, com a alma do perfil perpendicular à parede, i.e, com o gradiente térmico ao longo da alma, (Correia et al., 2012)	32

Figura 2.18: Análise resistência plástica de um pilar de aço em contacto com paredes, com a alma do perfil paralela à parede, i.e, com o gradiente térmico ao longo dos banzos, (Correia et al., 2012).....	32
Figura 2.19: O aquecimento em diferentes locais da secção dos pilares W12x58 para (a) o aquecimento uniforme, (b) ao longo do gradiente de web, e (c) gradiente ao longo dos banzos, (Anil Agarwal et al. (2013))	33
Figura 3.1: Curvas nominais tempo-temperatura	40
Figura 3.2: Fatores de massividade de acordo com EN 1993-1-2 (2005)	41
Figura 3.3: Alongamento relativo do aço carbónico em função da temperatura, EN 1993-1-2 (2005)	43
Figura 3.4: Calor específico do aço carbónico em função da temperatura, EN 1993-1-2 (2005)	43
Figura 3.5: Condutividade térmica do aço carbónico em função da temperatura, EN 1993-1-2 (2005)	44
Figura 3.6: Alongamento térmico de agregados calcários e siliciosos em função da temperatura, EN 1992-1-2 (2004)	44
Figura 3.7: Calor específico do betão em função da temperatura, EN 1992-1-2 (2004).....	44
Figura 3.8: Condutividade térmica do betão em função da temperatura, EN 1992-1-2 (2004).....	45
Figura 3.9: Relação tensão – deformação para o aço de carbono, a elevadas temperaturas, EN 1993-1-2 (2005) a) Fatores de redução para a relação tensão-deformação do aço de carbono, a elevadas temperaturas, EN 1993-1-2 (2005) b).....	46
Figura 3.10: Relação tensão-deformação do betão, EN 1992-1-2 (2004) a) Coeficiente de redução de resistência característico do betão, EN1992-1-2 (2004) b).....	48
Figura 4.1: Visualização da malha de elementos finitos do pilar e das paredes.....	52
Figura 4.2: Detalhe do elemento finito C3D8RT	52
Figura 4.3: Perfil do modelo HE 160 A no módulo “Part”	54
Figura 4.4: <i>Assembly</i> HE 160 A com alma paralela à parede.....	55
Figura 4.5: <i>Assembly</i> HE 160 A com alma perpendicular à parede	55
Figura 4.6: Demonstração da definição da superfície: a) <i>master</i> b) <i>master</i> c) <i>slave</i>	56
Figura 4.7: Delimitação da superfície aquecida do aço.....	57
Figura 4.8: Delimitação da superfície aquecida do betão.....	57
Figura 4.9: Malhas de elementos finitos: a) perfil com alma paralela á parede b) perfil com alma perpendicular á parede c) perfil	58
Figura 4.10: Visualização de resultados das simulações numéricas do perfil HE 160 A: a) alma paralela á parede b) alma perpendicular á parede.....	59
Figura 4.11: Visualização do método de obtenção de temperaturas na alma.....	59
Figura 4.12: Visualização do método de obtenção de temperaturas no meio banzo aquecido.....	59

Figura 4.13: Visualização do método de obtenção de temperaturas no meio banzo não aquecido.	60
Figura 4.14: Gráfico de evolução de temperaturas no pilar W 250x250x131: a) com alma paralela á parede b) com alma perpendicular á parede.....	61
Figura 4.15: Evolução de temperaturas no pilar UB 406x178x54: a) com alma paralela á parede b) com alma perpendicular á parede.....	62
Figura 5.1: Perfil HE 160 M com alma paralela à parede a) Perfil HE 160 M com alma perpendicular à parede b)	64
Figura 5.2: Perfil HP 305x79 com alma paralela à parede a) Perfil HP 305x79 com alma perpendicular à parede b)	64
Figura 5.3: Gráfico de tempo-temperatura do perfil HE 160 M com alma paralela à parede a) Gráfico de tempo-temperatura do perfil HE 160 M com alma perpendicular à parede b).....	65
Figura 5.4: Gráfico de tempo-temperatura do perfil HP 305x79 com alma paralela à parede c) Gráfico de tempo-temperatura do perfil HP 305x79 com alma perpendicular à parede d).....	66
Figura 5.5: Caso 1 a) Caso 2 b) Caso 3 c) Caso 4 d).....	68
Figura 6.1: perfil sujeito ao caso A: $p > 0.5 \times b$	78
Figura 6.2: perfil sujeito ao caso B: $p < 0.5 \times b$	80
Figura 6.3: perfil sujeito ao caso C: $p > 0.5 \times h$	82
Figura 6.4: perfil sujeito ao caso D: $p < 0.5 \times h$	84
Figura A.1.1: Gráfico HD 320x127	99
Figura A.1.2: Gráfico HE 160 A	99
Figura A.1.3: Gráfico HE 160 M.....	99
Figura A.1.4: Gráfico IPE 180.....	99
Figura A.1.5: Gráfico HE 160 AA	99
Figura A.1.6: Gráfico HE 450 M.....	99
Figura A.1.7: Gráfico HP 360x174	100
Figura A.1.8: Gráfico HP 360x152	100
Figura A.1.9: Gráfico HP 400x194	100
Figura A.1.10: Gráfico HP 250x62	100
Figura A.1.11: Gráfico HP 305x79	100
Figura A.1.12: Gráfico IPEA 100.....	100
Figura A.1.13: Gráfico IPE 400	101
Figura A.1.14: Gráfico IPEO 270.....	101
Figura A.1.15: Gráfico UB 254x102x28.....	101
Figura A.1.16: Gráfico IPEA 180.....	101
Figura A.1.17: Gráfico UBP 356x368x133.....	101
Figura A.1.18:Gráfico UB 406x178x54.....	101

Figura A.1.19: Gráfico UC 254x254x107	102
Figura A.1 20: Gráfico W 250x250x131	102
Figura A.1 21:Gráfico W 920x420x390.....	102
Figura A.1.22: Gráfico UC 356x400x551	102
Figura A.1.23: Gráfico W 460x280x235.....	102
Figura A.2.1: HD 320x127	103
Figura A.2.2: IPE 180.....	104
Figura A.2.3: HE 160 A	105
Figura A.2.4: HE 160 AA.....	106
Figura A.2.5: HE 450 M.....	107
Figura A.2.6: HP 360x174.....	108
Figura A.2.7: HP 250x62.....	109
Figura A.2.8: HP 360x152.....	110
Figura A.2.9: HP 305x79.....	111
Figura A.2.10: HP 400x194.....	112
Figura A.2.11: IPEA 100	113
Figura A.2.12: IPE 400.....	114
Figura A.2.13: IPEA 180.....	115
Figura A.2.14: IPEO 270	116
Figura A.2.15: UBP 356x368x133	117
Figura A.2.16: UB 254x102x28	118
Figura A.2.17: UB 406x178x54	119
Figura A.2.18: UC 254x254x107	120
Figura A.2.19: UC 356x406x551	121
Figura A.2.20: W 250x250x131	122
Figura A.2.21: W 460x280x235.....	123
Figura A.2.22: W920x420x390.....	124
Figura A.3.1: Gráfico HD 320x127	125
Figura A.3.2: Gráfico HE 450 A	125
Figura A.3.3: Gráfico HP 250x62	125
Figura A.3.4: Gráfico HE 450 AA	125
Figura A.3.5: Gráfico HE 450 M.....	125
Figura A.3.6: Gráfico HP 360x152	125
Figura A.3.7: Gráfico HP 360x174	126
Figura A.3.8: Gráfico HP 305x110	126
Figura A.3.9: Gráfico HP 400x231	126

Figura A.3.10: Gráfico HP 305x79	126
Figura A.3.11: Gráfico HP 400x194	126
Figura A.3.12: Gráfico IPEA 270.....	126
Figura A.3.13: Gráfico IPEA 400.....	127
Figura A.3.14: Gráfico IPEO 270.....	127
Figura A.3.15: Gráfico UB 254x102x28	127
Figura A.3.16: Gráfico IPE 400	127
Figura A.3.17: Gráfico UBP 356x368x133.....	127
Figura A.3.18: Gráfico UB406x178x54	127
Figura A.3.19: Gráfico UC 254x254x107	128
Figura A.3.20: Gráfico W 250x250x167.....	128
Figura A.3.21: Gráfico W 920x420x344.....	128
Figura A.3.22: Gráfico UC: 356x406x551	128
Figura A.3.23: Gráfico W 460x280x235	128
Figura A.4.1: HD 320x127	129
Figura A.4.2: HE 450 AA.....	130
Figura A.4.3: HE 450 A	131
Figura A.4.4: HE 450 M.....	132
Figura A.4.5: HP 250x62.....	133
Figura A.4.6: HP 360x152.....	134
Figura A.4.7: HP 3690x174.....	135
Figura A.4.8: HP 305x110.....	136
Figura A.4.9: HP 400x194.....	137
Figura A.4.10: HP 400x231.....	138
Figura A.4.11: IPEA 270	139
Figura A.4.12: IPEA 400.....	140
Figura A.4.13: IPE 400.....	141
Figura A.4.14: IPEO 270	142
Figura A.4.15: UBP 356x368x133	143
Figura A.4.16: UB 254x102x28	144
Figura A.4.17: UB 406x178x54	145
Figura A.4.18: UC 254x254x107	146
Figura A.4.19: UC 356x406x551	147
Figura A.4.20: W 250x250x167.....	148
Figura A.4.21: W 460x280x235	149
Figura A.4.22: W 920x420x344.....	150

Figura B.1.1: Gráfico HD 320x127	151
Figura B.1.2: Gráfico HE 160 A.....	151
Figura B.1.3: Gráfico HE 160 M.....	151
Figura B.1.4: Gráfico IPE 180.....	151
Figura B.1.5: Gráfico HE 160 AA.....	151
Figura B.1.6: Gráfico HE 450 M.....	151
Figura B.1.7: Gráfico HP 360x174.....	152
Figura B.1.8: Gráfico HP 360x152.....	152
Figura B.1.9: Gráfico HP 400x194.....	152
Figura B.1.10: Gráfico HP 250x62.....	152
Figura B.1.11: Gráfico HP 305x79.....	152
Figura B.1.12: Gráfico IPEO 180.....	152
Figura B.1.13: Gráfico IPE 400.....	153
Figura B.1.14: Gráfico IPEO 270.....	153
Figura B.1.15: Gráfico UB 254x102x28	153
Figura B.1.16: Gráfico IPEA 180.....	153
Figura B.1.17: Gráfico UBP 356x368x133	153
Figura B.1.18: Gráfico UB 406x178x54	153
Figura B.1.19: Gráfico UC 254x254x107	154
Figura B.1.20: Gráfico W 250x250x131	154
Figura B.1.21: Gráfico W 920x420x390	154
Figura B.1.22: Gráfico UC356x406x551	154
Figura B.1.23: Gráfico W 460x280x235	154
Figura B.2.1: HD 320x127	155
Figura B.2.2: IPE 180	156
Figura B.2.3: HE 160 A.....	157
Figura B.2.4: HE 160 AA.....	158
Figura B.2.5: HE 450 M	159
Figura B.2.6: HP 360x174.....	160
Figura B.2.7: HP 250x62.....	161
Figura B.2.8: HP 360x152.....	162
Figura B.2.9: HP 305x79.....	163
Figura B.2.10: HP 400x194.....	164
Figura B.2.11: IPEO 180	165
Figura B.2.12: IPE 400	166
Figura B.2.13: IPEA 180	167
Figura B.2.14: IPEO 270	168

Figura B.2.15: UBP 356x368x133	169
Figura B.2.16: UB 254x102x28	170
Figura B.2.17: UB 406x178x54	171
Figura B.2.18: UC 254x254x107	172
Figura B.2.19: UC 254x254x107	173
Figura B.2.20: W 250x250x131	174
Figura B.2.21: W 460x280x235	175
Figura B.2.22: W920x420x390	176
Figura B.3.1: Gráfico HD 320x127	177
Figura B.3.2: Gráfico HE 450 AA.....	177
Figura B.3.3:Gráfico HP 250x62.....	177
Figura B.3.4: Gráfico HE 450 A.....	177
Figura B.3.5: Gráfico HE 450 M.....	177
Figura B.3.6: Gráfico HP 260x152.....	177
Figura B.3.7: Gráfico HP 360x174.....	178
Figura B.3.8: Gráfico HP 305x110.....	178
Figura B.3.9: Gráfico HP 400x231.....	178
Figura B.3.10: Gráfico HP 305x79.....	178
Figura B.3.11: Gráfico HP 400x194.....	178
Figura B.3.12: Gráfico IPEA 270	178
Figura B.3.13: Gráfico IPEA 400	179
Figura B.3.14Gráfico IPEO 270	179
Figura B.3.15:Gráfico UB 406x178x54	179
Figura B.3.16: Gráfico IPE 400.....	179
Figura B.3.17: Gráfico UBP 356x368x133	179
Figura B.3.18:Gráfico UB 254x102x28	179
Figura B.3.19: Gráfico UC 254X254X107	180
Figura B.3.20: Gráfico W 250x250x131	180
Figura B.3.21: Gráfico W 460x280x235	180
Figura B.3.22: Gráfico UC 356x406x551	180
Figura B.3.23: Gráfico W 250x250x167	180
Figura B.3.24: Gráfico W 920x420x344	180
Figura B.3.25: Gráfico W 920x420x390	181
Figura B.4.1:HD 320x127	182
Figura B.4.2: HE 450 AA.....	183
Figura B.4.3: HE 450 A.....	184

Figura B.4.4: HE 450 M	185
Figura B.4.5: HP 250x62	186
Figura B.4.6: HP 360x152	187
Figura B.4.7: HP 360x174	188
Figura B.4.8: HP 305x110	189
Figura B.4.9: HP 400x194	190
Figura B.4.10: HP 400x231	191
Figura B.4.11: IPEA 270	192
Figura B.4.12: IPEA 400	193
Figura B.4.13: IPE 400	194
Figura B.4.14: IPEO 270	195
Figura B.4.15: UBP 356x406x551	196
Figura B.4.16: UB 406x178x54	197
Figura B.4.17: UB 254x102x28	198
Figura B.4.18: UC 254x254x107	199
Figura B.4.19: UC 356x406x551	200
Figura B.4.20: W 250x250x131	201
Figura B.4.21: W 250x250x167	202
Figura B.4.22: W 460x280x235	203
Figura B.4.23: W 920x420x344	204
Figura B.4.24: W 920x420x390	205

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1: Casos estudados e localização dos termopares.....	7
Quadro 2.2: Fator de massividade dos exemplos estudados Érica Kimura (2009 b).....	20
Quadro 3.1: Fator de massividade A_m/V para elementos de aço não protegidos, Eurocódigo 3 – parte 1.2 (EN 1993-1-2:2010)	42
Quadro 3.2: Relação de tensão-deformação para aço de carbono a temperaturas elevadas EN 1993/01/02 (2005)	47
Quadro 4.1: Casos de estudo dos pilares inseridos em paredes	53
Quadro 5.1 - Caso I	70
Quadro 5.2 - Caso II	70
Quadro 5.3 - Caso III.....	70
Quadro 5.4 - Caso IV.....	70
Quadro 5.5 - Caso I	71
Quadro 5.6 - Caso II	71
Quadro 5.7 - Caso III.....	71
Quadro 5.8 - Caso IV.....	72
Quadro 5.9 - Caso I	72
Quadro 5.10 - Caso II	73
Quadro 5.11 - Caso III.....	73
Quadro 5.12 - Caso IV.....	73
Quadro 5.13 - Caso I	74
Quadro 5.14 - Caso II	74
Quadro 5.15 - Caso III.....	74
Quadro 5.16 - Caso IV.....	74
Quadro 6.1 – Caso A: $p > 0.5 \times b$	79
Quadro 6.2 – Coeficientes de correção k_1 , k_2 e k_3 para a situação II	80
Quadro 6.3 – Coeficientes de correção k_1 , k_2 e k_3 para a situação IV	80
Quadro 6.4 – Caso B: $p < 0.5 \times b$	81
Quadro 6.5 – Coeficientes k_1 , k_2 e k_3 para a situação II	81
Quadro 6.6 – Coeficientes k_1 , k_2 e k_3 para a situação IV	82
Quadro 6.7 – Caso C: $p > 0.5 \times h$	82
Quadro 6.8 – Coeficientes de correção k_1 , k_2 e k_3 para a situação II	83
Quadro 6.9 – Coeficientes de correção k_1 , k_2 e k_3 para a situação IV	83
Quadro 6.10 – Caso D: $p < 0.5 \times h$	84
Quadro 6.11 – Coeficientes de correção k_1 , k_2 e k_3 para a situação II	85
Quadro 6.12 – Coeficientes de correção k_1 , k_2 e k_3 para a situação IV	85

Quadro A.2.1: HD 320x127 - Caso I.....	103
Quadro A.2.2: HD 320x127 - Caso II	103
Quadro A.2.3: HD 320x127 - Caso III	103
Quadro A.2.4: HD 320x127 - Caso IV:.....	103
Quadro A.2.5: IPE 180 - Caso I.....	104
Quadro A.2.6: IPE 180 - Caso II	104
Quadro A.2.7: IPE 180 - Caso III.....	104
Quadro A.2.8: IPE 180 - Caso IV.....	104
Quadro A.2.9: HE 160 A - Caso I	105
Quadro A.2.10: HE 160 A - Caso II.....	105
Quadro A.2.11: HE 160 A - Caso III.....	105
Quadro A.2.12: HE 160 A - Caso IV	105
Quadro A.2.13: HE 160 AA - Caso I	106
Quadro A.2.14: HE 160 AA - Caso II.....	106
Quadro A.2.15: HE 160 AA - Caso III.....	106
Quadro A.2.16: HE 160 AA - Caso IV.....	106
Quadro A.2.17: HE 450 M - Caso I.....	107
Quadro A.2.18: HE 450 M - Caso II	107
Quadro A.2.19: HE 450 M - Caso III.....	107
Quadro A.2.20: HE 450 M - Caso IV	107
Quadro A.2.21: HP 360x174 - Caso I	108
Quadro A.2.22: HP 360x174 - Caso II.....	108
Quadro A.2.23: HP 360x174 - Caso III.....	108
Quadro A.2.24: HP 360x174 - Caso IV	108
Quadro A.2.25: HP 250x62 - Caso I	109
Quadro A.2.26: HP 250x62 - Caso II.....	109
Quadro A.2.27: HP 250x62 - Caso III.....	109
Quadro A.2.28: HP 250x62 - Caso IV	109
Quadro A.2.29: HP 360x152 - Caso I	110
Quadro A.2.30: HP 250x62 - Caso II.....	110
Quadro A.2.31: HP 250x62 - Caso III.....	110
Quadro A.2.32: HP 250x62 - Caso IV	110
Quadro A.2.33: HP 305x79 - Caso I	111
Quadro A.2.34: HP 250x62 - Caso II.....	111
Quadro A.2.35: HP 250x62 - Caso III.....	111
Quadro A.2.36: HP 250x62 - Caso IV	111
Quadro A.2.37: HP 400x194 - Caso I	112

Quadro A.2.38: HP 400x194 - Caso II	112
Quadro A.2.39: HP 400x194 - Caso III.....	112
Quadro A.2.40: HP 400x194 - Caso IV	112
Quadro A.2.41: IPEA 100 - Caso I.....	113
Quadro A.2.42: IPEA 100 - Caso II	113
Quadro A.2.43: IPEA 100 - Caso III.....	113
Quadro A.2.44: IPEA 100 - Caso IV.....	113
Quadro A.2.45: IPE 400 - Caso I	114
Quadro A.2.46: IPE 400 - Caso II	114
Quadro A.2.47: IPE 400 - Caso III.....	114
Quadro A.2.48: IPE 400 - Caso IV.....	114
Quadro A.2.49: IPEA 180 - Caso I.....	115
Quadro A.2.50: IPEA 180 - Caso II	115
Quadro A.2.51: IPEA 180 - Caso III.....	115
Quadro A.2.52: IPEA 180 - Caso IV.....	115
Quadro A.2.53: IPEO 270 - Caso I.....	116
Quadro A.2.54: IPEO 270 - Caso II	116
Quadro A.2.55: IPEO 270 - Caso III.....	116
Quadro A.2.56: IPEO 270 - Caso IV.....	116
Quadro A.2.57: UBP 356x368x133 - Caso I.....	117
Quadro A.2.58: UBP 356x368x133 - Caso II	117
Quadro A.2.59: UBP 356x368x133 - Caso III.....	117
Quadro A.2.60: UBP 356x368x133 - Caso IV.....	117
Quadro A.2.61: UB 254x102x28 - Caso I.....	118
Quadro A.2.62: UB 254x102x28 - Caso II.....	118
Quadro A.2.63: UB 254x102x28 - Caso III	118
Quadro A.2.64: UB 254x102x28 - Caso IV	118
Quadro A.2.65: UB 406x178x54 - Caso I.....	119
Quadro A.2.66: UB 406x178x54 - Caso II.....	119
Quadro A.2.67: UB 406x178x54 - Caso III	119
Quadro A.2.68: UB 406x178x54 - Caso IV	119
Quadro A.2.69: UC 254x254x107 - Caso I.....	120
Quadro A.2.70: UC 254x254x107 - Caso II.....	120
Quadro A.2.71: UC 254x254x107 - Caso III	120
Quadro A.2.72: UC 254x254x107 - Caso IV	120
Quadro A.2.73: UC 356x406x551 - Caso I.....	121
Quadro A.2.74: UC 356x406x551 - Caso II.....	121
Quadro A.2.75: UC 356x406x551 - Caso III	121

Quadro A.2.76: UC 356x406x551 - Caso IV	121
Quadro A.2.77: W 250x250x131 - Caso I.....	122
Quadro A.2.78: W 250x250x131 - Caso II	122
Quadro A.2.79: W 250x250x131 - Caso III.....	122
Quadro A.2.80: W 250x250x131 - Caso IV	122
Quadro A.2.81: W 460x280x235 - Caso I.....	123
Quadro A.2.82: W 460x280x235 - Caso II	123
Quadro A.2.83: W 460x280x235 - Caso III.....	123
Quadro A.2.84: W 460x280x235 - Caso IV	123
Quadro A.2.85: W 920x420x390 - Caso I.....	124
Quadro A.2.86: W 920x420x390 - Caso II	124
Quadro A.2.87: W 920x420x390 - Caso III.....	124
Quadro A.2.88: W 920x420x390 - Caso IV	124
Quadro A.4.1: HD 320x127 - Caso I.....	129
Quadro A.4.2: HD 320x127 - Caso II	129
Quadro A.4.3: HD 320x127 - Caso III	129
Quadro A.4.4: HD 320x127 - Caso IV	129
Quadro A.4.5: HE 450 AA- Caso I	130
Quadro A.4.6: HE 450 AA- Caso II	130
Quadro A.4.7: HE 450 AA- Caso III.....	130
Quadro A.4.8: HE 450 AA- Caso IV.....	130
Quadro A.4.9: HE 450 A- Caso I	131
Quadro A.4.10: HE 450 A- Caso II.....	131
Quadro A.4.11: HE 450 A- Caso III.....	131
Quadro A.4.12: HE 450 A- Caso IV	131
Quadro A.4.13: HE 450 M- Caso I.....	132
Quadro A.4.14: HE 450 M- Caso II	132
Quadro A.4.15: HE 450 M- Caso III	132
Quadro A.4.16: HE 450 M- Caso IV	132
Quadro A.4.17: HP 250x62 - Caso I	133
Quadro A.4.18: HP 250x62 - Caso II	133
Quadro A.4.19: HP 250x62 - Caso III.....	133
Quadro A.4.20: HP 250x62 - Caso IV	133
Quadro A.4.21: HP 360x152 - Caso I	134
Quadro A.4.22: HP 360x152 - Caso II	134
Quadro A.4.23: HP 360x152 - Caso III.....	134
Quadro A.4.24: HP 360x152 - Caso IV	134

Quadro A.4.25: HP 360x174 - Caso I	135
Quadro A.4.26: HP 360x174 - Caso II	135
Quadro A.4.27: HP 360x174 - Caso III.....	135
Quadro A.4.28: HP 360x174 - Caso IV	135
Quadro A.4.29: HP 305x110 - Caso I	136
Quadro A.4.30: HP 305x110 - Caso II	136
Quadro A.4.31: HP 305x110 - Caso III.....	136
Quadro A.4.32: HP 305x110 - Caso IV	136
Quadro A.4.33: HP 400x194 - Caso I	137
Quadro A.4.34: HP 400x194 - Caso II	137
Quadro A.4.35: HP 400x194 - Caso III.....	137
Quadro A.4.36: HP 400x194 - Caso IV	137
Quadro A.4.37: HP 400x231 - Caso I	138
Quadro A.4.38: HP 400x231 - Caso II	138
Quadro A.4.39: HP 400x231 - Caso III.....	138
Quadro A.4.40: HP 400x231 - Caso IV	138
Quadro A.4.41: IPEA 270 - Caso I.....	139
Quadro A.4.42: IPEA 270 - Caso II	139
Quadro A.4.43: IPEA 270 - Caso III.....	139
Quadro A.4.44: IPEA 270 - Caso IV	139
Quadro A.4.45: IPEA 400 - Caso I.....	140
Quadro A.4.46: IPEA 400 - Caso II	140
Quadro A.4.47: IPEA 400 - Caso III.....	140
Quadro A.4.48: IPEA 400 - Caso IV	140
Quadro A.4.49: IPE 400 - Caso I	141
Quadro A.4.50: IPE 400 - Caso II	141
Quadro A.4.51: IPE 400 - Caso III.....	141
Quadro A.4.52: IPE 400 - Caso IV	141
Quadro A.4.53: IPEO 270 - Caso I.....	142
Quadro A.4.54: IPEO 270 - Caso II	142
Quadro A.4.55: IPEO 270 - Caso III.....	142
Quadro A.4.56: IPEO 270 - Caso IV	142
Quadro A.4.57: UBP 356x368x133 - Caso I.....	143
Quadro A.4.58: UBP 356x368x133 - Caso II	143
Quadro A.4.59: UBP 356x368x133 - Caso III.....	143
Quadro A.4.60: UBP 356x368x133 - Caso IV	143
Quadro A.4.61: UB 254x102x28 - Caso I.....	144
Quadro A.4.62: UB 254x102x28 - Caso II.....	144

Quadro A.4.63: UB 254x102x28 - Caso III	144
Quadro A.4.64: UB 254x102x28 - Caso IV	144
Quadro A.4.65: UB 406x178x54 - Caso I.....	145
Quadro A.4.66: UB 406x178x54 - Caso II.....	145
Quadro A.4.67: UB 406x178x54 - Caso III	145
Quadro A.4.68: UB 406x178x54 - Caso IV	145
Quadro A.4.69: UB 254x254x107 - Caso I.....	146
Quadro A.4.70: UB 254x254x107 - Caso II.....	146
Quadro A.4.71: UB 254x254x107 - Caso III	146
Quadro A.4.72: UB 254x254x107 - Caso IV	146
Quadro A.4.73: UC 356x406x551 – Caso I	147
Quadro A.4.74: UC 356x406x551 – Caso II.....	147
Quadro A.4.75: UC 356x406x551 – Caso III.....	147
Quadro A.4.76: UC 356x406x551 – Caso IV	147
Quadro A.4.77: W 250x250x167 – Caso I.....	148
Quadro A.4.78: W 250x250x167 – Caso II.....	148
Quadro A.4.79: W 250x250x167 – Caso III	148
Quadro A.4.80: W 250x250x167 – Caso IV	148
Quadro A.4.81: W 460x280x235 – Caso I.....	149
Quadro A.4.82: W 460x280x235 – Caso II.....	149
Quadro A.4.83: W 460x280x235 – Caso III	149
Quadro A.4.84: W 460x280x235 – Caso IV	149
Quadro A.4.85: W 920x420x344 – Caso I.....	150
Quadro A.4.86: W 920x420x344 – Caso II.....	150
Quadro A.4.87: W 920x420x344 – Caso III	150
Quadro A.4.88: W 920x420x344 – Caso IV	150
Quadro B.2.1: HD 320x127 - Caso I.....	155
Quadro B.2.2: HD 320x127 - Caso II.....	155
Quadro B.2.3: HD 320x127 - Caso III	155
Quadro B.2.4: HD 320x127 - Caso IV	155
Quadro B.2.5: IPE 180 – Caso I.....	156
Quadro B.2.6: IPE 180 - Caso II	156
Quadro B.2.7: IPE 180 - Caso III	156
Quadro B.2.8: IPE 180 - Caso IV.....	156
Quadro B.2.9: HE 160 A- Caso I	157
Quadro B.2.10: HE 160 A- Caso II	157
Quadro B.2.11: HE 160 A- Caso III.....	157

Quadro B.2.12: HE 160 A- Caso IV	157
Quadro B.2.13: HE 160 AA- Caso I.....	158
Quadro B.2.14: HE 160 AA- Caso II	158
Quadro B.2.15: HE 160 AA- Caso III	158
Quadro B.2.16: HE 160 AA- Caso IV	158
Quadro B.2.17: HE 450 M- Caso I.....	159
Quadro B.2.18: HE 450 M- Caso II	159
Quadro B.2.19: HE 450 M- Caso III	159
Quadro B.2.20: HE 450 M- Caso IV	159
Quadro B.2.21: HP 360x174- Caso I.....	160
Quadro B.2.22: HP 360x174- Caso II	160
Quadro B.2.23: HP 360x174- Caso III.....	160
Quadro B.2.24: HP 360x174- Caso IV	160
Quadro B.2.25: HP 250x62- Caso I.....	161
Quadro B.2.26: HP 250x62- Caso II	161
Quadro B.2.27: HP 250x62- Caso III.....	161
Quadro B.2.28: HP 250x62- Caso IV	161
Quadro B.2.29: HP 360x152- Caso I.....	162
Quadro B.2.30: HP 360x152- Caso II	162
Quadro B.2.31: HP 360x152- Caso III.....	162
Quadro B.2.32: HP 360x152- Caso IV	162
Quadro B.2.33: HP 305x79- Caso I.....	163
Quadro B.2.34: HP 305x79- Caso II	163
Quadro B.2.35: HP 305x79- Caso III.....	163
Quadro B.2.36: HP 305x79- Caso IV	163
Quadro B.2.37: HP 400x194- Caso I.....	164
Quadro B.2.38: HP 400x194- Caso II	164
Quadro B.2.39: HP 400x194- Caso III.....	164
Quadro B.2.40: HP 400x194- Caso IV	164
Quadro B.2.41: IPEO 180- Caso I.....	165
Quadro B.2.42: IPEO 180- Caso II	165
Quadro B.2.43: IPEO 180- Caso III	165
Quadro B.2.44: IPEO 180- Caso IV	165
Quadro B.2.45: IPE 400- Caso I.....	166
Quadro B.2.46: IPE 400- Caso II	166
Quadro B.2.47: IPE 400- Caso III	166
Quadro B.2.48: IPE 400- Caso IV	166
Quadro B.2.49: IPEA 180- Caso I.....	167

Quadro B.2.50: IPEA 180- Caso II	167
Quadro B.2.51: IPEA 180- Caso III	167
Quadro B.2.52: IPEA 180- Caso IV	167
Quadro B.2.53: IPEO 270- Caso I.....	168
Quadro B.2.54: IPEO 270- Caso II	168
Quadro B.2.55: IPEO 270- Caso III	168
Quadro B.2.56: IPEO 270- Caso IV	168
Quadro B.2.57: UBP 356x368x133- Caso I.....	169
Quadro B.2.58: UBP 356x368x133- Caso II.....	169
Quadro B.2.59: UBP 356x368x133- Caso III	169
Quadro B.2.60: UBP 356x368x133- Caso IV	169
Quadro B.2.61: UB 254x102x28- Caso I.....	170
Quadro B.2.62: UB 254x102x28- Caso II.....	170
Quadro B.2.63: UB 254x102x28- Caso III.....	170
Quadro B.2.64: UB 254x102x28- Caso IV	170
Quadro B.2.65: UB 406x178x54- Caso I.....	171
Quadro B.2.66: UB 406x178x54- Caso II.....	171
Quadro B.2.67: UB 406x178x54- Caso III.....	171
Quadro B.2.68: UB 406x178x54- Caso IV	171
Quadro B.2.69: UC 254x254x107- Caso I.....	172
Quadro B.2.70: UC 254x254x107- Caso II.....	172
Quadro B.2.71: UC 254x254x107- Caso III.....	172
Quadro B.2.72: UC 254x254x107- Caso IV	172
Quadro B.2.73: UC 356x406x551- Caso I.....	173
Quadro B.2.74: UC 356x406x551- Caso II.....	173
Quadro B.2.75: UC 356x406x551- Caso III.....	173
Quadro B.2.76: UC 356x406x551- Caso IV	173
Quadro B.2.77: W 250x250x131- Caso I.....	174
Quadro B.2.78: W 250x250x131- Caso II.....	174
Quadro B.2.79: W 250x250x131- Caso III	174
Quadro B.2.80: W 250x250x131- Caso IV	174
Quadro B.2.81: W 460x280x235- Caso I.....	175
Quadro B.2.82: W 460x280x235- Caso II.....	175
Quadro B.2.83: W 460x280x235- Caso III	175
Quadro B.2.84: W 460x280x235- Caso IV	175
Quadro B.2.85: W 920x420x390- Caso I.....	176
Quadro B.2.86: W 920x420x390- Caso II.....	176
Quadro B.2.87: W 920x420x390- Caso III	176

Quadro B.2.88: W 920x420x390- Caso IV	176
Quadro B.4.1:HD 320 x127- Caso I.....	182
Quadro B.4.2:HD 320 x127- Caso II.....	182
Quadro B.4.3:HD 320 x127- Caso III	182
Quadro B.4.4:HD 320 x127- Caso IV	182
Quadro B.4.5:HE 450 AA - Caso I.....	183
Quadro B.4.6:HE 450 AA - Caso II	183
Quadro B.4.7:HE 450 AA - Caso III.....	183
Quadro B.4.8:HE 450 AA - Caso IV.....	183
Quadro B.4.9:HE 450 A - Caso I	184
Quadro B.4.10:HE 450 A - Caso II.....	184
Quadro B.4.11:HE 450 A - Caso III.....	184
Quadro B.4.12:HE 450 A - Caso IV.....	184
Quadro B.4.13:HE 450 M - Caso I.....	185
Quadro B.4.14:HE 450 M - Caso II	185
Quadro B.4.15:HE 450 M - Caso III	185
Quadro B.4.16:HE 450 M - Caso IV	185
Quadro B.4.17:HP 250x62 - Caso I.....	186
Quadro B.4.18:HE 450 M - Caso II	186
Quadro B.4.19:HE 450 M - Caso III	186
Quadro B.4.20:HE 450 M - Caso IV	186
Quadro B.4.21:HP 360x152 - Caso I.....	187
Quadro B.4.22:HP 360x152 - Caso II	187
Quadro B.4.23:HP 360x152 - Caso III.....	187
Quadro B.4.24:HP 360x152 - Caso IV	187
Quadro B.4.25:HP 360x174 - Caso I.....	188
Quadro B.4.26:HP 360x174 - Caso II	188
Quadro B.4.27:HP 360x174 - Caso III.....	188
Quadro B.4.28:HP 360x174 - Caso IV	188
Quadro B.4.29:HP 305x110 - Caso I.....	189
Quadro B.4.30:HP 305x110 - Caso II	189
Quadro B.4.31:HP 305x110 - Caso III.....	189
Quadro B.4.32:HP 305x110 - Caso IV	189
Quadro B.4.33:HP 400x194 - Caso I.....	190
Quadro B.4.34:HP 400x194 - Caso II	190
Quadro B.4.35:HP 400x194 - Caso III.....	190
Quadro B.4.36:HP 400x194 - Caso IV	190

Quadro B.4.37:HP 400x231 - Caso I.....	191
Quadro B.4.38:HP 400x231 - Caso II.....	191
Quadro B.4.39:HP 400x231 - Caso III.....	191
Quadro B.4.40:HP 400x231 - Caso IV.....	191
Quadro B.4.41:IPEA 270 - Caso I.....	192
Quadro B.4.42:IPEA 270 - Caso II.....	192
Quadro B.4.43:IPEA 270 - Caso III.....	192
Quadro B.4.44:IPEA 270 - Caso IV.....	192
Quadro B.4.45:IPEA 400 - Caso I.....	193
Quadro B.4.46:IPEA 400 - Caso II.....	193
Quadro B.4.47:IPEA 400 - Caso III.....	193
Quadro B.4.48:IPEA 400 - Caso IV.....	193
Quadro B.4.49:IPE 400 - Caso I.....	194
Quadro B.4.50:IPE 400 - Caso II.....	194
Quadro B.4.51:IPE 400 - Caso III.....	194
Quadro B.4.52:IPE 400 - Caso IV.....	194
Quadro B.4.53:IPEO 270 - Caso I.....	195
Quadro B.4.54:IPEO 270 - Caso II.....	195
Quadro B.4.55:IPEO 270 - Caso III.....	195
Quadro B.4.56:IPEO 270 - Caso IV.....	195
Quadro B.4.57:UBP 356x368x133 - Caso I.....	196
Quadro B.4.58:UBP 356x368x133 - Caso II.....	196
Quadro B.4.59:UBP 356x368x133 - Caso III.....	196
Quadro B.4.60:UBP 356x368x133 - Caso IV.....	196
Quadro B.4.61:UB 406x178x54 - Caso I.....	197
Quadro B.4.62:UB 406x178x54 - Caso II.....	197
Quadro B.4.63:UB 406x178x54 - Caso III.....	197
Quadro B.4.64:UB 406x178x54 - Caso IV.....	197
Quadro B.4.65:UB 254x102x28 - Caso I.....	198
Quadro B.4.66:UB 254x102x28 - Caso II.....	198
Quadro B.4.67:UB 254x102x28 - Caso III.....	198
Quadro B.4.68:UB 254x102x28 - Caso IV.....	198
Quadro B.4.69:UC 254x254x107 - Caso I.....	199
Quadro B.4.70:UC 254x254x107 - Caso II.....	199
Quadro B.4.71:UC 254x254x107 - Caso III.....	199
Quadro B.4.72:UC 254x254x107 - Caso IV.....	199
Quadro B.4.73:UC 356x406x551 - Caso I.....	200
Quadro B.4.74:UC 356x406x551 - Caso II.....	200

Quadro B.4.75:UC 356x406x551 - Caso III.....	200
Quadro B.4.76:UC 356x406x551 - Caso IV	200
Quadro B.4.77:W 250x250x131 - Caso I.....	201
Quadro B.4.78:W 250x250x131 - Caso II.....	201
Quadro B.4.79:W 250x250x131 - Caso III	201
Quadro B.4.80:W 250x250x131 - Caso IV	201
Quadro B.4.81:W 250x250x167 - Caso I.....	202
Quadro B.4.82:W 250x250x167 - Caso II.....	202
Quadro B.4.83:W 250x250x167 - Caso III	202
Quadro B.4.84:W 250x250x167 - Caso IV	202
Quadro B.4.85:W 460x280x235 - Caso I.....	203
Quadro B.4.86:W 460x280x235 - Caso II.....	203
Quadro B.4.87:W 460x280x235 - Caso III	203
Quadro B.4.88:W 460x280x235 - Caso IV	203
Quadro B.4.89:W 920x420x344 - Caso I.....	204
Quadro B.4.90:W 920x420x344 - Caso II.....	204
Quadro B.4.91:W 920x420x344 - Caso III	204
Quadro B.4.92:W 920x420x344 - Caso IV	204
Quadro B.4.93:W 920x420x390 - Caso I.....	205
Quadro B.4.94:W 920x420x390 - Caso II.....	205
Quadro B.4.95:W 920x420x390 - Caso III	205
Quadro B.4.96:W 920x420x390 - Caso IV	205

SIMBOLOGIA

Carateres Romanos

A_m	Superfície exposta ao fogo
A_{exp}	Área exposta
A_g	Área total
$A_{tot.perfil}$	Área total do perfil
b	Largura
b_f	Largura banzo
c_a	Calor específico do aço
E_{20}	Módulo de elasticidade do aço à temperatura de 20 °C
E_a	
$E_{a,\theta}$	Inclinação da recta que representa o domínio elástico para o aço a temperaturas elevadas θ_a
$f_{p,\theta}$	Tensão limite de proporcionalidade do aço a temperaturas elevadas θ_a
f_y	Tensão de cedência
f_{y20}	Tensão de cedência a 20 °C
$f_{y,\theta}$	Tensão de cedência efectiva do aço a temperaturas elevadas θ_a
F	Factor de forma
h	Altura
$\dot{h}_{net,c}$	Componente do fluxo de calor convectivo líquido
$\dot{h}_{net,d}$	Densidade do fluxo de calor
$\dot{h}_{net,r}$	Componente do fluxo de calor radioativo líquido
$k_{E,\theta}$	Factor de redução para a inclinação da recta que representa o domínio elástico do aço à temperatura θ_a atingida no instante t
$k_{p,\theta}$	Factor de redução para a tensão limite de proporcionalidade do aço à temperatura θ_a atingida no instante t
k_{sh}	Fator de correção do efeito de sombra

$k_{y,\theta}$	Factor de redução para a tensão de cedência do aço à temperatura θ_a atingida no instante t
k_1	Coefficiente de redução correspondente ao banzo/meio aquecido
k_2	Coefficiente de redução correspondente à alma
k_3	Coefficiente de redução correspondente ao banzo/meio não aquecido
l	Comprimento
p	Espessura da parede
P_{box}	Perímetro da box
P_{exp}	Perímetro exposto
t	Tempo
T	Temperatura
t_f	Espessura do banzo
t_w	Espessura da Alma
V	Volume

Carateres Gregos

α_c	Coefficiente de transferência de calor por convecção
$\Delta l/l$	Extensão térmica
$\Delta\theta_{a,t}$	Varição da temperatura
Δt	Intervalo de tempo
ρ_a	Unidade de massa do aço
ε	Emissividade
ε_f	Emissividade do fogo
ε_m	Emissividade da superfície do membro
$\varepsilon_{mechanical}$	Extensão mecânica
ε_{total}	Extensão total
$\varepsilon_{thermal}$	Extensão térmica
θ_g	Temperatura do gás

θ_m	Temperatura a superfície do elemento
θ_r	Temperatura radioativa efetiva do ambiente fogo
\varnothing	Fator de configuração
σ	Constante de Boltzmann Stephan
ψ	Coeficiente de combinação

ABREVIATURAS

ALMA	Alma
BA	Banzo aquecido
BNA	Banzo não aquecido
CAD	Computer-aided design
CAE	Complete Abaqus Environment
CFD	Computational fluid dynamics
DFC	Dinâmica de fluídos computacional
F	Fator de Forma
FDS	Fire Dynamics Simulator
FEM	Finite element method
FEMA	Federal Emergency Management Agency
ISO	International Organization for Standardization
M	Momento fletor
MBA	Meio banzo aquecido
MBNA	Meio banzo não aquecido
MEF	Método dos Elementos Finitos
N	Esforço axial
P	Combinações de carga axial
RABT	Diretivas para configuração e operação de tuneis rodoviários
RWS	Rijkswaterstaat
S	Strong
SIF	Structures in Fire
STC	SuperTempCalc
W	Weak
ZTV	Condições técnicas adicionais para o contrato de estruturas de engenharia civil

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento do Tema

O fogo, quando não controlado e causador de incêndios, gera situações de bastante gravidade, causando elevadas perdas materiais mas é de maior gravidade quando traduzem a perda de vidas humanas.

Em 2002, FEMA – Federal Emergency Management Agency, concluiu que é muito importante desenvolver um conjunto de métodos de dimensionamento de elementos estruturais englobando a interação com todos os elementos do edifício, para fazer face à ocorrência de um incêndio.

Recentemente, muitos progressos têm surgido para a compreensão de parâmetros e do comportamento estrutural do edifício quando sujeito a um incêndio com alguma relevância. Admitindo que, em estruturas de aço, os esforços de investigação têm incidido mais na produção de na preconização de normas e regulamentos para o cálculo do seu comportamento estrutural e da sua capacidade de carga durante o fogo, nota-se que a resposta para a segurança contra incêndios é muito superficial. Um dos regulamentos capazes de incorporar determinadas ações e requisitos é o Eurocódigo 3 – parte 1-1, 2004 contendo as propriedades do aço e verificações de elementos á temperatura ambiente, ao que a parte 1-2, 2004 do mesmo contem as propriedades mecânicas e térmicas do aço quando sujeito a altas temperaturas. No entanto, nem todo o regulamento é claro ou reúne consenso como é o caso de elementos de aço parcialmente expostos à ação do fogo.

Todos os materiais dos elementos estruturais perdem vigor dado que o aumento da temperatura diminui a resistência mecânica dos mesmos. Visto que gradientes de temperatura e instabilidade são uma constante sob o efeito de altas temperaturas, não é apropriada a aplicação de reduções de força da mesma intensidade para os todos os membros estruturais, tal como o incêndio pode não incidir da mesma forma e com a mesma intensidade em todo o edifício, existindo zonas que são expostas ao fogo, zonas que não o são e zonas que apenas o são parcialmente. Então torna-se necessário uma avaliação correta das temperaturas nos perfis, tendo em conta que os gradientes reais de temperatura são de extrema importância, particularmente em casos de elementos de aço parcialmente expostos à ação do fogo.

Como a ferramenta dos métodos numéricos é cada vez mais útil e importante nesta área. É cada vez maior o recurso a estes programas visto que obtém são capazes de obter resultados bastante satisfatórios e próximos da realidade em situações de elementos estruturais parcialmente expostos a ação do fogo. Posto isto, irei utilizar o programa de elementos finitos ABAQUS.

1.2. Objetivos do trabalho

O objetivo deste trabalho é estudar o comportamento de pilares de aço inseridos em paredes de alvenaria em edifícios sujeitos ao fogo na sequência do tema de António Moura Correia que na

sua tese de doutoramento realizou e tem vindo a realizar estudos sobre a influência das paredes de alvenaria no comportamento dos pilares de aço quando sujeitos à ação do fogo. Existem vários parâmetros que influenciam o comportamento do fogo em pilares de edifícios, tais como: o contacto com as paredes de tijolo, a rigidez da estrutura envolvente, o nível de carga e a esbelteza dos pilares.

Com o estudo dos diversos gradientes de temperatura associados a cada situação, o principal objetivo, após a reprodução de resultados pelo método de elementos finitos utilizado – ABAQUS, seria propor novas expressões para o cálculo do fator de massividade para elementos estruturais de aço em contacto com paredes.

1.2.1. Pilares inseridos em paredes

Em edifícios reais os pilares, normalmente, encontram-se em contacto com as paredes. Isto, em caso de incêndio, pode levar a que a ação térmica atue em apenas um lado da parede, o que sugere um aquecimento diferencial e, por sua vez, um encurvamento do pilar devido às tensões diferenciais que acabam por influenciar em diferentes e diversas zonas das secções transversais.

Pilares de aço inseridos em paredes de alvenaria surgem com um comportamento significativamente distinto do observado em pilares isolados. Verifica-se que o contacto com a alvenaria provoca redução da temperatura, contudo, que também acarreta um aquecimento diferencial que poderá causar gradientes térmicos. Tais circunstâncias podem providenciar esforços desfavoráveis na estrutura, ou seja, momentos de flexão, que tal como o nome indica pode conduzir a uma flexão inesperada nos pilares.

O encurvamento térmico provocado pelo efeito de aquecimento diferencial tem de ser avaliado de forma precisa no que respeita à quantificação da distribuição da temperatura no aço. O comportamento estrutural dos pilares é dependente de efeitos de segunda ordem, que é por si só um fenómeno muito importante pois pode condicionar a resistência ao fogo de pilares, reduzindo-a.

Neste trabalho foi feita uma avaliação dos efeitos de uma ação térmica diferencial sobre o comportamento estrutural de pilares de aço a fim de perceber se as paredes têm um efeito benéfico ou não sobre a resistência mecânica de pilares de aço sujeitos a temperaturas elevadas, e conseqüente comportamento na resistência ao fogo.

A EN 1991-1-2 (2002) considera que ações indiretas sobre estruturas são significativas. As ações indiretas mais importantes a ter em conta são gradientes térmicos através das secções de elementos estruturais e a expansão térmica diferencial. Embora se possa usar o conceito de fator de seção em cada componente do perfil, a PT 1993-1-2 (2005) fornece apenas uma fórmula para calcular a evolução da temperatura em secções transversais dos perfis de aço, considerando-se uma distribuição uniforme de temperaturas.

1.3. Organização da tese

A tese está organizada em seis capítulos. Seguidamente, é apresentada uma breve descrição do conteúdo de cada um deles:

Capítulo 1 - Introdução

Capítulo 1 é uma introdução ao trabalho de investigação apresentada nesta tese.

Capítulo 2 - Estado de arte

No Capítulo 2, uma breve descrição do Estado de arte é apresentado, relativo ao comportamento do fogo em pilares de aço inseridos em paredes, mencionando a importância de diferenciais de temperatura e de gradientes térmicos.

Capítulo 3 – Ações térmicas no dimensionamento de estruturas e propriedades dos materiais

No capítulo 3, estabelecem-se as ações térmicas de acordo com EN1991-1-2 (2002) e estas são definidas em termos de densidade de calor através de convecção e radiação. Neste capítulo descrevem-se as curvas nominais e paramétricas de incêndio mais utilizadas para determinar a evolução de temperaturas no interior de um compartimento. As propriedades térmicas e mecânicas do aço e betão também são mencionadas, de acordo com as normas EN 1993-1-2 (2005) e EN 1992-1-2 (2004), respetivamente.

Capítulo 4 - Modelação de pilares inseridos em paredes com elementos finitos

No capítulo 4, é apresentado um estudo numérico sobre o comportamento de pilares inseridos em paredes quando sujeitos à ação do fogo. Vários casos foram simulados utilizando o programa de elementos finitos ABAQUS. Foram objeto de estudo: gradientes de temperatura ao longo da seção transversal, a espessura das paredes, a orientação da teia do perfil de aço em relação às paredes, gradientes de temperatura ao longo do comprimento dos pilares.

Capítulo 5 - Resultados das temperaturas obtidos através da modelação de pilares inseridos em paredes através do programa de elementos finitos ABAQUS

O Capítulo 5 descreve em detalhe os resultados extraídos da modelação realizada pelo programa de elementos finitos ABAQUS. Contém gráficos representativos dos resultados, assim como quadros ilustrativos da evolução de temperaturas em pilares de aço inseridos em paredes.

Capítulo 6 - Proposta de expressões de cálculo para o fator de massividade de pilares inseridos em paredes com aquecimento diferencial

O Capítulo 6 revê, em geral, o comportamento estrutural de pilares inseridos em paredes de alvenaria, de um ponto de vista mais analítico. É efetuada uma discussão detalhada dos resultados numéricos obtidos e apresentadas propostas de expressões de cálculo para o fator de massividade, para as diversas situações em estudo. É apresentado um método para a avaliação da temperatura no interior da seção transversal das seções H dos perfis de aço inseridos em

parede. Com base na formulação da EN 1993-1-2 (2005), é apresentado um método para o cálculo das temperaturas nos banzos e almas dos perfis expostos e não expostos ao fogo, tanto com paredes colocadas paralelamente à alma como com perfis com as paredes dispostas perpendicularmente à alma do mesmo.

Capítulo 7 - Conclusões e trabalhos futuros

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões e propostas para a realização de trabalhos futuros

Anexo A - Temperaturas nos pilares com alma paralela à parede

São apresentados gráficos e quadros representativos das temperaturas obtidas nos perfis inseridos nas paredes de 7 cm e 15 cm.

Anexo B - Temperaturas nos pilares com alma perpendicular à parede

Apresenta-se a evolução de temperaturas através de gráficos e quadros - esta demonstração é feita para perfis em contacto com paredes de 7 cm e 15 cm.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Considerações gerais

Este capítulo envolve a pesquisa bibliográfica que foi realizada para valorizar este estudo. Nesta secção serão descritas normas, relatórios e artigos relacionados com o tema da dissertação e seus parâmetros envolventes, nomeadamente, gradientes de temperatura e “thermal bowing” ou curvatura térmica.

2.2. Curvatura térmica e gradientes de temperatura

Geralmente, numa situação de incêndio, os pilares inseridos em paredes de edifícios reais apenas ficam expostos ao fogo a partir do interior do compartimento.

São várias as características que fazem variar a temperatura de falha dos pilares, tais como: a diferença de temperatura, a profundidade da secção do pilar, as condições de fronteira e a sua esbelteza. Assim, as temperaturas de falha dos pilares com distribuição não uniforme podem verificar-se superiores ou inferiores aos pilares com distribuição de temperatura uniforme, dependendo dos parâmetros anteriores referidos.

Tensões e forças provocadas por um gradiente de temperatura ao longo da secção transversal do elemento estrutural, originando determinada distorção e formando um arco, traduzem-se num fenómeno de curvatura térmica ou “*thermal bowing*”. Existe redistribuição de momentos flectores devido ao aquecimento diferencial. O lado exterior do perfil mantém-se frio por mais tempo o que não altera a sua tensão de cedência e a força axial produz tensões de compressão, não interferindo no sinal no momento. Assim que o fogo se desenvolve, aumenta a temperatura e reduz a tensão de cedência, o que cria as tensões já referidas com velocidade superior. Quando o momento fletor e o fogo começam a provocar o mesmo efeito ocorre o colapso do pilar.

A carga axial é aplicada através do centro de gravidade da secção transversal. O momento de flexão é gerado devido ao deslocamento do baricentro. O momento de flexão resultante em torno do eixo perpendicular ao gradiente de temperatura é um resultado da mudança do centróide e curvatura térmica. Nas extremidades do pilar, o centro de gravidade da secção desloca-se para o lado frio, colocando, assim, o lado quente à compressão e o lado frio à tração. Devido à curvatura térmica, o centro do pilar move-se em direcção ao fogo (lado quente), assim o lado frio está à compressão e o lado quente fica à tração.

Apresentado este fenómeno, faz-se seguidamente descrição da pesquisa bibliográfica em torno deste tema e dos gradientes de temperatura que para além de exemplos, foram um incentivo para levar este trabalho avante e para o enriquecer.

2.3. Trabalhos realizados

2.3.1. Trabalhos experimentais

2.3.1.1. Trabalhos experimentais sobre análise térmica

Cooke et al. (1988), publicaram um documento onde expõem resultados experimentais e teóricos de elementos estruturais expostos ao fogo de um só lado, sugerindo como estes dados podem ser aplicados na diminuição dos efeitos da curvatura térmica. Para tal, ensaiaram pilares de aço, betão e paredes de alvenaria, analisando a influência de diferentes parâmetros como a relação comprimento/espessura das paredes, carga aplicada, o tipo de betão e a curva de fogo de hidrocarbonetos para as lajes.

As conclusões retiradas relacionaram-se com fenómeno de curvatura térmica. Esta pode ser reduzida utilizando materiais com baixo coeficiente de dilatação térmica, reduzindo a diferença de temperatura na secção transversal e aumentando a distância entre a superfície exposta e não exposta e, sempre que possível, assumir uma extremidade livre no elemento.

Tan et al. (2007), realizaram um estudo com o intuito de encontrar uma solução sem necessidade de recorrer a métodos avançados de cálculo para determinar a estabilidade de um pilar quando sujeito à ação do fogo.

Esse estudo consistiu na análise e comparação de dois modelos idealizados. No primeiro modelo existe a distribuição linear de temperaturas ao longo do perfil longitudinal e no segundo a distribuição uniforme das temperaturas ao longo da sua altura. A nível mecânico, foram idealizadas em ambos os pilares duas molas elásticas nas suas extremidades por forma a simular as restrições axiais produzidas pela estrutura adjacente. Após a análise das soluções e a comparação das mesmas com os resultados numéricos, obtiveram uma correlação entre ambos.

Os autores puderam então concluir que as restrições térmicas podem afetar significativamente a carga de encurvadura dos pilares e quanto maior for a altura dos pilares, maiores vão ser as diferenças de temperatura entre as extremidades dos mesmo.

Correia et al. (2009 a,b), realizaram um estudo de pilares de aço inseridos em paredes de alvenaria, com recurso a simulações numéricas e a ensaios experimentais, de forma analisar a influência das paredes de alvenaria na evolução da temperatura nos pilares de aço quando sujeitos a ação do fogo. A importância deste estudo deve-se ao fato de as paredes, por um lado, funcionarem como elementos de proteção ao fogo dos pilares, devido à baixa condutividade térmica quando comparada com o aço, por outro lado vão induzir nos pilares temperaturas diferenciadas na sua secção transversal. Ora, o EC3 parte 1-2 (EN-1993-1-2:2010) não tem em

conta este fator, considera sim, que a resistência ao fogo é determinada como se a evolução da temperatura fosse uniforme em toda a secção.

Os ensaios tiveram por base a utilização de dois tipos diferentes de secções de pilares, HEA 160 e HEA 200, com variação dos eixos de inércia expostos ao fogo e espessura da parede de alvenaria. A parte experimental, executada no Laboratório de Estruturas da Universidade de Coimbra, com recurso a um forno que seguiu a curva de incêndio padrão ISO 834 para simulação de temperaturas e recurso a termopares para medição das mesmas na secção do perfil.

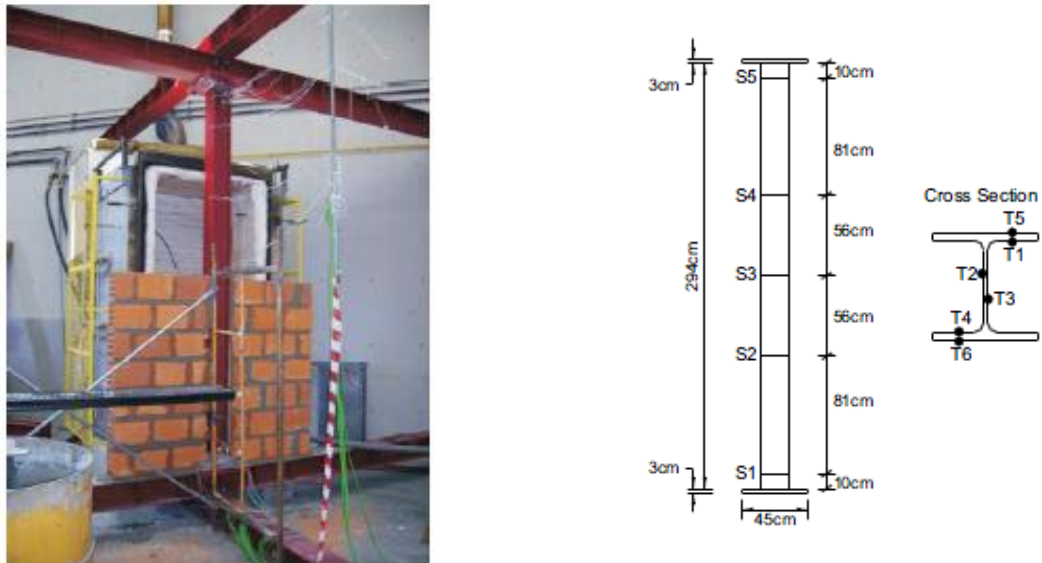


Figura 2.1: Provetes e posição dos termopares Correia et al. (2009 a,b)

A nível numérico foi utilizado o programa de elementos finitos, Supertempcalc (STC), onde foram feitas simulações numéricas em duas dimensões e posteriormente comparadas com os resultados da via experimental.

Quadro 2.1: Casos estudados e localização dos termopares

<p>Caso 1 HEA 160</p>	<p>Caso 2 HEA 160</p>	<p>Caso 3 HEA 200</p>	<p>Caso 4 HEA 200</p>
<p>Caso 5 HEA 200</p>	<p>Caso 6 HEA 160</p>	<p>Caso 7 HEA 200</p>	<p>Caso 8 HEA 200</p>

Concluiu-se então, que para os casos em que a alma se encontra paralela à superfície da parede, que a parede com maior espessura desempenha um papel importante na proteção da alma e banzos da evolução da temperatura. Já nos casos em que a alma se encontra perpendicular à superfície da parede, observou-se que no banzo não exposto, as temperaturas eram ligeiramente mais altas quando a espessura da parede era a mais espessa, e o contrário nos banzos expostos, temperaturas mais elevadas quando as paredes eram mais estreitas.

Na sequência deste trabalho, devido às temperaturas diferenciais introduzidas nos pilares de aço e na forma de cálculo apresentada pelo EC3-parte 1-2 (EN 1993-1-2:2010) ao considerar o aumento de temperatura uniforme neste tipo de situação, Correia et al. (2009/2010b), apresentam uma proposta de modificação do EC3 parte 1-2 relativamente a este tipo de situações.

Os autores recorreram aos resultados experimentais obtidos na publicação anterior, servindo para calibrar e validar os resultados das análises numéricas através do STC. Considerando no caso 1 e 3 uma divisão em 3 zonas, em que a temperatura é uniforme sendo, alma, metade de banzo exposto e a metade de banzo não exposto. Para o caso 2 e 4 as divisões consideradas foram, banzo exposto, banzo não exposto e alma do pilar.

Deste modo, os resultados das temperaturas obtidas nas zonas determinadas através do STC foram comparadas com o método simplificado do EC3 parte 1-2 (EN 1993-1:2005) para a zona exposta da secção transversal, que permitiu determinar e propor fatores de redução de temperaturas adequados para cada uma das 3 zonas. O método e resultados obtidos neste documento poderão servir para uma posterior formulação para este tipo de casos.

Em 2011, Dwaikat et al. realizaram testes experimentais por forma a investigar o comportamento de vigas-pilares de aço sujeitos a gradientes térmicos induzidos pelo fogo.

Este estudo foi realizado usando provetes de pilares com banzos de grandes dimensões. Foram gerados gradientes térmicos através da eliminação de isolamento de um lado da amostra simulando assim a resposta térmica de um cenário de aquecimento de três lados, simulando um pilar exterior de um edifício. Os provetes desenvolveram momentos fletores em resposta a estes gradientes, comportando-se assim como vigas-pilar. Os gradientes térmicos também conduziram a uma mudança na capacidade plástica para combinações de carga axial (P) e momento (M). A combinação de (P) e (M) fez com que todos os provetes falhassem na resistência plástica provocada por cedência do aço. Esta ocorreu onde existia maior temperatura e onde se verificou menor momento. O nível de carga, o cenário de fogo e o sentido do gradiente térmico influenciaram significativamente a resposta ao fogo destas vigas-pilar.

A comparação destes resultados com outros de modelos computacionais apresentou conformidade. Assim, o modelo verifica a capacidade de modelos computacionais para modelar com precisão as mudanças na resposta estrutural e capacidade induzida por gradientes térmicos.

2.3.1.2. Trabalhos experimentais sobre o comportamento estrutural

Quiel et al. (2008), publicaram um documento baseado numa metodologia para prever o aumento dos esforços axiais e de flexão pelos pilares exteriores, que fazem parte de um edifício em estrutura metálica exposta ao fogo.

O estudo baseia-se num subconjunto que inclui: um comprimento de dois andares do pilar de perímetro e a viga referente a um dos andares, na direção perpendicular ao exterior do edifício. Quando aquecida, a viga expande e induz o momento de flexão que provoca deflexão lateral no pilar, bem como o aumento da força axial na própria viga.

A abordagem proposta tem duas componentes principais: (1) um modelo de material que se aproxima da não-linearidade e considera os efeitos da temperatura, e (2) um modelo mecânico que representa o pilar periférico em interação com a viga. Estes modelos são utilizados para desenvolver uma solução de forma - fechada simplificada estimando a força axial exercida na viga e o momento de flexão exercido na coluna periférica que pode ser utilizado como parte de um diagrama com base no desempenho da coluna quando exposta ao fogo. As soluções dos modelos simplificados são depois comparadas com os resultados de um complexo e mais detalhado protótipo de vários andares, modelo de análise de elementos finitos. Uma comparação destes resultados mostra que os resultados do modelo simplificado dão boas estimativas do comportamento estrutural.

Frantisek Wald (2009), analisou a evolução das temperaturas em vários elementos estruturais e comparou-os com o Eurocódigo 3 parte 1 -2 (EN 1993-1-2:2005). De seguida elaborou um esquema experimental à escala real num edifício existente.

Wald aproveitou uma fábrica que estava para ser demolida, preparou o edifício e realizou um ensaio de simulação de incêndio. O estudo foi feito para vigas, pilares e ligações metálicas, buscando uma análise de evolução de temperaturas nos elementos estruturais e nos compartimentos. Na presente dissertação serão apenas focados os resultados do ensaio de resistência ao fogo de um pilar periférico. Para que a simulação fosse o mais real possível, e atendendo a que o edifício estava desocupado (contando apenas com o peso próprio da estrutura), o autor adicionou 1100 kg de sacos de areia no piso superior do pilar em estudo e foram utilizados barrotes de madeira de pequenas dimensões para simular o efeito do fogo sobre o pilar. A aquisição de resultados ao nível de temperatura no pilar foi realizada através de termopares, posicionados da forma que se pode visualizar na figura 2.2 a). Após a conclusão

do ensaio obtiveram-se os resultados de temperaturas observáveis na figura 2.2 b), onde se pode concluir que não houve colapso da estrutura.

Sabe-se que as estruturas de aço sem proteção contra incêndio têm um comportamento muito fraco, pois a sua elevada condutibilidade térmica conduz ao aumento da temperatura nos elementos e posterior perda de resistência. Para atenuar este aspeto, pode recorrer-se a materiais de proteção contra incêndios como materiais de pulverização. Contudo, verifica-se que estes são materiais sensíveis e facilmente danificados por ações mecânicas, entre outras, provocando perda imprevisível de resistência do elemento.

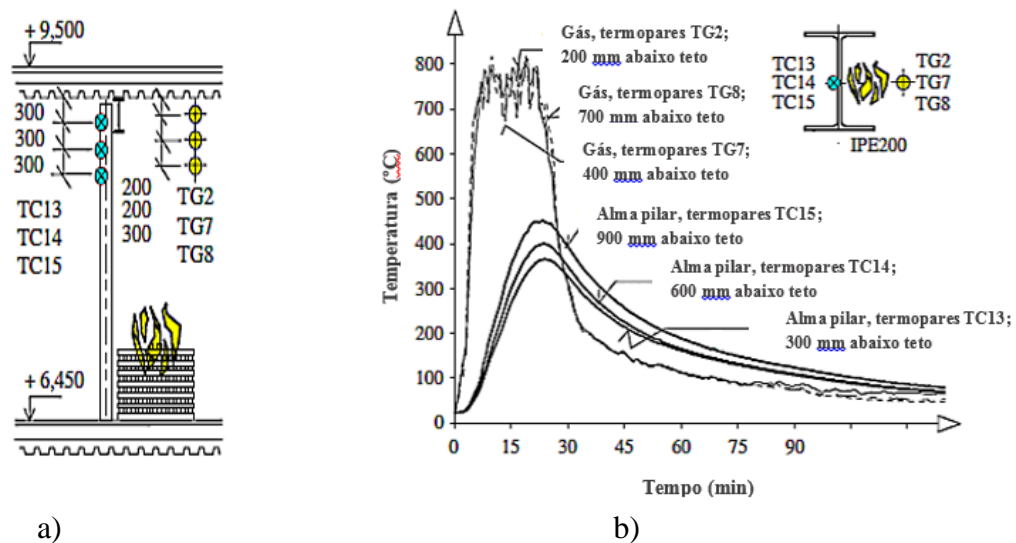


Figura 2.2: Incêndio localizado num pilar a) Geometria do ensaio b) Temperaturas medidas num pilar sem proteção, durante o ensaio, (Wald, 2009)

Para investigar a perda de resistência no elemento, Wei-Youg Wang et al. (2009), realizou uma investigação para observar o comportamento dos pilares de aço com perda parcial da proteção contra incêndios.

Nesta investigação foram ainda ensaiados pilares protegidos com 20 mm de material de isolamento projetado, nos quais o comprimento da zona danificada de proteção foi de 7% do comprimento total do pilar para um caso e de 12% para outro (figura 2.3), sendo que a degradação das zonas se encontram nos extremos do pilar. Os pilares foram sujeitos a cargas axiais de compressão e, a um aumento de temperatura traduzido por um forno que seguiu a curva de incêndio padrão ISO 834 (figura 2.4).

Através dos resultados experimentais e das soluções numéricas os autores concluíram que a resistência ao fogo dos pilares de aço com parte de proteção danificada é muito reduzida. Verificaram ainda que o colapso do pilar ocorre na zona com proteção danificada, onde o aumento da excentricidade da carga vai induzir uma diminuição da resistência. Isto leva a uma

variação da percentagem da zona de proteção danificada influenciando a forma de rotura e, portanto, a resistência global do pilar.

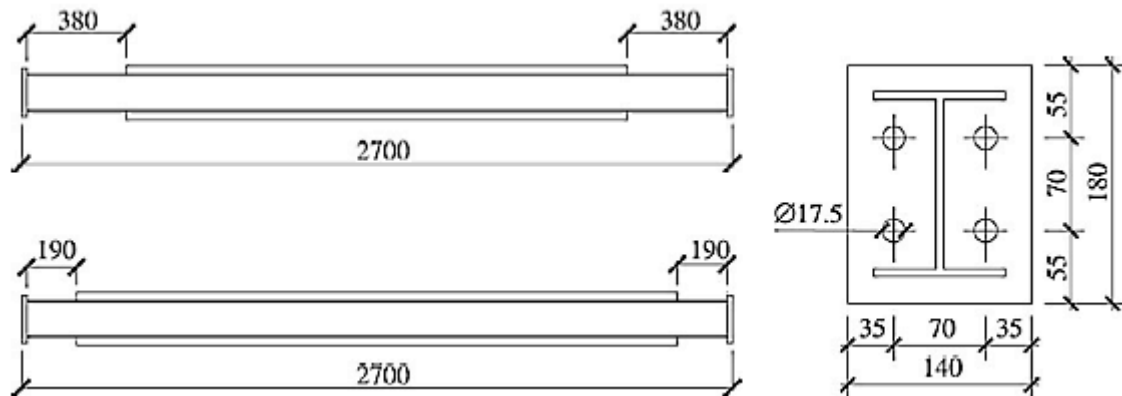


Figura 2.3: Pormenores dos provetes de ensaio (Wei-young Wang et al., 2009)

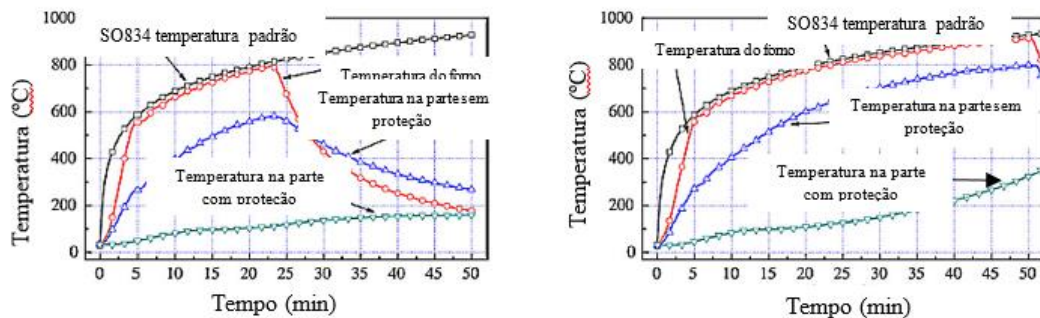


Figura 2.4: Curvas temperatura versus tempo para os dois pilares ensaiados, (Wei-young Wang et al., 2009)

Após vários testes e análises feitas sobre o comportamento dos pilares de aço inseridos em paredes de alvenaria, Correia et al. (2010), publicaram um estudo onde verificaram o efeito favorável das paredes circundantes aos pilares de aço quando expostos a um incêndio.

As paredes de alvenaria vão ter influência no aquecimento diferencial sentido nos pilares de aço, devido à não exposição de um dos lados ao fogo. Esta situação induz no pilar uma curvatura na direção do fogo devido às elevadas diferenças de temperatura entre as faces não protegidas pela alvenaria. O sistema de restrição do alongamento provocado pela estrutura circundante gera tensões adicionais no pilar, aumentando a força axial no mesmo. Este acréscimo de força axial é mais acentuado nos pilares completamente envolvidos pelo fogo, do que em pilares parcialmente protegidos pelo contacto com paredes.

Foram então realizados testes experimentais no Laboratório de Estruturas da Universidade de Coimbra, sobre a resistência ao fogo de pilares de aço inseridos em paredes de tijolo com e sem carga. A experiência dividiu-se em duas fases, a primeira consistiu no cálculo da distribuição de temperatura no interior da secção transversal do pilar ao longo do tempo, e na segunda fase

foi feita uma avaliação do comportamento mecânico com o intuito de estimar a resistência do elemento pilar. É de referir que os casos ensaiados são os mesmos que já foram descritos neste documento por Correia et al. (2009), em que se apresentaram oito casos de estudo.

Para a demonstração numérica recorreram ao programa de elementos finitos ABAQUS, de forma a simular o concretizado nos ensaios experimentais, aplicando 70% da carga de encurvadura á temperatura ambiente, realizando ainda dois ensaios adicionais para pilares isolados HEA 160 e HEA 200.

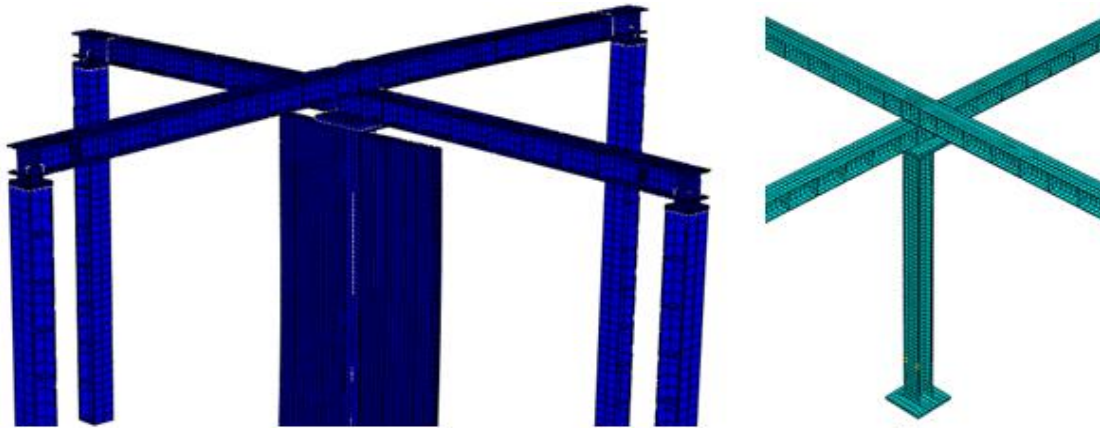


Figura 2.5: Malha de elementos finitos do programa Abaqus para o caso em estudo

Neste trabalho, os autores concluíram que as paredes de alvenaria vão aumentar a capacidade resistente do pilar de aço quando comparadas com um pilar isolado. Em todas as situações analisadas se verificou o fenómeno de “*Thermal Bowing*”. Na presença deste fenómeno surge uma rutura por flexão e não por encurvadura, verificado nos pilares isolados. Concluíram também que quanto maior for a espessura das paredes, maior é a resistência dos pilares.

Na sua tese de doutoramento, Correia (2011b), realizou um grande número de ensaios experimentais em pilares de aço em edifícios com o intuito de estudar pilares de aço e mistos aço-betão em situação de incêndio. A influência de diversos parâmetros, tais como o contacto com as paredes de tijolo, a rigidez da estrutura circundante, a esbelteza dos pilares e o nível de carregamento aplicado foram alvo de um estudo paramétrico realizado de forma experimental e numérica.

Correia comparou os resultados dos ensaios experimentais com os resultados do estudo numérico reproduzindo as condições usadas nos ensaios experimentais, com a finalidade de fornecer informações para o desenvolvimento ou melhoria de métodos de dimensionamento de pilares sujeitos a um incêndio. Como principal preocupação, o autor reproduziu, tanto quanto possível e em laboratório, as condições a que o pilar está sujeito quando se verifica um incêndio real num edifício.

Em laboratório, levou a cabo a realização de ensaios em pilares de aço da secção H embebidos em paredes, isolados e mistos aço-betão, parcialmente preenchidos com betão com dilatação térmica restringida (este trabalho foi efetuado no Laboratório de Estruturas da Universidade de Coimbra (figura 2.6) Os resultados foram comparados com os de ensaios realizados no Bundesanstalt für Material-forschung und-prüfung (BAM), em Berlim, Alemanha.

Para a modelação numérica, utilizaram-se programas computacionais de elementos finitos, designadamente SUPERTEMPCALC e ABAQUS. Foi realizada uma análise geométrica e material não linear. Como a modelação numérica foi feita de forma meticulosa obteve-se boa concordância entre os resultados experimentais e numéricos, tanto em termos de temperaturas como de forças de restrição e da deformada dos pilares.

Para os pilares de aço embebidos nas paredes, o estudo incidiu sobre a influência das paredes na distribuição das temperaturas ao longo da secção dos pilares. Os pilares embebidos em paredes apresentam um comportamento distinto sob as mesmas condições devido ao gradiente térmico e à restrição imposta pela existência das mesmas. Para os pilares de aço isolados, a principal conclusão retirada do trabalho foi sobre a influência real da restrição à dilatação, considerada simultaneamente com a restrição à rotação; esses dois tipos de rigidez têm um efeito contrário na resistência ao fogo dos pilares. O parâmetro que teve maior influência na resistência ao fogo dos pilares foi o nível de carregamento.

Com os principais resultados da investigação obtiveram propostas de métodos para a avaliação da evolução da temperatura na secção transversal de pilares com aquecimento diferencial em contacto com paredes, diagramas de interação Esforço Axial – Momento Fletor, assim como propostas para o cálculo da temperatura crítica e resistência ao fogo de pilares de aço.

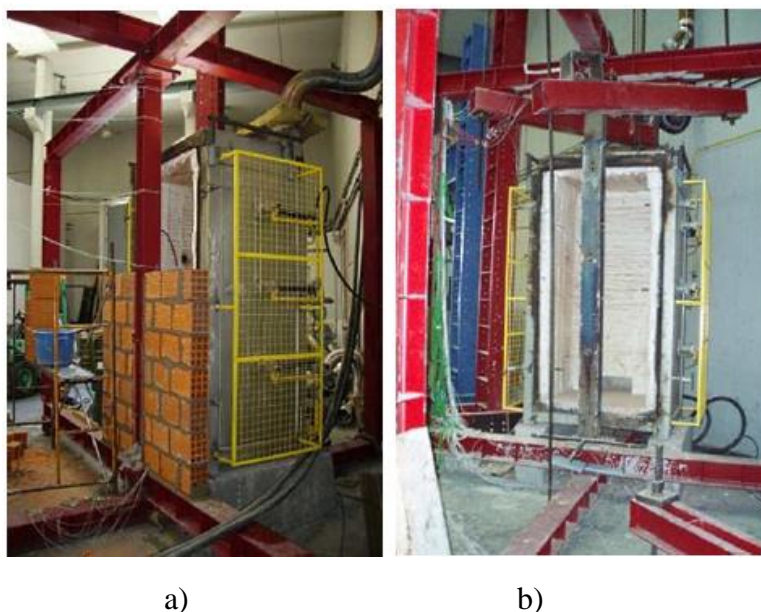


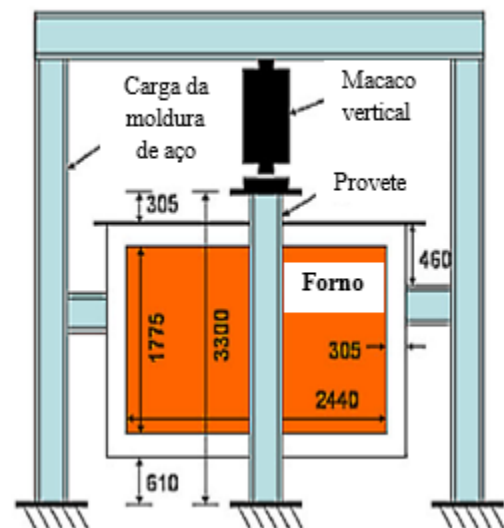
Figura 2.6: Instalações experimentais usadas nos ensaios de resistência ao fogo de pilares a) pilares em contacto com paredes b) pilar isolado (Correia, 2011)

Dwaikat et al. (2012), efetuaram uma investigação sobre a capacidade mecânica e o desenvolvimento de gradientes térmicos ao longo da secção transversal de pilares de aço. O principal cuidado dos autores prendia-se com o facto de verificar toda a variabilidade de situações a que um pilar está sujeito quando é parte integrante de uma estrutura, ou seja, a carga axial que atua sobre si, a exposição ao fogo não uniforme da sua secção e os momentos induzidos por esta, são fatores que vão ter influência no comportamento do pilar quando sujeito a uma situação de incêndio.

Para a avaliação do comportamento dos pilares de aço, os autores realizaram ensaios experimentais na Universidade de Michigan; recorrendo a um forno e a um sistema experimental existente na mesma Universidade, pode visualizar-se na figura 2.8.



a)



b)

Figura 2.7: Instalação experimental a) Preparação dos ensaios na instalação experimental b) Esquema da instalação experimental do laboratório, (Dwaikat et al., 2012)

O ensaio experimental consistiu em quatro pilares de aço, de secção transversal W8 x 48, com 3,30 metros de altura, revestidos com material isolante, dispostos e designados de forma diferente permitindo o desenvolvimento de gradientes térmicos no eixo fraco e no eixo forte de inércia. As denominações C1 - W e C1 - S dizem respeito ao pilar metálico cuja espessura da camada de proteção é de 44 milímetros, enquanto W e S representam o desenvolvimento dos gradientes térmicos segundo o eixo fraco ou forte (weak or strong). A designação C2 é a espessura do material de proteção, correspondendo no caso a pilares com 38 mm de espessura. Em qualquer um dos casos, os pilares foram aquecidos simultaneamente nos quatro lados, estando sujeitos a cargas axiais de compressão de 25% (C1) e 45% (C2) da carga última de

encurvadura, calculada à temperatura ambiente, aplicada em incrementos de 200 kN num intervalo de aproximadamente dez minutos e mantida até ao fim do ensaio.

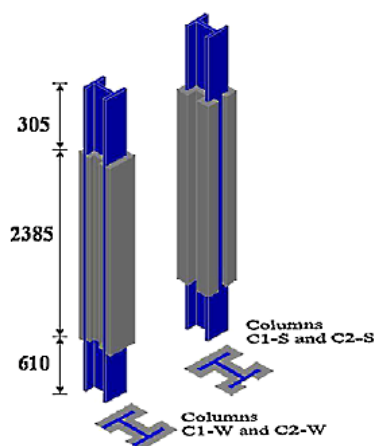


Figura 2.8: Esquema do isolamento dos pilares, com as dimensões em milímetros, (Dwaikat et al., 2012)

Neste estudo os ensaios experimentais serviram também para a validação de modelos numéricos desenvolvidos através do programa SAFIR, analisando detalhadamente o efeito de desenvolvimento de gradientes térmicos na secção transversal dos pilares de aço. Este efeito provoca o deslocamento do centro de gravidade da secção transversal da peça para a zona mais fria, desenvolvendo-se momentos fletores adicionais na secção.

Após a análise dos resultados experimentais e numéricos detetaram que a capacidade resistente da secção para a combinação da carga axial de compressão e de flexão tinha sido alterada. Concluindo que o local de cedência dos pilares ocorreu onde a temperatura era mais elevada e o momento fletor, o menor, devido ao efeito dos gradientes térmicos.

Foi apresentada grande variabilidade de resultados em relação ao eixo forte e fraco de inércia, respeitante ao comportamento de resistência ao fogo.

Correia et al. (2012), apresentaram um estudo sobre o comportamento de pilares de aço isolados, com dilatação térmica restringida no congresso internacional “Structures in Fire 2012”. O Eurocódigo 3 parte 1-2 (EN 1993-1-2:2010) é aplicável em segurança ao fogo de estruturas de aço e apresenta as ações indiretas a considerar no projeto de segurança contra incêndios, como a restrição ao alongamento térmico em elementos estruturais. Os autores realizaram ensaios experimentais e modelações numéricas de forma a obter resultados que promovam o desenvolvimento futuro de novos métodos de cálculo simplificados, para o cálculo da resistência de pilares de aço ao fogo.

Nos ensaios experimentais recorreram a um sistema de pórticos (já descrito anteriormente noutra publicação dos mesmos autores). Com a capacidade de simular restrições 3D, de variação da rigidez de 13, 45 e 128 kN/mm, foram ensaiados pilares HEA160 e HEA200 para

dois níveis de carga, 30% e 70% da carga de encurvadura à temperatura ambiente, para as diferentes secções transversais. A carga térmica aplicada corresponde à curva de incêndio padrão ISO 834. A modelação numérica foi realizada recorrendo ao programa de elementos finitos ABAQUS, simulando o que foi executado nos ensaios experimentais e variando o parâmetro adicional da esbelteza, servindo assim também para a calibração dos modelos numéricos.

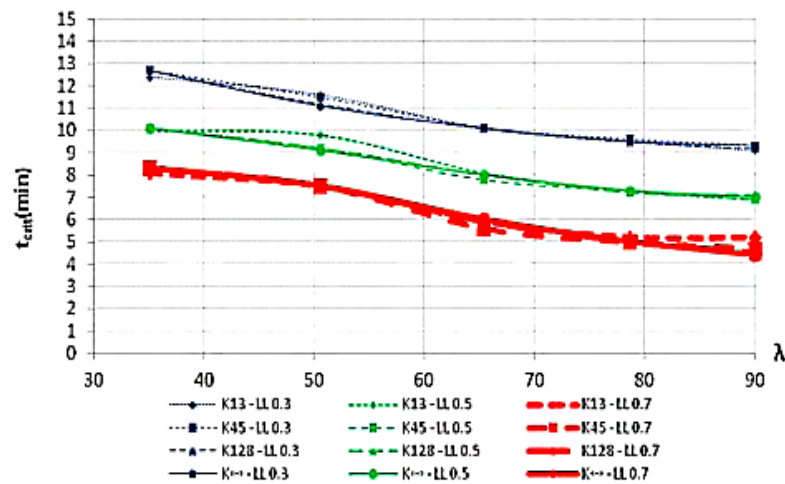


Figura 2.9: Variação dos tempos críticos de pilares de aço, em função da esbelteza, para diferentes níveis de carregamento e diferentes tipos de rigidez da estrutura circundante, (Correia et al., 2012a)

Os autores defendem que a redução das temperaturas críticas com o aumento da rigidez axial da estrutura circundante se revela insignificante, verificando que o sistema de restrição ao alongamento térmico não demonstra grande influência no comportamento do pilar sujeito a ações térmicas. Já o nível de carga apresenta influência significativa no comportamento do pilar quando sujeito à ação da temperatura.

Os pilares de aço em contacto com paredes de alvenaria em situação de incêndio, apresentam um comportamento bem distinto dos pilares isolados. Verifica-se o deslocamento do centro de gravidade da secção para o lado não aquecido e a uma inversão dos momentos fletores visto que as temperaturas diferenciais na secção transversal do pilar desenvolvem uma redução das propriedades resistentes do aço, além das tensões de origem térmica, provocando o aparecimento de momentos fletores adicionais de origem térmica.

2.3.2. Trabalhos numéricos

2.3.2.1. Trabalhos numéricos sobre análise térmica

Rotter e Usmani apresentaram no "Structures in fire", no ano 2000 (Rotter et al., 2000), uma investigação acerca dos princípios fundamentais do comportamento estrutural sob efeitos térmicos diferenciais e uniformes. Os autores mantiveram enormes reservas na adoção de grandes configurações de deslocamento e que forças induzidas termicamente, deslocamentos e degradação do material controlam a resposta da estrutura quando submetida a um incêndio.

Fundamentaram-se na análise da resposta dos elementos estruturais individuais sob uma combinação de ações térmicas e dos apoios de extremidade da estrutura circundante. Com isto, descrevem a relação fundamental que comanda o comportamento de estruturas quando submetidas a efeitos térmicos. O fator chave que determina uma resposta estrutural real, prende-se com a resposta da mesma às tensões térmicas induzidas nos seus membros através do seu aquecimento. Se existir restrição de translação final insuficiente para a dilatação térmica, as tensões consideráveis são retomadas em deslocamentos expansivos, produzindo uma resposta dominada pelo deslocamento. Gradientes térmicos induzem flexão devido à curvatura do membro, cujas extremidades são livres para rodar, produzindo grandes deflexões. Provetes onde sejam induzidos gradientes térmico e cujas extremidades são rotacionalmente restringidas podem gerar "*hogging bending moments*" significativos, ou seja, momentos de flexão ao longo do comprimento do elemento, sem deflexão.

Rotter et al. analisaram uma viga restringida axialmente e rotacionalmente com restrições perfeitamente rígidas, bem como com restrições como as oferecidas pelas estruturas reais para os elementos estruturais.

A curvatura térmica é descrita para situações em que os elementos estruturais são expostos ao fogo apenas de um lado, visto que se expande mais do lado aquecido do que do lado não aquecido. Concluíram que "*...irão manifestar-se deformações térmicas como deslocamentos se existirem tensões desenfreadas ou se os membros estão restringidos através da neutralização de tensões mecânicas geradas devido á restrição das forças...*".

Valdir Pignatta e Silva (2006) analisou algumas situações, presentes na tabela 2.1 do Eurocódigo 3 – parte 1.2 (EN 1993-1-2:2010), sobre a evolução de temperatura dos elementos tendo em conta o fator de massividade, considerando situações que refletem muitos dos casos que se verificam em edifícios, como se pode visualizar na figura seguinte:

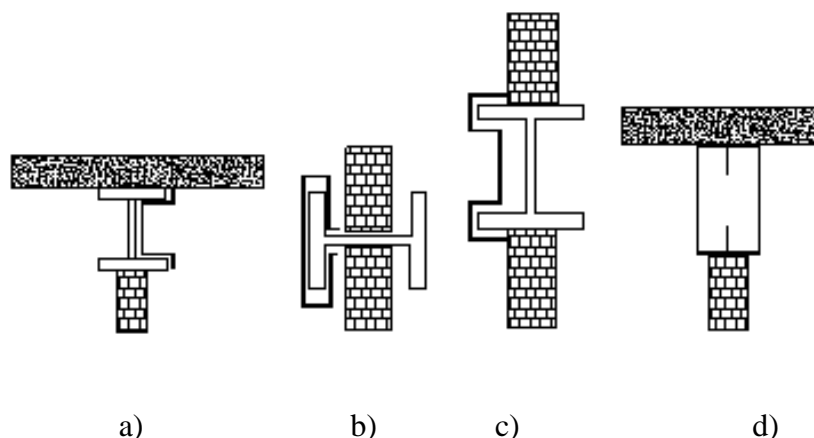


Figura 2.10: Casos de estudo analisados por Silva (2006) a) viga de aço em contacto com laje e parede b) pilar em contacto com paredes (alma perpendicular) c) pilares em contacto com paredes (alma paralela) d) secção fechada de viga em contacto com laje e parede

Foi utilizado o programa de elementos finitos a duas dimensões SuperTempCalc, e foi concluído que para uma secção em que a exposição é em três faces, a fórmula 2.2 Eurocódigo 3 – parte 1.2 (EN 1993-1-2:2010) conduz a resultados seguros, funcionando o elemento que está em contacto com o aço como material isolante. Para algumas situações, frequentemente presentes nos edifícios, existe alguma dificuldade na definição da área a considerar para o cálculo do fator F (fator de forma). Efetuado o cálculo do fator de forma ou fator de massividade e , a evolução das temperaturas através do indicado no Eurocódigo 3 – parte 1.2 (EN 1993-1-2:2010) ou pela norma NBR 14323:1999 e, comparando com o método avançado pelo SuperTempCalc verifica-se que a expressão não conduz a resultados satisfatórios. Visto que esta apresenta algumas limitações no cálculo da evolução das temperaturas para elementos de aço, em que só uma das faces se encontra exposta ao fogo, é necessário efetuar uma análise térmica recorrendo a métodos avançados, dada a dificuldade de cálculo no fator de forma, na definição da área aquecida.

Pamplona Guimarães (2007), analisou o dimensionamento do revestimento ao fogo de estruturas de aço. O seu estudo envolveu várias metodologias para o dimensionamento desses revestimentos com recurso aos métodos simplificados conforme as normas brasileiras, os resultados experimentais realizados no Brasil e ainda com o apoio de métodos avançados, no caso, o programa de elementos finitos SuperTempCalc (STC). De todos os casos abordados realça-se a análise de pilares de aço sem proteção ao fogo entre as paredes de alvenaria. Assim analisou dois tipos de pilares, W 360x32,90 e W 610x174, variando a parede de alvenaria entre os banzos e a alma. Por forma a fazer uma comparação no método analítico, foram examinados dois fatores de forma como indicado no esquema da figura 2.11 (para o pilar W 360x32,90).

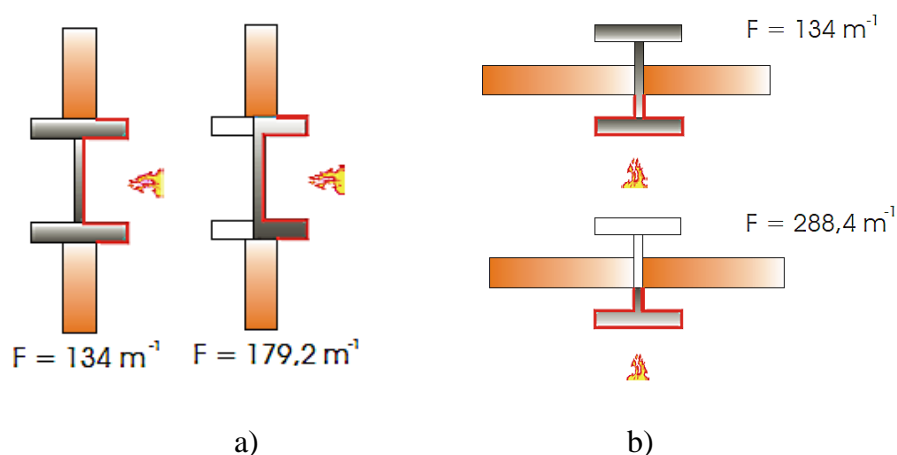


Figura 2.11: Diferentes valores dos fatores de forma analisados por Silva (2006) a) alma do pilar paralela à parede b) alma do pilar perpendicular à parede (Vista em planta), (Pamplona Guimarães (2007))

Sendo o perímetro exposto do pilar de aço o mesmo em ambas as situações para o cálculo do fator de forma F , a variação dá-se ao nível da área considerada exposta ao fogo, representada e preenchida a cinzento. A autora comparou os resultados obtidos pelos métodos simplificados com resultados numéricos, em situação de incêndio. Nos pilares isolados e inseridos em paredes de alvenaria, a autora concluiu que o uso dos métodos teóricos pode ter um elevado desempenho na economia de projeto. No caso dos pilares isolados, os métodos analítico e numérico conduzem a resultados muito menos semelhantes, o que não acontece para pilares inseridos em paredes de alvenaria.

Pamplona sugere que se utilize para o cálculo da força resistente e para ambos os casos já referidos, o método simplificado com o maior valor do fator de forma, visto ser a situação mais crítica. Contudo, existe uma limitação deste fator quando se trata de distribuições de temperatura não uniformes.

A estabilidade de pilares de aço à temperatura ambiente, é um tema já desenvolvido por inúmeros autores. Esta pode ser determinada através do cálculo da carga atuante durante a encurvadura quando esta ocorre na fase elástica do material, designada por carga crítica (P_{cr}) dada pela fórmula de Euler. Por outro lado, o comportamento de pilares sujeitos ao fogo é consideravelmente diferente. A rigidez, a restrição ao alongamento térmico provocado pela estrutura adjacente, e a distribuição de temperaturas ao longo da secção transversal e longitudinal do pilar, levam a uma gradual degradação do aço e por sua vez ao aparecimento de esforços e tensões que não são verificadas à temperatura ambiente

Tsalikis apresentou em 2009 (Tsalikis et al., 2009) um estudo sobre vigas-pilar de aço sob o efeito de gradiente térmico, isto é, combinação da capacidade de flexão axial de secções transversais de um aço de duplo-T submetidas a distribuições de temperatura não uniformes.

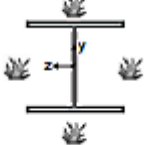
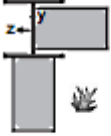
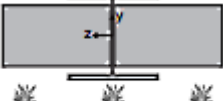
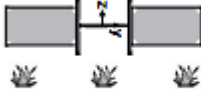
No seu trabalho, investigaram o modo como um gradiente térmico numa secção transversal de uma viga de aço afeta a sua resistência mecânica. Eles desenvolveram uma abordagem teórica baseada em simulações numéricas realizadas com um código de elementos finitos chamado CAST3M. Foi observado que o gradiente térmico altera a capacidade da secção transversal.

Os autores concluíram que a região de funcionamento segura da seção transversal apresenta, sob a presença de gradientes térmicos, uma diferenciação na forma que não é contabilizada pelo atual enquadramento regulamentar. Apontaram também a necessidade significativa de se efetuar uma investigação paramétrica extensiva de forma a obter regiões de segurança contabilizando a interação esforço axial – momento fletor (N-M) comumente usadas em secções transversais de aço estrutural.

Érica Kimura (2009a), no seu trabalho de mestrado, realizou diversas simulações numéricas em pilares de aço submetidos à ação do fogo, sendo os mesmos compartimentados por paredes de alvenaria ou lajes de betão.

Kimura recorreu ao *software* de cálculo por elementos finitos ANSYS v9.0 e analisou o gradiente térmico em elementos estruturais de aço, em contacto com paredes de alvenaria. Estes casos foram transferidos para modelos tridimensionais, obtendo-se o campo de temperaturas no elemento e, posto isto, a autora realizou uma análise termo-estrutural considerando as não linearidades geométricas e do material. Propôs, então, novos exemplos de cálculo para o fator de massividade F (quadro 2.2), pois tanto as normas brasileiras como as europeias ainda não contemplam todos os casos possíveis, conduzindo a valores de temperaturas diferentes dos verificados na realidade nas situações abordadas.

Quadro 2.2: Fator de massividade dos exemplos estudados Érica Kimura (2009 b)

Configuração	Fator de massividade	Configuração	Fator de massividade
	$\frac{2 \cdot (2 \cdot b_f + d - t_w)}{A_g}$		$\frac{2 \cdot b_f + 2t_f + h - 2e_{aext} - t_w}{2 \cdot A_g}$
	$\frac{2 \cdot b_f + d - t_w - e_{aext}}{A_g}$		$\frac{d + 2 \cdot b_f - t_w - e_{aext}}{A_g}$

A partir dos resultados apurados, Érica verificou que as imperfeições iniciais mostraram ter uma influência significativa na resistência ao fogo de cada modelo numérico e que os fatores de assimetria ou mono assimetria relativos à ação térmica e às imperfeições globais, quando ocorrem do mesmo lado ou em lados opostos, resultam em valores de tempos de resistência ao fogo distintos.

No cálculo de vigas – pilar, sujeitos a carga axial (P) e momentos fletores (M), sob a ação do fogo é comum considerar-se uma distribuição uniforme de temperaturas na secção. Contudo, Garlock et al. (2008), consideram que este método não é eficaz para todas as situações, como em casos em que o aquecimento do elemento não é uniforme, desenvolvendo por isso elevados gradientes térmicos na secção. Os autores analisaram, portanto, os efeitos dos gradientes térmicos, comparando elementos sob temperaturas uniformes e não uniformes, avaliando os efeitos de espessura dos banzos, altura da secção e eixo forte e fraco de flexão (figura 2.12).

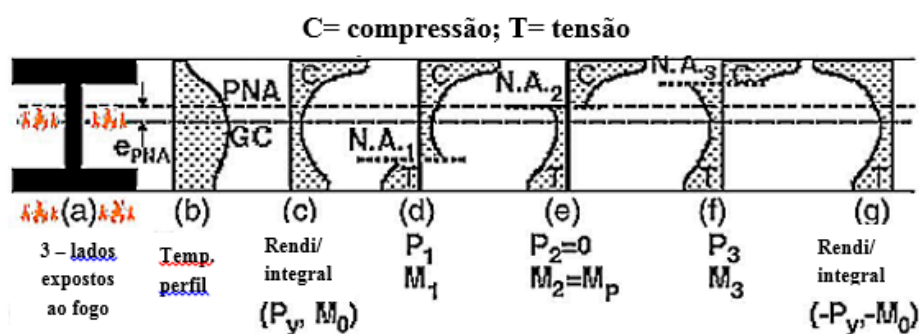


Figura 2.12: Perfis de temperatura e tensões de cedência com a posição do eixo neutro em diferentes locais, (Garlock et al., 2008)

Estes concluíram que haverá alteração na capacidade resistente da secção, pois a elevadas temperaturas o gradiente térmico desloca a posição da tensão axial resultante o que resulta em momentos fletores adicionais.

As forças atuantes P-M determinarão a obtenção de resultados conservativos ou não conservativos, no cálculo baseado na temperatura uniforme. O comportamento térmico de elementos de pilares de aço isolados é uma temática que já tem um estudo significativo, no entanto é necessária investigação mais específica sobre a influência da estrutura circundante no elemento de aço isolado, não devendo esta ser desprezada.

2.3.2.2. Trabalhos numéricos sobre o comportamento estrutural

Burgess et al., em 1994 desenvolveram uma abordagem analítica baseada em "Perry-Robertson" - princípios simples para estudar o comportamento de pilares de aço quando sujeitos ao fogo. A teoria previa as temperaturas da falha destes membros e descrevia qualitativamente o seu comportamento, permitindo que os parâmetros que afetam os pilares aquecidos fossem separados e as suas influências estudadas.

A abordagem Perry foi testada contra os resultados analíticos e de teste. Neste estudo, a falha do pilar foi considerada como sendo a primeira cedência do material. O estudo teve como objetivo desenvolver um modelo de elementos finitos tridimensional que poderia analisar sub-pórticos de estruturas. O objetivo foi representar em qualquer situação estrutural, em particular de incêndio, gradientes térmicos em toda a seção.

Os autores concluíram que gradientes de temperatura aumentam as temperaturas no lado aquecido o que está de acordo com observações a partir dos resultados de ensaios. Notaram que, para secções H, a falta de estabilidade significativa provocada pelo gradiente de temperatura tende a ser confirmada pelo estudo de elementos finitos. Ainda observaram, de acordo com estudos de elementos finitos, que se os gradientes térmicos são em torno do eixo principal de inércia, as deflexões/curvaturas térmicas não se demonstram prejudiciais para o membro em estudo mas, caso os gradientes se dêem em torno do eixo secundário já se verificam efeitos mais graves.

Usmani et al. (2001), traçaram o comportamento teórico das estruturas sob a ação de temperaturas uniformes e diferenciais. Este estudo apoiou-se na análise individual de elementos estruturais. Os apoios considerados continham uma estrutura circundante, sob diferentes ações térmicas, descrevendo assim o comportamento dos elementos. Todas as expressões analíticas desenvolvidas partiram da relação fundamental da mecânica estrutural que descreve o comportamento de estruturas quando sujeitas a ações térmicas (equação 2.1).

$$\varepsilon_{total} = \varepsilon_{thermal} + \varepsilon_{mechanical} \quad (2.1)$$

As abordagens descritas e usadas atualmente para o mesmo fim, são bastante conservadoras e nem sempre têm por base princípios fundamentais, levando com isso a construções pouco económicas, não sendo por vezes justificáveis por fazerem uso excessivo de proteção de elementos. Esta publicação concede-nos elementos fundamentais para estimar forças e deslocamentos em estruturas reais com idealizações apropriadas, podendo ainda serem utilizadas análises numéricas fornecendo resultados mais precisos, conduzindo a construções de estruturas metálicas mais económicas.

Em 2004 Vila Real et al. (Vila Real et al., 2004) publicou um estudo numérico sobre o comportamento de vigas-pilar de aço submetidos ao fogo e uma combinação de força axial e momentos fletores em elementos de aço “nus”. Usaram o SAFIR, programa de elementos finitos linear desenvolvido na Universidade de Liège, para determinar a resistência de uma viga-pilar a temperaturas elevadas utilizando as propriedades do material do Eurocódigo 3, parte 1-2 (1993-1-2-2005). Compararam os resultados numéricos com o Eurocódigo 3, nomeadamente, a resistência à flexão não-dimensional de uma viga simplesmente apoiada no âmbito dos momentos finais a partir de duas propostas Eurocódigo (versão 1995 (EN 1993-1-2-1995) e versão 2002 (PT 1993-1-2-2002)) versus resultados numéricos obtidos para uma gama de temperaturas uniformes de 400 a 700°C, para vários níveis de esbelteza não-dimensional. Embora o estudo numérico apresentado fosse limitado a um tamanho de seção única (IPE200) e classe de aço (S235), um estudo paramétrico anterior para diferentes perfis e tipos de aço realizado para encurvadura lateral de vigas de aço submetidas ao fogo, verificou que não há diferenças qualitativas justificando a extrapolação desses resultados. A influência de gradientes de temperatura em todas as almas e banzos foi considerada neste estudo. A nova proposta consiste num modelo de cálculo simples e geralmente do lado seguro quando comparado com resultados numéricos. Então, concluíram que a versão mais recente do Eurocódigo (EN 1993-1-2-2002) é mais viável do que a anterior, sendo um ajuste perfeito para os resultados numéricos.

Landesmann e Baptista (2005) desenvolveram um novo modelo numérico de aplicação em métodos avançados, para avaliação de estruturas porticadas em aço sob a ação do fogo, (figura 2.13). Para tal, recorreram a um modelo de rótulas plásticas com o intuito de determinar a resistência da estrutura. A abordagem numérica baseou-se em certas características, tais como: a diminuição da rigidez nos nós dos elementos, a diminuição da resistência e da rigidez dos pilares de aço de acordo com as normas europeias, e uma nova formulação dos deslocamentos obtidos. Utilizaram para curva de incêndio, a curva padrão ISO-834, assumindo que a distribuição de temperaturas era uniforme ao longo da secção transversal e longitudinal.

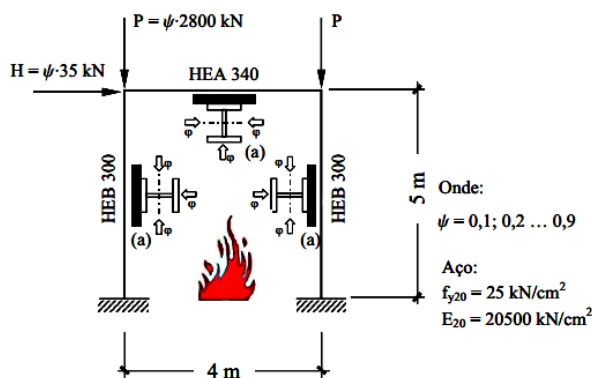


Figura 2.13: Esquema da estrutura analisada e posição da ação térmica, (Landesmann e Baptista (2005))

Efetuarão uma comparação dos resultados obtidos com os métodos simplificados do Eurocódigo 3 – parte 1.2 (EN 1993-1-2:2010) e com o programa de elementos finitos SAFIR e verificaram que os resultados são satisfatórios uma vez que inseriram algumas simplificações no novo modelo numérico.

Os autores avaliaram a variação da temperatura nos perfis de aço, através de métodos simplificados, a norma brasileira, NBR 14323:1999 e o Eurocódigo 3 – parte 1.2 (EN 1993-1-2:2010) e indicam a equação 2.2 para o seu cálculo, onde surgiram dúvidas sobre a utilização do fator forma.

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m/V}{c_a\rho_a} \dot{h}_{net,d}\Delta t \quad (2.2)$$

Este fator resulta do quociente entre o perímetro da secção exposta ao fogo e a área da secção que está a ser aquecida, até ser atingida a temperatura crítica. Pois, quanto maior for o perímetro exposto, mais rápido será o aquecimento da secção e por sua vez, quanto maior a área da secção mais tempo levará ao aquecimento da mesma.

Garlock et al. (2006), publicaram um estudo sobre o efeito combinado do esforço axial e momentos fletores de vigas – pilar expostas ao fogo, com gradientes térmicos. Estabeleceram uma comparação do comportamento destes elementos com os que apresentam perfis de temperatura uniforme.

Os modelos de pilares do estudo foram secções de aço com banzos de grande espessura pertencentes a edifícios de grande altura. Os parâmetros considerados foram a espessura da chapa, a altura da secção transversal e a direção de flexão (i.e com flexão em torno do eixo forte e do eixo fraco). Pelos resultados apresentados observaram que os elementos que experimentam aquecimento diferencial desenvolvem um gradiente térmico através da sua secção. É possível também verificar que se as temperaturas forem suficientemente elevadas para reduzir a tensão de cedência do aço, o gradiente térmico irá fazer com que a posição do ponto de aplicação do esforço axial resultante se desloque e com isso induz momentos fletores adicionais que alteram o desenvolvimento dos diagramas de interação P-M. O desenvolvimento dos diagramas de interação P-M é realizado com base numa temperatura uniforme ao longo da secção mas depende da combinação de carregamento aplicada. O diagrama referido pode fornecer uma estimativa conservativa ou do lado da segurança da capacidade real da secção, que deverá ser estimada considerando o gradiente real de temperatura na secção. Essas conclusões foram traduzidas nos gráficos da figura 2.14.

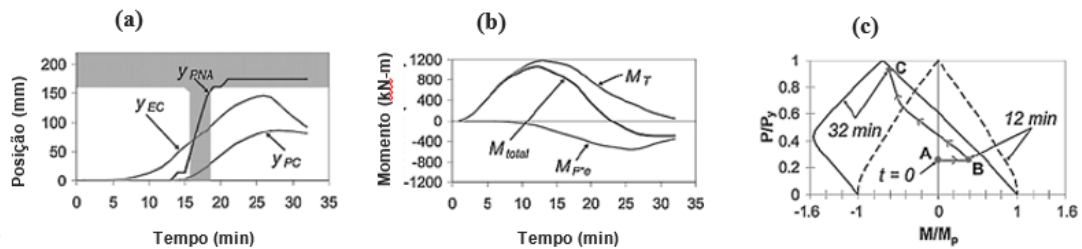


Figura 2.14: A figura (a) a localização do centro e gravidade, (b) componentes do momento, e (c) o desempenho P-M normalizado para uma coluna W14 × 314 submetida ao fogo em três lados e aplicada $P = 25\%$ da inicial P_y , (Garlock et al. (2006))

Em 2007, Garlock e Quiel (Garlock et al., 2007) apresentaram uma discussão acerca do comportamento de banzos de aço com dimensão significativa quando submetidos a diferentes cargas axiais e gradientes térmicos, durante a exposição ao fogo.

Os escritores determinaram que o centro de rigidez da secção se move em direção ao lado mais frio e que a temperatura aumenta de forma não uniforme ao longo da mesma. Assumindo que as cargas axiais são aplicadas no centro geométrico, a presença de um gradiente térmico produz um momento de flexão, visto que estas atuam agora de forma excêntrica no centróide da respetiva secção. Em secções com rotação restrita, este momento fletor é oposto em relação aos momentos produzidos por extensões térmicas.

Neste estudo concluíram que, eventualmente, o momento fletor total numa secção sujeita a gradientes térmicos inverte a sua direção durante o movimento do centróide provocado pelo aquecimento diferencial de temperaturas.

Quiel e Garlock (2008) realizaram um estudo onde apontam metodologias que antecipam o comportamento de pilares de edifícios quando expostos a um incêndio figura 2.15.

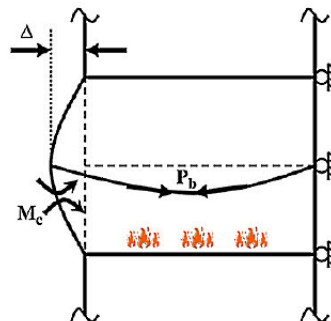


Figura 2.15: Momentos fletores no pilar, esforços axiais na viga e deslocamento lateral no pilar – induzidos pela ação do incêndio, (Garlock et al., 2008)

O foco do estudo prende-se não só com o fato de o pilar ser parte integrante da estrutura e estar parcialmente exposto à ação do fogo, que conseqüentemente provoca um aquecimento diferencial que por sua vez induz esforços de flexão, assim como o aumento de esforço axial a que está sujeita a viga e a deflexão lateral do pilar. Os autores propuseram dois componentes principais, sendo o primeiro o material da secção cujo perímetro está a ser aquecido e vai sofrer alterações das suas características mecânicas, tal como recomendado pelo Eurocódigo 3 – parte 1.2 (EN 1993-1-2:2010) devido ao aumento da temperatura, e sendo o segundo a caracterização do modelo no qual é representada a interação entre o pilar e a viga da estrutura.

O intuito deste trabalho foi de prever o comportamento do pilar devido à expansão térmica da viga devido à sua exposição parcial à ação do fogo e avaliar de que forma é que os esforços atuantes e transmitidos ao pilar (momento fletor e esforço axial) influenciam a capacidade resistente da secção, encurvadura local e encurvadura lateral. Assim, todas estas informações simplificadas podem e devem ser usadas no estudo de situações mais complexas.

Garlock e Quiel, em 2008, (Garlock et al., 2008) propuseram um estudo sobre o diagrama de interação da carga plástica axial e o momento fletor, para secções de aço expostas ao fogo com gradientes térmicos. Observaram que a capacidade estrutural de uma viga ou pilar é limitada por um dos três estados limites: resistência plástica da secção total, flexão ou encurvadura lateral, e encurvadura local. Analisaram o primeiro estado limite derivando a capacidade de rendimento de uma secção de uma viga ou pilar com banzos de dimensões significativas sujeitas a carga axial combinada (P), momento (M), e gradientes térmicos. Exemplos comuns que experimentam este facto são pilares e vigas que suportam uma laje de piso. A capacidade de resistência seria representada pela curva de interação plástica (P-M).

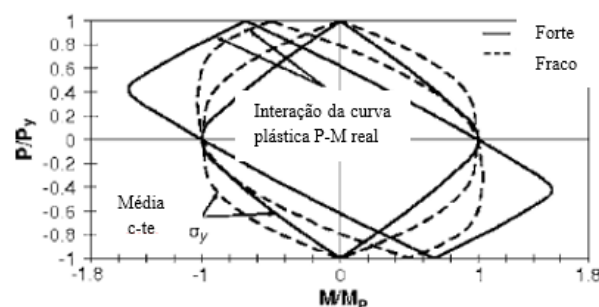


Figura 2.16: Comparação de curvas de interação P-M plásticas para a secções com carga no eixo forte e fraco para $t = 25$ min (Garlock et al (2008))

Garlock e Quiel demonstraram que existe alteração da forma do diagrama de interação plástica P-M ao longo do tempo, desde que se verifiquem temperaturas elevadas capazes de reduzir a

tensão de cedência produzindo gradientes térmicos. Dependendo da combinação de carga aplicada, a curva de interação plástica P-M calculada através de uma temperatura uniforme forneceu uma estimativa mais conservadora de capacidade plástica real no caso dos pilares e outra menos conservadora no que respeita às vigas. Assim, verificaram que poderiam ser estudadas secções com chapa de tamanho e profundidade variável, e para flexão sobre o eixo forte e o eixo fraco da secção.

A análise gráfica observada neste trabalho pode ser utilizada para a interpretação do estado limite plástico em vigas-pilares de aço expostos ao fogo.

Correia et al. (2009d) levaram a cabo uma pesquisa para averiguar o comportamento de pilares de aço, quer inseridos em paredes quer isolados, com dilatação térmica restringida em situação de incêndio.

O facto de existirem paredes revela um efeito potencialmente negativo nos pilares, pois elas contribuem para o aquecimento diferencial ao longo da secção, introduzindo momentos fletores desfavoráveis, que podem levar à instabilidade destes elementos, isto é, curvatura térmica. Contudo, funcionam como isolamento térmico ajudando assim a reduzir as temperaturas e contribuindo para um melhor comportamento ao fogo. Utilizando o programa de elementos finitos ABAQUS, desenvolveram modelos de pilares HEA 160 e HEA 200 sujeitos ao fogo. Focaram-se em duas situações de estudo em que uma considerava pilares isolados e a outra abordava o caso de estes se encontrarem inseridos em paredes simples de alvenaria. Para os últimos, ainda houve variação na espessura da parede e a orientação da alma do pilar relativamente à superfície da parede, sendo paralela ou perpendicular á mesma. Os modelos numéricos foram construídos com elementos sólidos, e os resultados das análises computacionais foram validados com base nos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais.

Os autores concluíram que, os pilares inseridos em paredes apresentaram melhor resistência ao fogo que os pilares isolados, pois o efeito benéfico conseguido com o isolamento térmico dos pilares pelas paredes é mais significativo que o efeito negativo dos gradientes térmicos. A espessura das paredes circundantes demonstrou ser o parâmetro com maior influência no comportamento dos pilares, visto que, paredes mais espessas apresentam resistências superiores quando se trata da exposição ao fogo.

Em 2010, Quiel e Garlock (Quiel et al., 2010) propuseram uma metodologia simplificada para calcular a resposta de pilares de aço que desenvolvem gradientes térmicos através da sua secção devido a uma exposição ao fogo não uniforme.

As expressões simplificadas foram desenvolvidas através da integração de séries temporais, permitindo ao utilizador calcular explicitamente respostas térmica e estrutural em cada período de tempo sem utilizar métodos iterativos ou computacionais. O proposto foi referenciado como

“membro simplificado” do modelo e sugeriu três elementos principais: (1) uma análise térmica simplificada, (2) uma predição simplificada de capacidade resistente, e (3) uma previsão simplificada da carga de utilização. A junção dos componentes (2) e (3) formam uma análise estrutural simplificada que subdivide a secção transversal da viga-pilar num pequeno número de fibras espessas que foram o objeto da análise para a retirada de conclusões. Usaram dois protótipos de pilares exteriores para verificar a metodologia estudada. As análises estruturais simplificadas, bem como os modelos de elementos finitos, forneceram previsões semelhantes acerca da capacidade e cargas de utilização, bem como o modo e tempo de falha dos pilares. As análises simplificadas, mecânicas e térmicas, foram combinadas para se obter uma solução puramente simplificada que não necessita do recurso a qualquer análise de elementos finitos. Estas análises mostraram uniformidade com resultados estruturais de análise de elementos finitos.

As previsões simplificadas entram em concordância com previsões computacionais e resultados experimentais, sugerindo assim que métodos simples podem ser usados de forma eficaz para prever respostas relativamente a pilares exteriores que desenvolvem gradientes térmicos ao longo da secção, quando submetidos ao fogo.

Em 2010, Dwaikat e Kodur (Dwaikat et al., 2010) propuseram uma abordagem simplificada para avaliar curvas de capacidade axial e de momento plástico para pilares periféricos de edifícios, com gradientes térmicos não uniformes.

Sabiam que membros de aço restringidos e quando expostos ao fogo desenvolvem forças térmicas significativas, que transformam o comportamento de um pilar, passando este a comportar-se como uma viga-pilar. Determinaram a capacidade de carga de tais pilares através de curvas de capacidade de carga axiais e de momento fletor (curvas P-M). Usaram temperaturas médias uniformes para estabelecer curvas P-M em elevadas temperaturas quando os quatro lados de uma viga ou pilar são aquecidos. Os autores estabeleceram que o mesmo não se poderia efetuar em situações em que pelo menos um dos lados não se encontrava exposto ao fogo (isto é, com um, dois ou três lados aquecidos) devido ao desenvolvimento de gradientes térmicos ao longo da secção. O aquecimento diferencial pode causar graves distorções nas curvas P-M e tornar as curvas de capacidade com base na temperatura uniforme insuficientes para avaliar a resistência de tais vigas-pilares. Assim, uma abordagem simplificada foi proposta para ajustar as curvas de temperatura uniforme e explicar a distorção resultante dos gradientes térmicos induzidos pelo fogo.

O método proposto implica o uso de modelos numéricos e sugere que as temperaturas da secção transversal do aço sejam calculadas e que, de seguida, seja calculado o diagrama da distorção das curvas P-M ajustando diagramas P-M baseados numa temperatura média uniforme, demonstrando então que o método proposto é bem adequado para prever a capacidade de vigas-pilar que desenvolvem gradientes térmicos sob fogo.

Em 2010 Quiel e Garlock, (Quiel et al., 2010) avaliaram parâmetros envolvidos na análise de elementos finitos para modelar pórticos de grande altura sujeitos ao fogo.

Foi usado como protótipo um pórtico de um edifício real no qual ocorreu um incêndio grave e assim, analisaram o desempenho da resistência ao momento fletor dos pilares exteriores para vários modelos com diferentes níveis de complexidade e simplificação. Examinaram três parâmetros cuja atuação se encontra relacionada, sendo: (1) modelos 3D versus modelos 2D, (2) a análise da laje em 2D, e (3) o efeito de modelar cada elemento de aço no pórtico com perfil de temperatura não uniforme na secção transversal versus perfil de temperatura uniforme. Foi observado o desempenho relativo e o custo computacional de modelos de elementos finitos em 3D e 2D, concluindo que os últimos podem ser utilizados de forma razoável para prever o desempenho MRF (“*moment resisting frame*”) de um pórtico de um arranha-céus quando sujeito ao fogo, apresentando uma economia 250 vezes maior no que respeita ao tempo que demora a correr o modelo. Verificou-se que pilares de enchimento são mais sensíveis aos efeitos estruturais de uma laje de betão contínua. Os autores depararam-se com previsões globais semelhantes em modelos 2D e 3D, no que respeita ao pico de carga axial. Posto isto, concluíram que o modelo 2D pode ser usado poupando também bastante no tempo de execução da análise do modelo. Compararam modelos 2D tabelados, cujos membros de aço apresentavam gradientes térmicos, com modelos cujos membros expunham temperaturas médias uniformes. Tais comparações levaram a resultados semelhantes referentes á carga axial na viga e ao momento do pilar exterior dada a sua interação quando aquecida. Apesar de tais fatos, concluíram que gradientes térmicos produzem mudanças significativas na deformação do pilar e que o comportamento ao estado limite plástico P-M (P é a combinação de cargas axiais e M é o momento fletor) exibido por vigas-pilares, nestas condições, experimentam uma diminuição acentuada da capacidade.

Os autores recomendam, assim, a inclusão de gradientes térmicos em modelos de viga-pilar, usados para prever desvios ou comportamentos do estado limite plástico, visto que a modelação com temperaturas uniformes pode produzir previsões imprecisas da determinação da carga última e consequentemente da capacidade estrutural dos membros envolvidos.

Em 2011, Quiel (Quiel et al., 2011) desenvolveram um estudo que previa a capacidade resistente de uma viga-pilar durante um incêndio através de cálculos iterativos.

Com este estudo, verificaram que os pilares do pórtico do edifício ficam sujeitos a momentos fletores. Estes são gerados por gradientes térmicos e pelas restrições axiais das vigas que geram carga axial. Posto isto, os pilares exteriores passam a agir como vigas-pilar. Foram considerados três componentes para calcular a resposta global do pilar quando sujeito ao fogo, sendo eles: um incêndio paramétrico, um modelo de transferência de calor e um modelo estrutural. O primeiro serviu para calcular a evolução temperatura- tempo. No modelo de transferência de calor, a temperatura crítica (T_{crit}) seria o limiar no qual se desenvolve um gradiente de temperatura, a diminuição da rigidez e da carga do pilar e (T_c) a temperatura máxima calculada

no pilar exterior. Se T_c for maior que T_{crit} , então, usa-se um modelo simplificado para a análise da carga e da capacidade, visto que tal resposta dita o desempenho da viga-pilar. A análise estrutural calcula, através do modelo de membro simplificado, as variações de capacidade de carga experimentadas pelo pilar quando sujeitos a gradientes térmicos. Se T_c for menor que T_{crit} , usa-se o quadro simplificado para analisar a resposta do pilar à sua interação mecânica com a viga de piso.

Os modelos porticados serviram para que se obtivesse a temperatura mecânica da secção transversal da viga de piso. A análise estrutural através deste cálculo considera também a restrição à expansão térmica da viga fornecida pelo pilar exterior. Tudo isto provoca carga axial e momentos fletores no pilar. Estes cálculos serviram para estimar a carga induzida pela interação de esforços nestes membros e as deformações permanentes resultantes, que podem induzir tensões residuais/momentos assim que o fogo acaba. A validação do procedimento apresentado foi feita por comparação com soluções de elementos finitos.

Em 2011, Tsalikis et al. (Tsalikis et al, 2011) estudaram a encurvadura elástica de pilares de aço sob gradiente térmico.

Inicialmente, examinaram em separado o efeito do gradiente térmico sobre a mudança elástica do eixo neutro e, em seguida, foi acrescentada a curvatura térmica do membro para investigar o comportamento combinado. Os autores usaram duas abordagens diferentes para o problema. Na primeira, a equação de viga-pilar foi aplicada para perceber o efeito do deslocamento do centróide a ser estudado. Com os resultados obtidos, observaram que tensões máximas admissíveis assemelham-se às curvas de encurvadura de Euler para a temperatura máxima da secção transversal. A excentricidade que surge a partir do deslocamento do centróide não pode ser estudada independentemente. A mudança do centróide deve ser sempre menor do que a deflexão lateral da coluna de forma que a equação respeite condições de fronteira iniciais. Como o gradiente térmico aumenta, as curvas de encurvadura ficam próximas da curva do EC3 parte 1-2 (EN 1993-1-2:2010) para a temperatura máxima. Para pequenos picos de gradientes térmicos, a encurvadura coincide com a curva de Euler. Além disso, a análise por elementos finitos verifica a validade da abordagem simples, para um gradiente térmico específico. Pelo contrário, a análise do modelo de elementos finitos, com a aplicação das leis materiais elastoplásticas, tal como proposto pelo mesmo Eurocódigo, deu resultados mais conservadores. Esta diferença decorre da superestimação inicial do limite de elasticidade nas leis bilineares de comportamento do aço, aplicadas ao modelo elástico.

Os princípios apresentados neste estudo pretenderam gerar as ferramentas analíticas necessárias para o uso prático. Com a determinação adequada das leis de tensão-deformação bilineares e a adição de outros fenómenos que condicionam um pilar, mesmo a temperaturas ambientes, este método pode ser usado com segurança para a predição de limites inferiores na encurvadura elástica de pilares com média e alta esbelteza.

Em 2011 Quiel et al. (2011), apresentam um método para determinar a capacidade resistente de vigas-pilares de aço sob a ação do fogo. Estudaram a evolução de momentos fletores induzidos tanto pelos gradientes térmicos como pela restrição axial induzida pelas vigas adjacentes aquecidas. Formularam um método para antecipar o comportamento de uma viga-pilar do perímetro de um edifício, considerando a resposta do membro individual incluindo gradientes térmicos, como a resposta global abrangendo as interações dos membros adjacentes. Os métodos apresentados são diretos, sem iteração, e podem ser solucionados usando uma folha de cálculo ou um algoritmo matemático simples. Avaliaram o procedimento comparando os resultados com soluções de elementos finitos, e foi validado anteriormente contra ensaios experimentais.

Na sequência dos ensaios realizados para pilares isolados com dilatação térmica restringida, Correia (Correia et al., 2012), efetuaram um estudo relativamente ao comportamento ao fogo de pilares de aço inseridos em paredes de alvenaria com alongamento térmico restringido.

Os ensaios são semelhantes aos já realizados em pilares isolados com dilatação térmica restringida, com o acréscimo das paredes de alvenaria e da aplicação da ação térmica de um só lado. Posto isto, fez variar também a sua orientação entre eixo fraco e eixo forte de inércia, ou seja, alma do pilar paralela ou perpendicular às paredes de alvenaria.

Para as simulações numéricas recorreram ao programa de elementos finitos ABAQUS, simulando os ensaios experimentais desenvolvidos; a aplicação de cargas a que os pilares estiveram sujeitos foi de 50% e 70% da carga de encurvadura à temperatura ambiente.

Devido ao aumento da temperatura no aço, o módulo de Elasticidade e a tensão de cedência modificam-se, reduzindo acentuadamente, provocando um deslocamento do centro de gravidade para o lado frio da secção do pilar levando ao aparecimento de momentos fletores adicionais, opostos aos momentos fletores estimulados pelo aumento da temperatura na secção e restrição rotacional, provocando a flexão do pilar para o lado mais frio. Na avaliação do comportamento estrutural propõem duas abordagens: uma considera a área reduzida secção transversal na parte mais aquecida (figura 2.17 e 2.18), e outra baseia-se nos diagramas de tensão plástica, com a tensão de cedência afetada dos coeficientes definidos no Eurocódigo 3 parte 1-2 (EN 1993-1-2:2010), devido ao aumento de temperatura no aço.

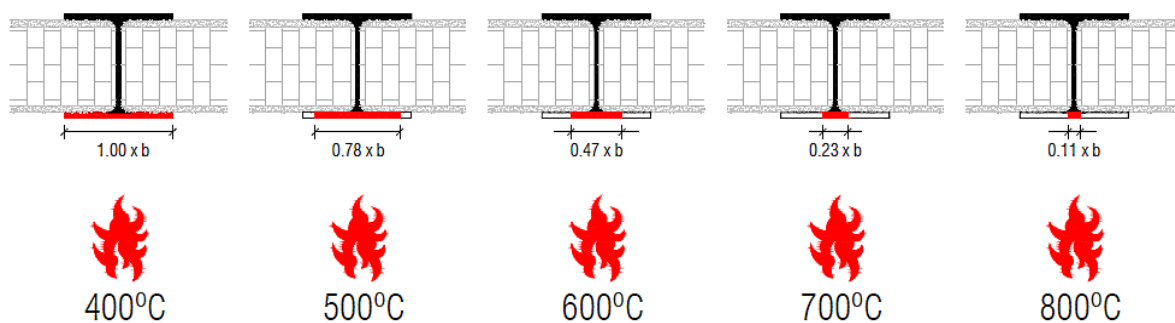


Figura 2.17: Análise resistência plástica de um pilar de aço em contacto com paredes, com a alma do perfil perpendicular à parede, i.e, com o gradiente térmico ao longo da alma, (Correia et al., 2012)

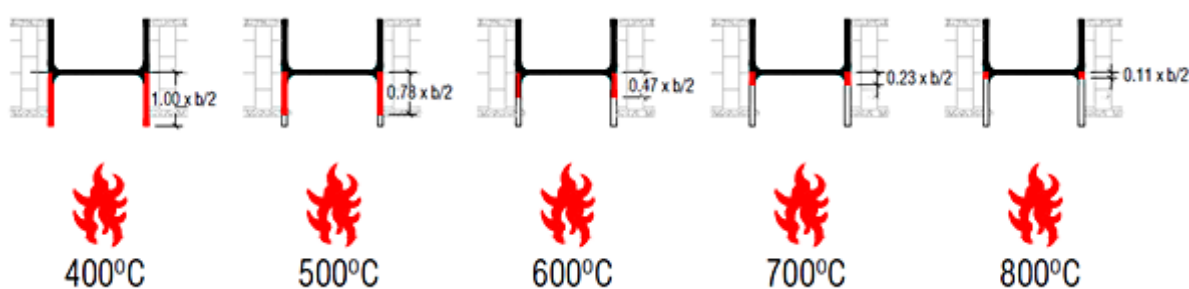


Figura 2.18: Análise resistência plástica de um pilar de aço em contacto com paredes, com a alma do perfil paralela à parede, i.e, com o gradiente térmico ao longo dos banzos, (Correia et al., 2012)

O estudo acerca do mecanismo de falha dos pilares de aço inseridos em paredes com elevados gradientes térmicos revelou que, em todos os casos estudados e contidos no artigo em análise, as temperaturas na secção transversal do pilar são mais baixas e a resistência ao fogo mais elevada, quando comparadas com pilares de aço isolados. As temperaturas e os tempos críticos do pilar são influenciados pelo nível de carga e a espessura das paredes.

Anil Agarwal (Agarwal et al., 2013) avaliaram o comportamento de pilares de aço quando submetidos a gradientes térmicos originados pela carga de incêndio. Para isso realizaram ensaios experimentais e fizeram um estudo numérico recorrendo ao *software* de cálculo de elementos finitos ABAQUS. A análise numérica foi calibrada consoante os resultados dos ensaios experimentais e através desta efetuaram estudos paramétricos, avaliando a resistência e o comportamento de falha dos perfis de aço quando sujeitos a diferentes formas de aquecimento. As análises efetuadas basearam-se na transferência de calor, através de um forno, e na aplicação de carga (não constante). Os pilares foram submetidos ao aquecimento dos quatro lados, tendo distribuição uniforme ao longo da secção transversal, figura 2.19 a). Agarwal et al. afirmam que a distribuição uniforme da temperatura é um dos princípios que promovem a

sobreavaliação da capacidade de carga do pilar. Referem também que as equações existentes para o cálculo da resistência ao fogo dos pilares apenas consideram o aquecimento uniforme, sendo que numa estrutura real de incêndio sabe-se que o aquecimento não é uniforme para o caso dos pilares periféricos/pilares exteriores da estrutura, que apenas sofrem aquecimento de um só lado, produzindo gradientes térmicos na secção transversal dos mesmos. Os autores tentaram simular esta situação.

Posteriormente, os pilares foram sujeitos a aquecimento não uniforme de forma parcial, para produzir gradientes térmicos na secção transversal, figura 2.19 b) e c). Através dos resultados do estudo, verificaram que o comportamento e a resistência dos pilares de aço dependiam da esbelteza dos perfis, da carga axial aplicada e da forma de aquecimento. Este estudo possibilitou observar os modos de flexão segundo o eixo forte e fraco de inércia, e a encurvadura à flexão-torção.

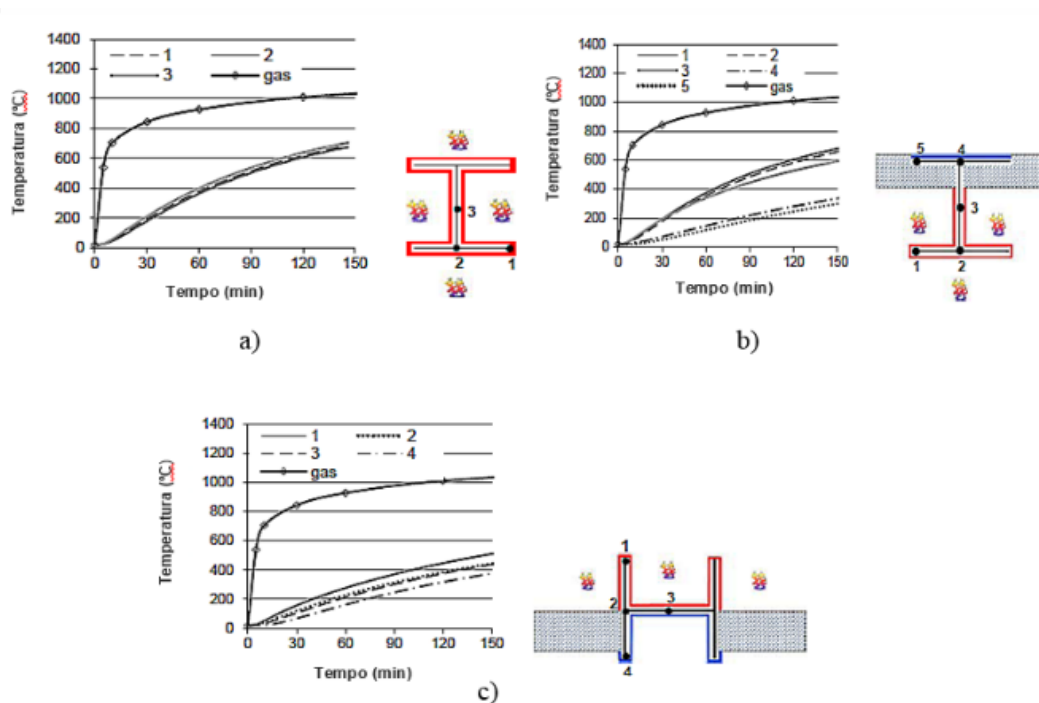


Figura 2.19: O aquecimento em diferentes locais da secção dos pilares W12x58 para (a) o aquecimento uniforme, (b) ao longo do gradiente de web, e (c) gradiente ao longo dos banzos, (Anil Agarwal et al. (2013))

Outra constatação foi o fato de os pilares submetidos ao aquecimento uniforme possuírem maior admissão de calor. Geralmente, pilares aquecidos de forma não uniforme atingem a rotura quando sujeitos a temperaturas médias mais baixas do que os pilares submetidos a aquecimento uniforme. No entanto, perfis de aço submetidos ao aquecimento uniforme alcançam a temperatura de rotura mais rapidamente do que os submetidos ao aquecimento não uniforme, devido à maior absorção de calor. Algumas exceções surgiram nos perfis muito esbeltos

submetidos a cargas axiais superiores a 50% da sua capacidade de carga de encurvadura à temperatura ambiente.

Os resultados a partir do estudo paramétrico possibilitaram o desenvolvimento de equações de cálculo para colunas de aço com banzo de grande espessura submetidos a aquecimento não uniforme, resultando em gradientes térmicos através da secção transversal.

Concluiu-se que o gradiente térmico num pilar exterior altera o diagrama plástico de interação P-M (carga axial – momento fletor) e que o pressuposto de distribuição uniforme da temperatura resulta numa estimativa conservativa da capacidade resistente da secção.

3. AÇÕES TÉRMICAS E PROPRIEDADES DOS MATERIAIS NO DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS

3.1. Introdução

Para determinar o desenvolvimento do fogo em elementos estruturais, são utilizados os métodos tradicionais que envolvem a realização de um ensaio de resistência ao fogo. Para tal, recorre-se a laboratórios de incêndio credenciados onde se sujeitam vigas e pilares a elevadas temperaturas, utilizando um forno, de forma a simular as propriedades de um incêndio. As condições de aquecimento do forno são especificadas de acordo com a norma europeia EN 1363-1 (1999). A curva padrão ISO 834 (EN 1991-1-2 (2002)) é a mais utilizada para ensaios em edifícios.

Para a análise da estabilidade estrutural, é necessário que os compartimentos de um edifício sejam completamente envolvidos pelas chamas - flashover. A teoria do flashover dita que, durante a evolução do incêndio, os materiais combustíveis presentes poderão aquecer gradualmente atingindo o seu ponto de ignição, provocando queima instantânea e generalizada desses materiais. Este acontecimento deve-se ao fato dos gases do incêndio aquecidos, irradiarem calor para materiais combustíveis que se situam mais afastados da origem do fogo. A irradiação produz pirólise dos materiais combustíveis. Os gases produzidos durante este período aquecem até à temperatura de ignição, ocorrendo então o flashover, ficando toda a aérea envolvida em chamas.

O Eurocódigo 1 parte 1.2. (2002) pode descrever uma situação pós-flashover usando expressões paramétricas que traçam todo o ciclo de aquecimento e arrefecimento. Estes consideram a carga de incêndio, características de ventilação, a geometria do compartimento, e propriedades térmicas do piso e do teto bem como as paredes circundantes.

Para as ações térmicas podemos recorrer à EN 1991-1-2 (2002) onde existe uma distinção entre incêndios nominais e incêndios paramétricos que consideram os principais parâmetros que influenciam o crescimento e desenvolvimento dos incêndios. Deste modo, a curva temperatura-tempo e, conseqüentemente o fluxo de calor, variam com a dimensão do edifício, quantidade ou com o tipo de carga de incêndio.

As ações térmicas que são definidas por uma densidade de fluxo de calor incidente na superfície do elemento são compostas por radiação e convecção.

Para a caracterização de ações térmicas deve ser determinada a temperatura do gás na vizinhança do elemento exposto ao fogo. Esta temperatura pode ser calculada a partir de curvas

nominais de incêndio ou por modelos de incêndios naturais. As curvas de incêndio nominais contidas na EN 1991-1-2 (2002) são a curva de incêndio padrão, a curva de incêndio exterior e a curva de hidrocarbonetos fogo. No que respeita aos modelos de incêndio naturais, eles são divididos em modelos de cálculo simplificados (curvas de incêndio paramétrico e modelos localizados fogo) e modelos de cálculo avançados (modelos de uma zona; modelos de duas zonas e modelos de dinâmica de fluidos computacional (DFC)).

Para averiguar a libertação de calor, num dado espaço e durante um fogo, é necessário considerar a carga de incêndio, ou seja, os produtos susceptíveis de alimentar a combustão. Posto isto, consegue-se prever a evolução do fogo, nomeadamente a elevação da temperatura dos gases.

3.2. Ações térmicas

De acordo com EN1991-1-2 (2002), as ações térmicas são definidas em termos de densidade de calor e devem-se a duas vertentes: convecção e radiação. Assim, o valor de cálculo da densidade de fluxo de calor por unidade de superfície é dado por:

$$\dot{h}_{net,d} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r} \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.1)$$

O componente de fluxo de calor convectivo líquido é determinado pela expressão:

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c \cdot (\theta_g - \theta_m) \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.2)$$

onde:

α_c – é o coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m^2];

θ_g – é a temperatura do gás na vizinhança do membro de fogo exposto [$^{\circ}\text{C}$];

θ_m – é a temperatura da superfície do elemento de [$^{\circ}\text{C}$]

Nas faces não expostas dos membros de separação, o fluxo de calor líquido é determinado usando a equação (3.2), $\alpha_c = 4 \text{ W/m}^2\text{K}$. Este coeficiente deve ser $\alpha_c = 9 \text{ W/m}^2\text{K}$, quando se considera efeito de transferência de calor por radiação.

O componente de fluxo de calor radiativo líquido por unidade de superfície é calculada por:

$$\dot{h}_{net,r} = \Phi \cdot \varepsilon_f \cdot \varepsilon_m \cdot \sigma \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.3)$$

onde:

Φ – é o fator de configuração;

- ε_m – é a emissividade da superfície do membro ;
- ε_f – é a emissividade do fogo;
- σ – é a constante de Boltzmann Stephan ($=5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$);
- θ_r – é a temperatura de radiação efetiva do ambiente fogo [$^{\circ}\text{C}$];
- θ_m – é a temperatura da superfície do elemento [$^{\circ}\text{C}$].

Os valores da emissividade do elemento e o fogo deve ser escolhido pelo projetista conforme o caso, e pode ser tomado em situações ordinárias, $\varepsilon_m = 0.7$ para aço, $\varepsilon_m = 0.8$ aço inoxidável e para $\varepsilon_f = 1.0$. Normalmente, a parte do Eurocódigo respeitante ao fogo dá-nos os valores da emissividade para os diferentes materiais.

O fator de configuração (Φ) é um parâmetro geométrico que prevê o tamanho e a posição relativa entre a fonte de emissão e o elemento sensor. Na consideração de $\Phi = 1$ assume-se que toda a energia que é liberada na forma de radiação abrange o elemento exposto, o que não é uma situação muito realista.

Como um incêndio progride e a carga de incêndio está a ser consumida, a densidade de fluxo de calor que aborda os vários elementos pode variar. O mesmo não se verifica para as temperaturas e os gases no compartimento onde todos os outros parâmetros podem ser considerados constantes.

3.2.1. Curvas nominais de incêndio

As curvas nominais de incêndio são utilizadas para determinar a evolução de temperaturas no interior de um compartimento. Designam-se por “incêndios nominais” aqueles que se assumem idênticos qualquer que seja o tamanho ou desenho do edifício e que podem ser expressos por uma fórmula simples. O fogo padrão ISO 834, o fogo externo (exclusivo para paredes exteriores) e o de hidrocarbonetos são considerados os principais incêndios nominais e são utilizados para verificar o nível de resistência ao fogo e o cumprimento dos requisitos nacionais ou outros, relacionados com a resistência ao fogo.

3.2.1.1. Curva temperatura – tempo padrão

A curva de incêndio padrão para além de ser a mais conhecida, é também a mais utilizada para prever as temperaturas de incêndio num compartimento. Empregando esta curva, assume-se que a temperatura de um compartimento de incêndio é uniforme e que aumenta indefinidamente de acordo com uma relação logarítmica com o tempo.

A EN 1991-1-2 (2002) dá-nos a temperatura do gás (θ) em °C, ao longo do tempo t em minutos, através da expressão 3.4. Foi no início do século 20, através de derivações de medições de testes, que se descobriu esta forma de relação temperatura-tempo e desde então tem-se demonstrado que existe uma semelhança muito limitada para as temperaturas em compartimentos de fogos reais. Adequa-se a materiais celulósicos.

$$\theta_g = 20 + 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3.4)$$

Onde:

θ_g – é a temperatura do gás no compartimento de fogo [°C];

t – é o tempo [min].

A curva padrão de fogo ISO 834, usa-se em ensaios experimentais de fornalha, para determinar a resistência ao fogo de elementos estruturais. Embora a semelhança com a realidade seja limitada, usa-se esta curva para padronizar os processos térmicos utilizados nos testes de forno, permitindo a comparação de resultados experimentais de resistência ao fogo alcançado em vários laboratórios de diversos países. Utilizando esta curva para determinar a evolução das temperaturas dentro do compartimento, deve ser adotado para o coeficiente de transferência de calor por convecção o valor $\alpha_c = 25 \text{ W / m}^2\text{K}$, no cálculo da densidade de fluxo de calor.

3.2.1.2. Curva de incêndio exterior

Esta curva é para ser usada para a superfície exterior das paredes que estão expostas ao fogo, a partir de diferentes partes da fachada.

$$\theta_g = 660 \cdot (1 - 0,687 \cdot e^{-0,32t} - 0,313 \cdot e^{-3,8t}) + 20 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3.5)$$

onde:

θ_g – é a temperatura do gás perto do ambiente [°C];

t – é o tempo [min].

Aplica-se a elementos que não estão em contacto direto com o fogo e para temperaturas inferiores às determinadas para a curva padrão de fogo, para o mesmo instante. Neste caso, para o coeficiente de transferência de calor por convecção deve ser tomado $\alpha_c = 25 \text{ W / m}^2\text{K}$.

3.2.1.3. Curva de hidrocarbonetos

Apesar de se ter utilizado a curva padrão durante muitos anos, tornou-se evidente que certos materiais apresentavam taxas de queima excessivas, como por exemplo: o petróleo, gás e produtos químicos. Visto que surgiu a necessidade de uma alternativa de exposição para efeitos de realização de testes em estruturas e materiais utilizados na indústria petroquímica, desenvolveu-se, então, a curva de hidrocarbonetos. Aplica-se esta curva em situações onde possam ocorrer pequenos incêndios de petróleo.

Esta curva é aplicável quando pequenos incêndios de petróleo poderão ocorrer em determinados ambientes específicos, ou seja, combustível de automóveis, tanques, gasolina ou tanques petroleiros, etc.

$$\theta_g = 1080 \cdot (1 - 0,325 \cdot e^{-0,167t} - 0,675 \cdot e^{-2,5t}) + 20 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3.6)$$

Onde:

θ_g - é a temperatura do gás no compartimento do fogo [$^{\circ}\text{C}$];

t - é o tempo [min].

Esta curva é mais agravante que as já referidas, como se observa na Figura 3.1. Neste caso, para o coeficiente de transferência de calor por convecção deverá ser tomado o valor $\alpha c = 50 \text{ W / m}^2\text{K}$.

3.2.1.4. Curva RABT ZTV

A curva RABT foi desenvolvida na Alemanha. Nesta observa-se que a elevação de temperatura é muito acentuada até 1200°C , num período de tempo de 5 minutos. A duração da exposição a 1200°C é inferior às outras curvas com a temperatura a descer a partir dos 30 minutos para incêndios de automóveis. Não existe qualquer exigência para uma temperatura máxima de interface. Esta curva é aplicável a incêndios em túneis.

3.2.1.5. Curva RWS (Rijkswaterstaat)

A curva RWS foi desenvolvida pelo Rijkswaterstaat, Ministério dos Transportes na Holanda. Esta curva referência a pior das hipóteses de um incêndio de um petroleiro com 50m^3 combustível, óleo ou gasolina com uma carga de incêndio de 300MW , com a duração de 120 minutos. RWS simula o crescimento rápido inicial de um incêndio com um navio-tanque de petróleo como a fonte, e a queda gradual da temperatura por se esperar que a carga de combustível seja queimada. Os critérios de falha para amostras expostas a RWS curva

temperatura/tempo é que a temperatura da interface entre o betão e o revestimento de proteção de incêndio não deve exceder 380°C e a temperatura sobre o reforço não deverá ultrapassar os 250°C. Aplicável para túneis.

As curvas de temperatura-tempo nominais anteriormente descritas são representadas no gráfico seguinte.

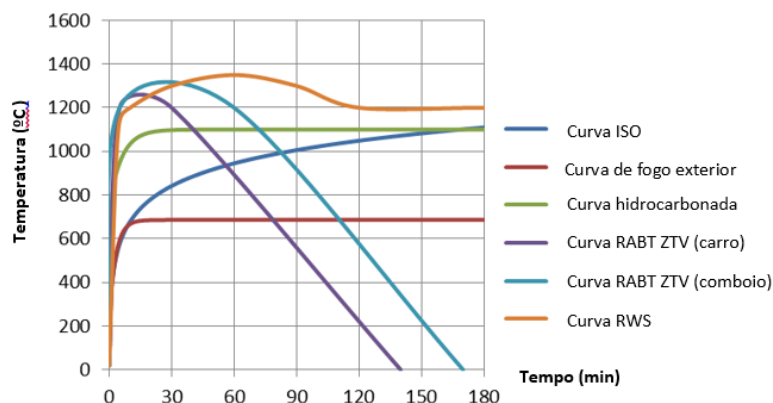


Figura 3.1: Curvas nominais tempo-temperatura

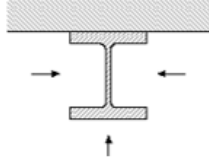
3.2.2. Cálculo das temperaturas nos elementos de aço pela EN 1993-1-2

Geralmente, os métodos simplificados para o cálculo da temperatura de elementos estruturais de aço expostas ao fogo baseiam-se numa temperatura uniformemente distribuída através da seção transversal e ao longo da estrutura durante o tempo de exposição ao fogo. Existem certos tipos de estruturas de aço que, durante um ensaio de resistência ao fogo, apresentam uma considerável variação de temperatura ao longo da secção transversal e longitudinal. Um método de cálculo simplificado, que ignora esta influência, sugere maior subavaliação da resistência ao fogo em relação ao resultado correspondente obtido num teste de resistência ao fogo. Portanto, são necessários métodos alternativos de correção para a obtenção de uma melhor concordância entre as abordagens analíticas e experimentais.

A taxa de aquecimento de um elemento de aço influencia bastante a sua resistência ao fogo. Uma seção maciça que aquece lentamente tem maior resistência ao fogo do que uma seção delgada que aquece mais rapidamente. A influência da solidez do perfil é considerada na norma EN 1993-1-2 (2005) pelo "Fator de massividade" (Figura 3.2).

Secção aberta aquecida em 3 lados

$$\frac{A_m}{V} = \frac{\text{Superfície exposta ao fogo}}{\text{Área da secção transversal}}$$



Banzo da secção-I exposto ao fogo em 3

$$\frac{A_m}{V} = \frac{(b + 2tf)}{(btf)} \text{ se } t \ll b: \frac{A_m}{V} = \frac{1}{tf}$$

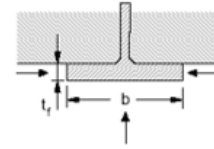


Figura 3.2: Fatores de massividade de acordo com EN 1993-1-2 (2005)

$$\text{Fator de massividade} = \frac{A_m}{V} \tag{3.7}$$

Onde:

A_m - é a área da superfície lateral do perfil de aço exposto ao fogo (m²);

V - é o volume do elemento exposto ao fogo (m).

Para uma distribuição uniforme da temperatura equivalente na secção transversal, o aumento de temperatura num elemento de aço desprotegido durante um intervalo de tempo é determinado pela seguinte expressão, a partir de EN1993-1-2 (2005):

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \cdot \frac{A_m/V}{c_a \cdot \rho_a} \cdot h_{net,d} \cdot \Delta t \tag{3.8}$$

Onde:

K_{sh} - é o fator de correção para o efeito de sombra;

A_m/V - é o fator secção para membros de aço não protegidos;

c_a - é o calor específico do aço (J/Kg.K);

$h_{net,d}$ - é o valor de cálculo do fluxo de calor líquido (W/m²);

Δt - é o intervalo de tempo (segundos);

Δ_a - é a unidade de massa de aço (Kg/m³).

Para secções-I em ações nominais de fogo o fator de correção para o efeito de sombra pode ser determinada a partir de:

$$K_{sh} = 0.9 \left[\frac{A_m}{V} \right]_b / \left[\frac{A_m}{V} \right] \tag{3.9}$$

onde $\left[\frac{A_m}{V} \right]_b$ é o valor da box do fator seção.

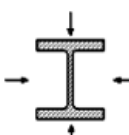
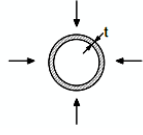
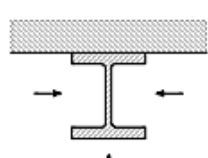
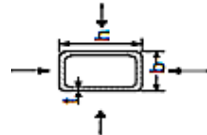
Em todos os outros casos:

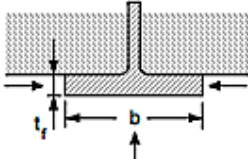
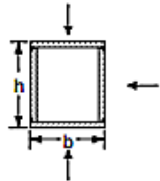
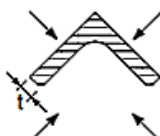
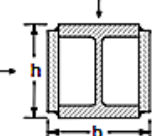
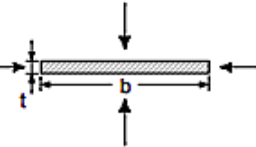
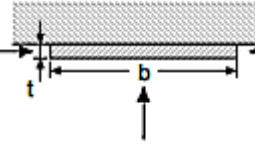
$$K_{sh} = \left[\frac{A_m}{V} \right]_b / \left[\frac{A_m}{V} \right] \quad (3.10)$$

Para as secções transversais com uma forma convexa totalmente envolvidas pelo fogo, o efeito de sombra não desempenha papel importante, consequentemente, o fator ksh de correção pode ser considerado igual à unidade. O efeito de sombra é devido à transferência de radiação entre as áreas de superfície durante a transferência de calor. A quantificação do efeito de sombra é possível usando um fator de configuração Φ . Este fator é a razão entre a radiação de calor que atinge uma superfície de receção e o calor por radiação total deixando uma outra superfície. O seu valor depende do tamanho da superfície de radiação sobre a distância, a partir da superfície radiante para a superfície de receção e da sua orientação relativa. Os métodos de cálculo do fator de configuração são dados na EN 1993-1-2 (2005).

O Eurocódigo 3 – parte 1.2 (EN 1993-1-2:2010) e a norma NBR 14323:1999 fornecem uma tabela para o cálculo do fator de forma ou fator de massividade, em diferentes secções, para várias situações, não cobrindo contudo todas as situações possíveis de elementos estruturais parcialmente expostos à ação do incêndio. De seguida apresenta-se a tabela já referida.

Quadro 3.1: Fator de massividade A_m/V para elementos de aço não protegidos, Eurocódigo 3 – parte 1.2 (EN 1993-1-2:2010)

<p>Secção aberta exposta ao fogo em todos os lados:</p> $\frac{A_m}{V} = \frac{\text{perímetro}}{\text{área da secção transversal}}$ 	<p>Tubo exposto ao fogo em todos os lados:</p> $A_m/V = l/t$ 
<p>Secção aberta exposta ao fogo em três lados:</p> $\frac{A_m}{V} = \frac{\text{superfície exposta ao fogo}}{\text{área da secção transversal}}$ 	<p>Secção tubular (ou secção em caixão soldada de espessura uniforme) exposta ao fogo em todos os lados:</p> <p>Se $t \ll b$: $A_m/V \approx l/t$</p> 

<p>Banzo de secção em I exposta ao fogo em três lados:</p> $A_m/V = (b + 2t_f) / (bt_f)$ <p>Se $t \ll b$: $A_m/V \approx 1/t_f$</p> 	<p>Secção em caixão soldada exposta ao fogo em todos os lados:</p> $\frac{A_m}{V} = \frac{2(b+h)}{\text{área da secção transversal}}$ <p>Se $t \ll b$: $A_m/V \approx 1/t$</p> 
<p>Cantoneira exposta ao fogo em todos os lados:</p> $A_m/V = 2/t$ 	<p>Secção I com reforço em caixão, exposta ao fogo em todos os lados:</p> $\frac{A_m}{V} = \frac{2(b+h)}{\text{área da secção transversal}}$ 
<p>Barra plana exposta ao fogo em todos os lados:</p> $A_m/V = 2(b+t) / (bt)$ <p>Se $t \ll b$: $A_m/V \approx 2/t$</p> 	<p>Barra plana exposta ao fogo em três lados:</p> $A_m/V = (b + 2t) / (bt)$ <p>Se $t \ll b$: $A_m/V \approx 1/t$</p> 

3.3. Propriedades dos materiais

3.3.1. Propriedades térmicas

3.3.1.1. Aço

O alongamento térmico $\Delta l/l$, e o calor específico do aço c_a , são definidas na norma EN 1993-1-2 (2005), de acordo com os gráficos seguintes.

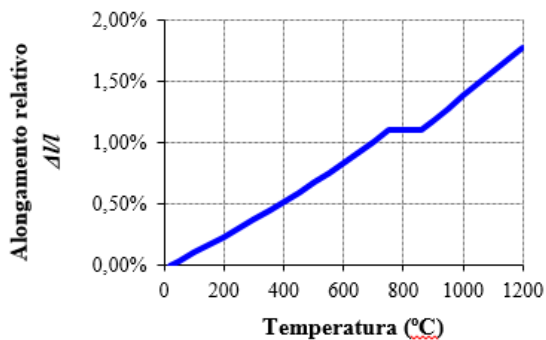


Figura 3.3: Alongamento relativo do aço carbónico em função da temperatura, EN 1993-1-2 (2005)

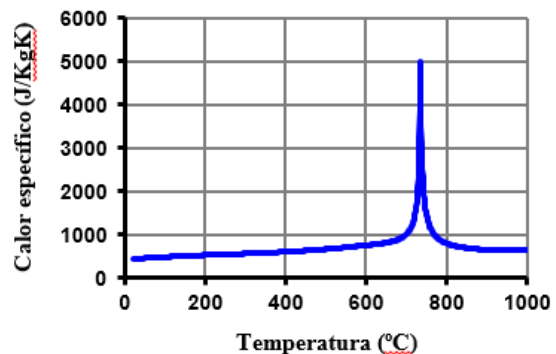


Figura 3.4: Calor específico do aço carbónico em função da temperatura, EN 1993-1-2 (2005)

A condutividade térmica do aço carbónico (λ_a) em função da temperatura é ilustrada no gráfico seguinte:

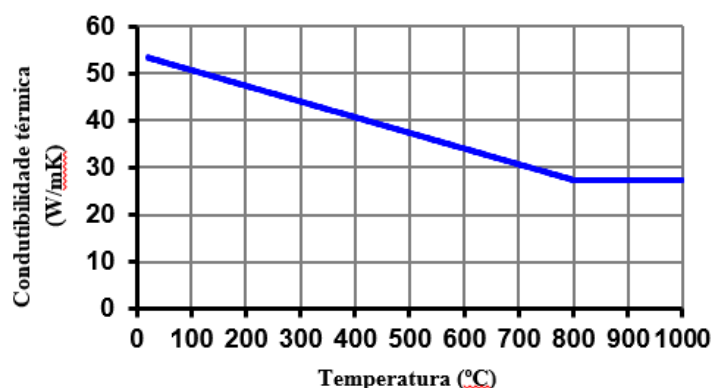


Figura 3.5: Condutividade térmica do aço carbónico em função da temperatura, EN 1993-1-2 (2005)

3.3.1.2. Betão

Tal como o aço, quando o betão é sujeito à temperatura uniforme, este expande ou contrai, em função do diferencial térmico aplicado. De acordo com a norma EN 1992-1-2 (2004), o alongamento térmico do betão varia com a temperatura, de acordo com o tipo de composição dos agregados.

Este parâmetro tem um interesse particular no estudo de elementos com a restrição térmica, pois influencia os valores das forças de restrição que são gerados durante o aquecimento.

Quando o teor de humidade não é considerado explicitamente no método de cálculo, a função pode ser modelada por um valor constante.

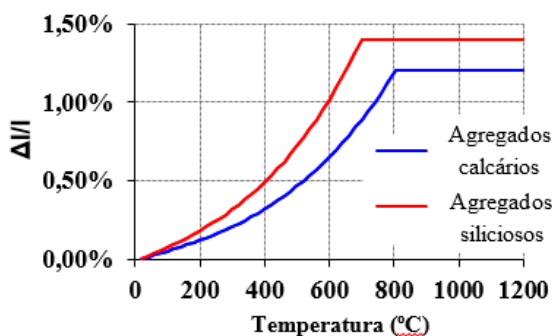


Figura 3.6: Alongamento térmico de agregados calcários e siliciosos em função da temperatura, EN 1992-1-2 (2004)

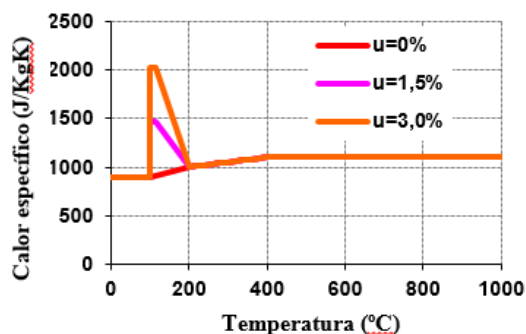


Figura 3.7: Calor específico do betão em função da temperatura, EN 1992-1-2 (2004)

O calor específico de betão, C_c , pode ser definido como a energia necessária para elevar um grau Celsius ou grau Kelvin a temperatura de uma unidade de massa de betão, sem mudança de estado, a uma temperatura definida (figura 3.7).

A condutividade térmica do betão em função da temperatura, de acordo com a norma EN 1992-1-2 (2004), está representada na figura 3.8.

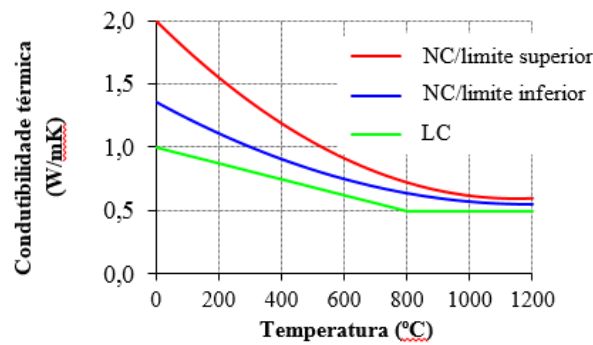


Figura 3.8: Condutividade térmica do betão em função da temperatura, EN 1992-1-2 (2004)

3.3.2. Propriedades mecânicas

3.3.1.3. Aço

A relação tensão-deformação dada na figura 3.9, deve ser usada para determinar a resistência de elementos estruturais de aço de tração, em compressão, flexão e cisalhamento. Neste gráfico observam-se quatro zonas distintas. A primeira zona, onde surge representada a lei de Hooke, é limitada pela tensão limite proporcional. A segunda zona é definida por uma curva elíptica, limitada pelo limite de elasticidade aparente correspondente ao início de rendimento. Na terceira zona, a tensão é constante e igual ao limite de elasticidade aparente, que corresponde à zona plástica. A última zona é caracterizada por uma diminuição linear da tensão de cedência.

Os fatores de redução da relação tensão-deformação são ilustrados na figura 3.9. Para valores intermédios de temperatura, podemos usar uma interpolação linear.

$$\text{- Tensão de cedência em relação à tensão de cedência aos } 20\text{ }^{\circ}\text{C} \quad k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y \quad (3.11)$$

$$\text{- Limite proporcional em relação à tensão de cedência aos } 20\text{ }^{\circ}\text{C} \quad k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y \quad (3.12)$$

$$\text{- Módulo de elasticidade elástico em relação ao módulo de elasticidade elástico aos } 20\text{ }^{\circ}\text{C} \\ k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a \quad (3.13)$$

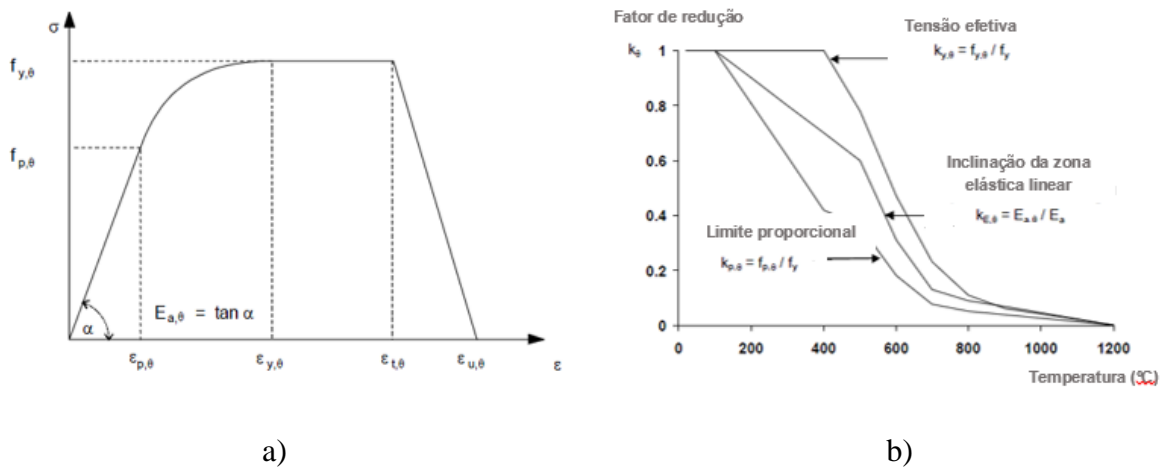


Figura 3.9: Relação tensão – deformação para o aço de carbono, a elevadas temperaturas, EN 1993-1-2 (2005) a) Fatores de redução para a relação tensão-deformação do aço de carbono, a elevadas temperaturas, EN 1993-1-2 (2005) b)

Na figura 3.9 b), verifica-se que o fator de redução, $k_{y,\theta}$, sofre uma diminuição repentina, assim que atinge a temperatura de 400°C. O limite proporcional à deformação é reduzido pelo fator $k_{p,\theta}$, e diminui subitamente a partir da temperatura de 100 °C. O módulo de Young é reduzido pelo fator de redução de $k_{E,\theta}$. Este fator também sofre uma redução desde os 100°C, uma vez que está relacionada com a tensão limite proporcional.

O quadro que se segue define a forma da relação tensão-deformação para o aço de carbono, a temperaturas elevadas, tal como definido na norma EN 1993-1-2 (2005).

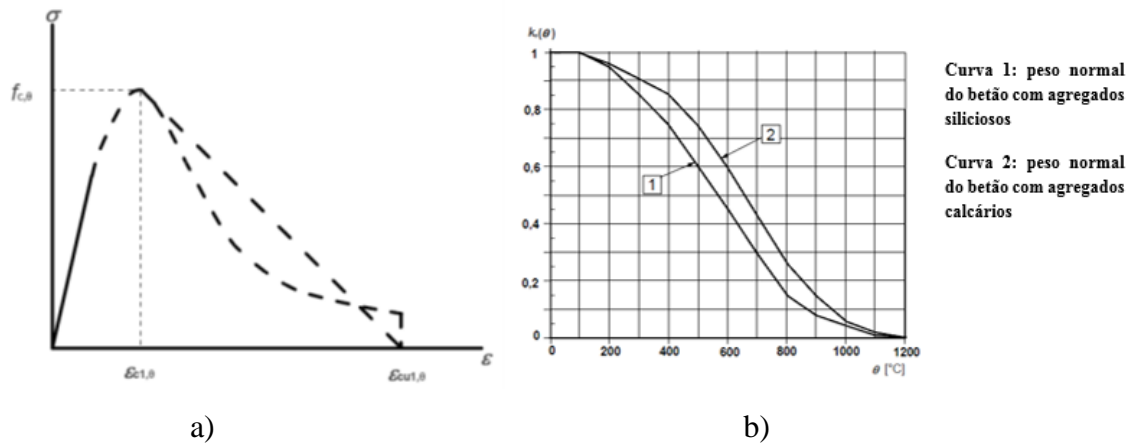
Quadro 3.2: Relação de tensão-deformação para aço de carbono a temperaturas elevadas EN 1993/01/02 (2005)

Varição deformação, ε	Tensão, $\sigma(\theta)$	Módulo tangente
$\varepsilon \leq \varepsilon_{sp,\theta}$	$\varepsilon \cdot E_{s,\theta}$	$E_{s,\theta}$
$\varepsilon_{sp,\theta} < \varepsilon \leq \varepsilon_{sy,\theta}$	$f_{sp,\theta} - c + (b/a) \left[a^2 - (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon)^2 \right]^{0,5}$	$\frac{b(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon)}{a \left[a^2 - (\varepsilon - \varepsilon_{sy,\theta})^2 \right]^{0,5}}$
$\varepsilon_{sy,\theta} < \varepsilon \leq \varepsilon_{st,\theta}$	$f_{sy,\theta}$	0
$\varepsilon_{st,\theta} < \varepsilon \leq \varepsilon_{su,\theta}$	$f_{sy,\theta} \left[1 - (\varepsilon - \varepsilon_{st,\theta}) / (\varepsilon_{su,\theta} - \varepsilon_{st,\theta}) \right]$	--
$\varepsilon = \varepsilon_{su,\theta}$	0	--
Parâmetros	$\varepsilon_{sp,\theta} = f_{sp,\theta} / E_{s,\theta}$ $\varepsilon_{sy,\theta} = 0,02$ $\varepsilon_{st,\theta} = 0,15$ $\varepsilon_{su,\theta} = 0,20$	
Funções	$a^2 = (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta}) (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta} + c / E_{s,\theta})$ $b^2 = c (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta}) E_{s,\theta} + c^2$ $c = \frac{(f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})^2}{(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta}) E_{s,\theta} - 2(f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})}$	

3.3.1.4. Betão

A relação de tensão-deformação para o betão de auto - compactação unidimensional em função da temperatura é definido na norma EN 1992-1-2 (2004) (figura 3.10).

A EN 1992-1-2 (2004) permite a consideração de uma abordagem conservadora ignorando a resistência à tração do betão. Em métodos de cálculo simplificados ou avançados, a resistência à tração do betão deve ser afetada por um fator de redução em função da temperatura. Considera-se que até 100°C do betão mantém a resistência à tração à temperatura ambiente e depois tende a diminuir para zero aos 60.



a) b)
 Figura 3.10: Relação tensão-deformação do betão, EN 1992-1-2 (2004) a) Coeficiente de redução de resistência característico do betão, EN1992-1-2 (2004) b)

4. MODELAÇÃO DE PILARES INSERIDOS EM PAREDES COM ELEMENTOS FINITOS – ABAQUS

4.1. Introdução

Os problemas físicos são expostos por modelos matemáticos. Contudo, nem todos os casos possuem uma solução analítica e existe necessidade de se aplicarem aproximações numéricas para obter uma resposta aproximada do modelo. Uma dessas técnicas é a aproximação numérica pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), procedimento adotado neste trabalho. As simulações numéricas têm como objetivo diminuir incoerências entre situações idealizadas e reais, ou seja, representam os fenômenos reais com a maior exatidão possível.

A modelação de pilares inseridos em paredes apresenta alguma complexidade, nomeadamente no que respeita: ao fendilhamento do betão, “spalling” (fragmentos/lascas de betão), encurvadura do pilar de aço, a caracterização da interação entre superfícies de aço e betão e ainda a questão da soldadura entre os perfis e os estribos.

Neste estudo, foram utilizadas diversas simulações sobre a resistência ao fogo em pilares de aço, com modelação de elementos finitos no programa ABAQUS. Construído o modelo, diversificaram-se os diferentes parâmetros, e assim, avaliou-se a influência de cada parâmetro no comportamento global dos pilares submetidos ao fogo, neste caso, particularmente relativos à geometria das paredes, e dimensões da seção transversal.

Neste capítulo descreve-se o programa ABAQUS e suas funcionalidades, com as quais foi possível a realização de todos os modelos numéricos. Todas as soluções e opções relativas aos modelos numéricos serão devidamente descritas e justificadas.

4.2. Modelação com ABAQUS

4.2.1. Introdução

Para o cálculo da resistência ao fogo de determinada estrutura podem ser utilizados os métodos analíticos clássicos, como por exemplo o uso dos Eurocódigos. Porém, estas soluções não se usam na maioria das aplicações práticas tornando-se necessário o desenvolvimento de metodologias mais rigorosas, que se pudessem aplicar a uma realidade de engenharia mais específica e exigente. Assim, surge o MEF – Método dos Elementos Finitos.

Este sistema tem diversas aplicações nas áreas de Engenharia, Física e Matemática, tais como: análise das estruturas, estudo das vibrações, transferência de calor, ondas eletromagnéticas, etc.

Surge como um método rigoroso para o cálculo de sistemas contínuos que se subdividem em elementos, isto é, num número finito de partes. Estes elementos, por sua vez, conetam-se entre si por intermédio de pontos discretos, que se designam por nós. À subdivisão da estrutura em elementos chamamos malha. A fragmentação provoca um número elevado de equações algébricas, que são geradas e resolvidas com o auxílio de computadores digitais, podendo utilizar procedimentos padrões aplicáveis aos sistemas discretos. Apesar de existirem alguns programas comerciais de elementos finitos, foi escolhido o “software” ABAQUS – versão 6.3 (Hibbitt, Karlsson & Sorensen, 2001) para efetuar as simulações numéricas do presente estudo.

O ABAQUS consiste, essencialmente, em duas partes: gráfica (ABAQUS/CAE e ABAQUS/Viewer) e solver (ABAQUS/Standard e ABAQUS/Explicit). O ABAQUS/CAE é pré e pós-processador. O pré-processador gera o arquivo de entrada de dados que contém a geometria, propriedades do material, condições de fronteira, carregamento aplicado e a malha de elementos finitos definidos pelo usuário. O programa ainda permite que o arquivo de entrada de dados seja alterado manualmente pelo usuário. O pós-processador, ABAQUS/CAE, possibilita a visualização gráfica dos resultados. O ABAQUS/Viewer funciona exclusivamente como pós-processador. O ABAQUS/Standard e o ABAQUS/Explicit simulam computacionalmente carregamentos estáticos e dinâmicos, respetivamente.

4.2.1.1. ABAQUS/CAE

O ABAQUS/CAE (Complete Abaqus Environment) tem como função desenvolver as análises pretendidas, o ABAQUS/Standard e ABAQUS/Explicit são responsáveis pelo cálculo das simulações com o método dos elementos finitos (finite element method, ou FEM).

Este incorpora funcionalidades informáticas de engenharia comuns, como modelação paramétrica ou baseada em características, funcionamento predefinido ou interativo, e personalização da interface. Para definir a malha de elementos finitos ou solicitar a atribuição de uma malha com base na geometria pretendida podemos importar modelos de CAD.

Esta vertente gráfica está organizada por módulos com desenvolvimento do ficheiro *.cae*. Posto isto, gera outro ficheiro que corresponde à tarefa de análise que se pretende submeter às unidades seguintes. Esta interface também permite monitorizar, diagnosticar e visualizar os resultados do cálculo. Para efeitos de pré e pós-processamento, o ABAQUS/Standard e o ABAQUS/Explicit baseiam-se ambos na interface do ABAQUS/CAE.

4.2.1.2. ABAQUS/Standard

O ABAQUS/*Standard* é ideal para o cálculo de situações estáticas ou dinâmicas a baixas

velocidades, em que a exatidão dos resultados é bastante significativa. Com uma única simulação, é possível analisar um modelo nos domínios do tempo e da frequência.

4.2.1.3. ABAQUS/Explicit

O *ABAQUS/Explicit* está especialmente adaptado para simular acontecimentos dinâmicos muito breves, como queda de aparelhos eletrônicos, acidentes de automóvel ou impacto balístico. A capacidade para analisar comportamentos altamente não lineares torna esta unidade também muito útil na simulação de processos quase estáticos, como por exemplo a laminação a quente de metais.

Os resultados de um modelo corrido no *ABAQUS/Standard* podem ser utilizados como a condição inicial de uma análise a executar no *ABAQUS/Explicit*, e vice-versa. A flexibilidade garantida com esta integração permite aplicar o *ABAQUS/Standard* nas fases que se adequam a uma resolução por métodos implícitos (análises estáticas, a baixas velocidades, ou em regime permanente), e o *ABAQUS/Explicit* nas restantes (altas velocidades ou regime variável).

4.2.2. Modelos Numéricos

Foi construído um modelo numérico com elementos sólidos a partir da biblioteca de elementos finitos do programa utilizado. Nestas simulações numéricas foram escolhidos os elementos C3D20RT e C3D8RT. O primeiro destina-se aos pilares em perfis de aço usados e o outro utiliza-se na estrutura circundante, isto é, nas paredes. Estes são elementos definidos como hexaédricos com 8 e 20 nós, lineares e com integração reduzida de primeira ordem. Estes elementos têm um ponto de integração com três graus de liberdade por cada nó correspondendo às traslações e rotações nas direções X,Y,Z que criam seis componentes de tensão em cada elemento de saída.

A malha de elementos finitos foi gerada automaticamente pelo ABAQUS e o lado dos elementos finitos têm 50 mm de espessura em paredes e 20 mm nos pilares.

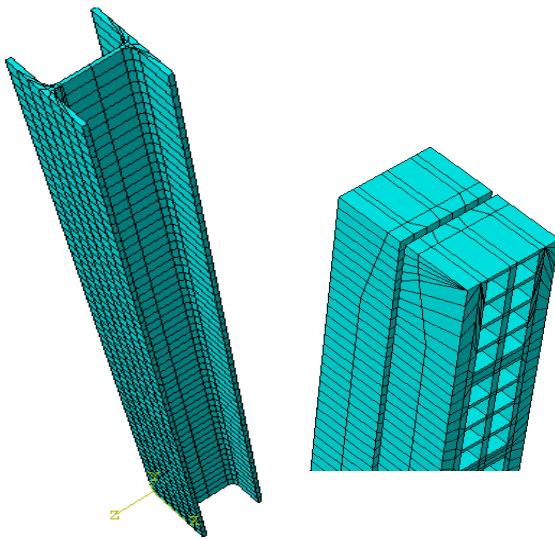


Figura 4.1: Visualização da malha de elementos finitos do pilar e das paredes

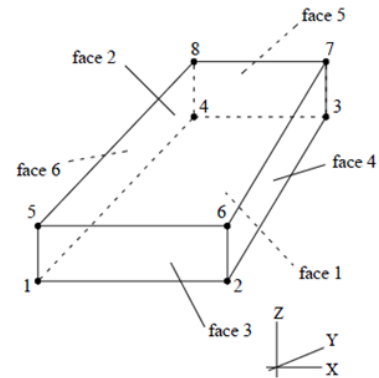


Figura 4.2: Detalhe do elemento finito C3D8RT

Para obter uma simulação próxima da realidade definiram-se as propriedades térmicas e mecânicas a elevadas temperaturas do betão e aço de acordo com EN 1992-1-2 (2004) e EN 1993-1-2 (2005), respetivamente. Para a alvenaria/tijolos não foram consideradas propriedades com variação em função da temperatura devido a falta de dados disponíveis na literatura da especialidade. Foram adotados valores usados no *Ozone software* da Universidade de Liège (Candorin, 2003).

A fim de executar uma análise não linear das curvas de tensão-deformação dos materiais, estes foram convertidos para a lei da tensão-deformação logarítmica. As propriedades dos materiais usados estão definidas nas partes sobre o fogo dos Eurocódigos.

No lado não exposto ao fogo, o coeficiente de convecção usado foi de $4 \text{ Wm}^2/\text{°C}$ e o coeficiente de emissividade foi de 0.7 para o betão e de 0.8 para o aço. Do lado exposto ao fogo o coeficiente de convecção foi de $25 \text{ Wm}^2/\text{°C}$ e a emissividade de 0.7 em ambos os materiais.

Os casos estudados na simulação numérica e os testes correspondentes á resistência ao fogo são descritos no quadro 4.1.

Foram consideradas duas orientações diferentes do perfil em relação á superfície: alma paralela e alma perpendicular à superfície das paredes. A razão para esta escolha deve-se aos diferentes comportamentos esperados, atendendo a que nos dois casos diferentes, a flexão ocorreu em torno do eixo fraco ou forte das secções transversais (cruzamento), ou seja, sempre no plano perpendicular ao plano da parede.

No quadro 4.1 são referidos os pilares inseridos nas paredes para a análise estrutural do comportamento do fogo dos mesmos:

Quadro 4.1: Casos de estudo dos pilares inseridos em paredes

PERFIS PAREDE 7 CM		PERFIS PAREDE 15 CM	
Alma paralela à parede	Alma perpendicular à parede	Alma paralela à parede	Alma perpendicular à parede
HD 320x127	HD 320x127	HD 320x127	HD 320x127
IPE 180	IPE 180	HE 450 AA	HE 450 AA
HE 160 A	HE 160 A	HE 450 A	HE 450 A
HE160 AA	HE160 AA	HE 450 M	HE 450 M
HE160 M	HE160 M	HP 260x52	HP 260x52
HE 450 M	HE 450 M	HP 360x152	HP 360x152
HP 360x174	HP 360x174	HP 360x174	HP 360x174
HP 250x62	HP 250x62	HP 305x79	HP 305x79
HP 360x152	HP 360x152	HP 305x110	HP 305x110
HP 305x79	HP 305x79	HP 400x194	HP 400x194
HP 400x194	HP 400x194	HP 400x231	HP 400x231
IPEA 100	IPEO 180	IPEA 400	IPEA 400
IPE 400	IPE 400	IPEA 270	IPEA 270
IPEA 180	IPEA 180	IPE 400	IPE 400
IPEO 270	IPEO 270	IPEO 270	IPEO 270
UBP 356x368x133	UBP 356x368x133	UBP 356x368x133	UBP 356x368x133
UB 254x102x28	UB 254x102x28	UB 254x102x28	UB 254x102x28
UB 406x178x54	UB 406x178x54	UB 406x178x54	UB 406x178x54
UC 254x254x107	UC 254x254x107	UC 254x254x107	UC 254x254x107
UC 356x406x551	UC 356x406x551	UC 356x406x551	UC 356x406x551
W 250x250x131	W 250x250x131	-	W 250x250x131
W 460x280x235	W 460x280x235	W 250x250x167	W 250x250x167
W 920x420x390	W 920x420x390	W 460x280x235	W 460x280x235
		W 920x420x344	W 920x420x344
		-	W 920 x 420 x390

Nos próximos parágrafos, irá ser apresentada uma breve descrição do modelo numérico com o programa comercial ABAQUS. O processo de modelação da estrutura, aplicando ações térmicas e cargas mecânicas foram realizados usando diferentes módulos do *software*.

Part Module

Uma parte é criada usando a ferramenta do módulo *Part*, à qual se chama parte nativa, cuja representação é baseada em certas características. Assim, a peça contém informação geométrica e um conjunto de regras que condicionam o comportamento da mesma. O presente módulo é usado para criar, editar e gerir as peças do modelo em questão. O ABAQUS/CAE armazena cada parte sob a forma de uma lista ordenada de dados. Os parâmetros que definem cada característica combinam-se para definir a geometria de cada peça.

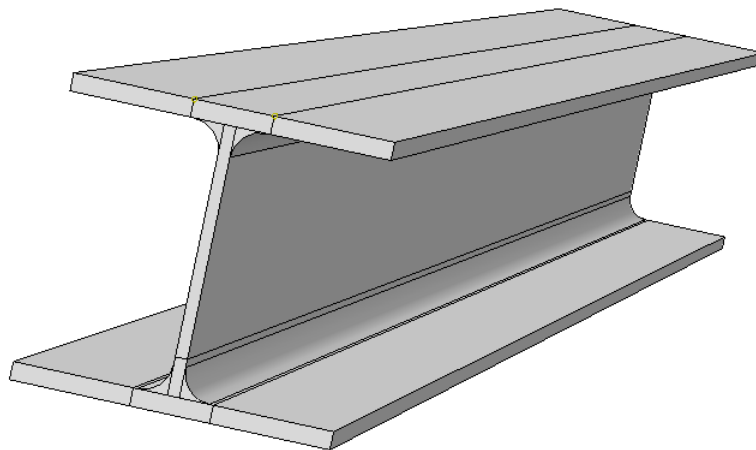


Figura 4.3: Perfil do modelo HE 160 A no módulo “*Part*”

Property Module

O módulo *Property* é usado para criar e editar materiais, definir secções, atribuir secções, orientações, normais e tangentes às peças/partes criadas no módulo anterior, definir dados dos materiais em geral, modelos de materiais mecânicos e modelos de materiais térmicos.

Assembly Module

Este módulo é usado para criar e modificar a montagem. Este contém apenas uma montagem/agrupamento de peças que é composto por partes do modelo. Quando se cria uma parte, independentemente de outras partes do modelo, esta está contida no seu próprio sistema de coordenadas, isto é, cada parte tem o seu sistema de coordenadas. O mesmo não se verifica quando passamos a tratar do módulo *assembly*, pois, com a junção das diferentes geometrias de cada parte para apenas uma, só encontramos um sistema de coordenadas global. Gera-se o conjunto de peças que serão o foco do estudo. A posição das diferentes partes é conseguida através da aplicação sequencial de restrições às posições de cada parte que alinham as faces selecionadas, arestas ou vértices ou aplicando simples translações ou rotações.

Uma instância mantém-se associada à parte original. Se a geometria das partes mudar o ABAQUS/CAE atualiza automaticamente todas as instâncias da peça. Um modelo pode conter inúmeras partes e uma parte pode ser várias vezes instâncias, contudo, um modelo contém apenas uma montagem.

As figuras 4.4 e 4.5, representam a construção de um modelo em 3D do perfil HE 160 A com a alma paralela à parede e de outro com a alma perpendicular à mesma, respetivamente.

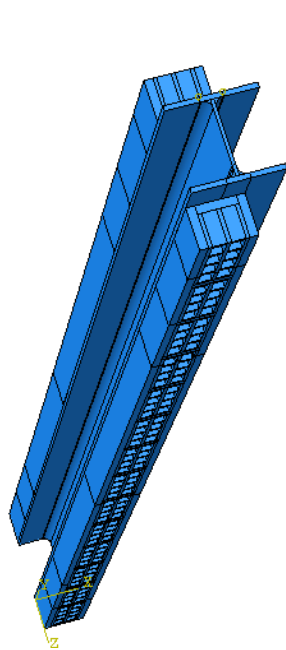


Figura 4.4: *Assembly* HE 160 A com alma paralela à parede

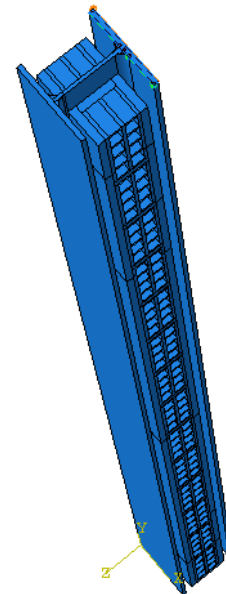


Figura 4.5: *Assembly* HE 160 A com alma perpendicular à parede

Step Module

O módulo *Step* pode ser usado para estabelecer as diversas fases da análise, especificar solicitações de saída e comandos da mesma. Dentro de um modelo podemos definir a sequência de uma ou mais fases de análise. Esta sequência fornece meios para detetar mudanças no carregamento e nas condições de fronteira do modelo, mudanças no modo com as peças interagem umas com as outras, a remoção de partes adicionais e outras alterações que poderão ocorrer durante a fase de análise. Este módulo permite ainda alterar o procedimento da análise, da saída de dados e os diversos comandos existentes.

O ABAQUS dá-nos um relatório a partir da análise dos resultados que ficará no armazenamento de dados; pode-se especificar o relatório criando um pedido de relatórios que se vão propagando para etapas de análise posteriores. Um pedido de relatório define quais as variáveis que vão ser consideradas aquando a etapa da análise, qual a região do modelo e que percentagem será utilizada.

Quando o primeiro passo é criado o ABAQUS/CAE seleciona um conjunto padrão de variáveis

que irão corresponder á etapa do procedimento de análise. Por padrão, o output é-nos solicitado por todos os nós ou pontos de integração, no modelo e pelos pontos da secção padrão. Adicionalmente, o ABAQUS /CAE determina uma percentagem padronizada em que cada variável é descrita e armazenada. Pode-se editar os outputs padronizados ou então criar e editar novos. Os padrões de saída solicitados e os dados de saída que são alterados irão ser propagados para passos subsequentes da análise.

Interaction Module

O módulo *INTERACTION* pode ser usado para definir e gerir vários objetos: interações mecânicas e termais entre regiões de um modelo ou entre a região do modelo e as suas fronteiras, restrições de análise entre regiões de um modelo, características do fio de nível de montagem, secções de ligação, e atribuição se secções de ligação para modelar ligações, inércia (ponto de massa, inércia rotacional, e resistência ao calor) nas regiões do modelo, fendas em certas regiões do modelo, molas e amortecedores entre pontos do modelo ou entre pontos do modelo e chão.

As interações são objetos dependentes das etapas, o que significa que quando são definidas temos de indicar em qual das etapas da análise eles devem estar ativos.

As figuras que se seguem representam etapas deste módulo e prendem-se com a definição das superfícies *master* e *slave* e com a demarcação do lado aquecido e o lado não aquecido do aço e do betão. A face *master* está representada a vermelho e a face *slave* a rosa.

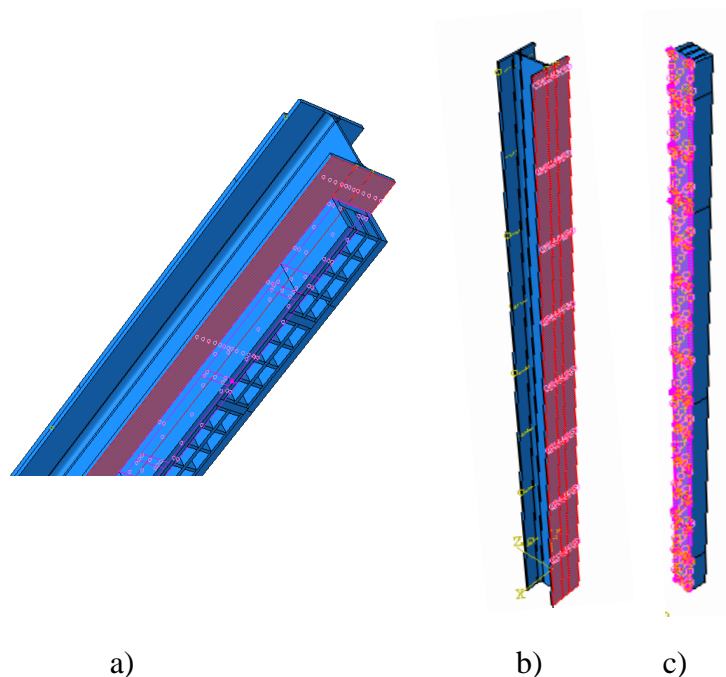


Figura 4.6: Demonstração da definição da superfície: a) *master*
b) *master* c) *slave*

Load Module

Neste módulo define-se e gere-se cargas, condições de fronteira, campos pré-definidos e situações de carga. Condições prescritas no ABAQUS/CAE são objetos dependentes das etapas definidas no módulo *step*, o que significa que temos de especificar o passo de análise que deve estar ativo. Podemos usar carga, condições de fronteira e gerir campos pré-definidos para visualização e manipulação do histórico passo-a-passo das condições prescritas. Podemos usar a ferramenta de AMPLITUDE no módulo *LOAD* para especificar tempos complexos ou dependências de frequência que podem ser aplicadas para prescrever condições.

Mesh Module

Este módulo permite-nos criar malhas em peças e efetuar montagens no ABAQUS/CAE. Vários níveis de automação e controlo estão disponíveis, portanto podemos criar uma malha que atenda às necessidades da nossa análise. Tal como acontece com a criação de peças e montagens, o processo de atribuição de malhas concede ao modelo - sementes (*seeds*), técnicas de malhas, e tipos de elementos – é um recurso baseado. Como resultado, podemos modificar os parâmetros que definem a peça ou uma montagem, e a malha de atributos que foi especificada dentro do módulo da malha são regenerados automaticamente.

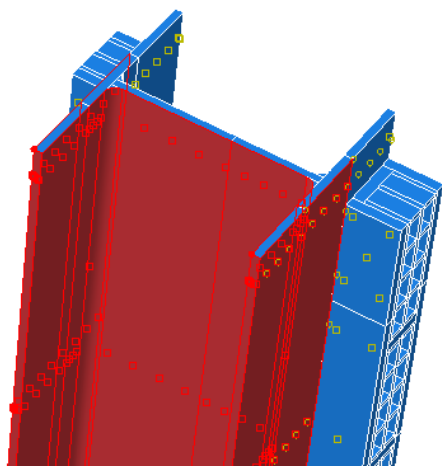


Figura 4.7: Delimitação da superfície aquecida do aço

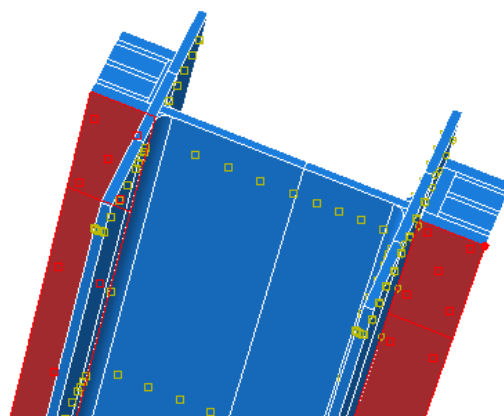


Figura 4.8: Delimitação da superfície aquecida do betão

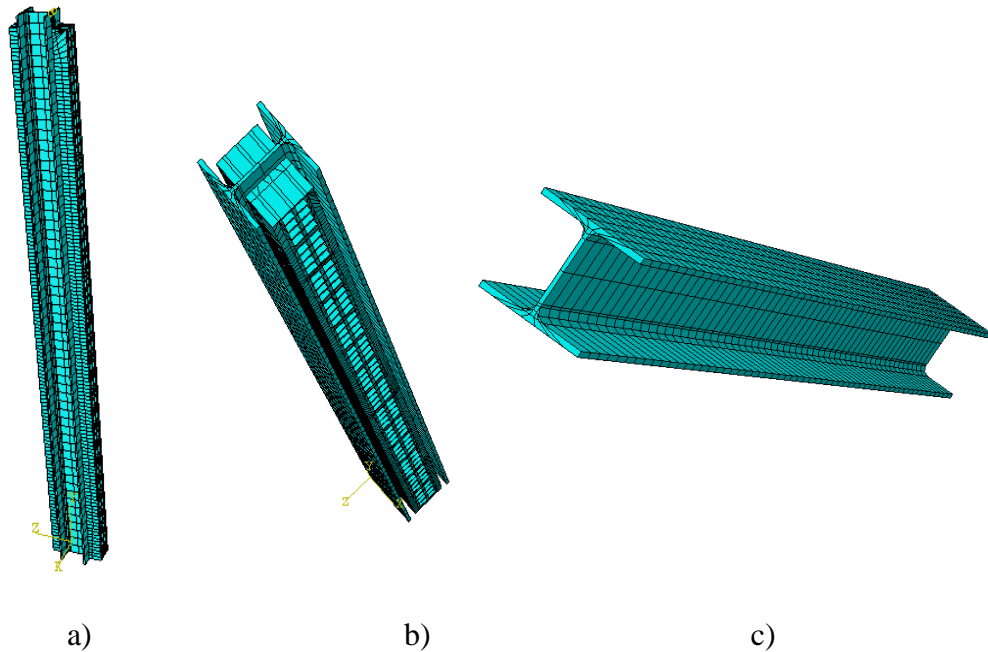


Figura 4.9: Malhas de elementos finitos: a) perfil com alma paralela á parede b) perfil com alma perpendicular á parede c) perfil

Job Module

O módulo *JOB* é usado para analisar o modelo. Este permite-nos criar um *JOB*, submetê-lo para o *ABAQUS/Standard* ou para o *ABAQUS/Explicit* e visualizar o seu progresso. É também possível criar modelos múltiplos, trabalha-los, corre-los e visualizar o seu progresso simultaneamente.

Se o modelo contiver *STEPS* múltiplos, nós não temos de analisar todas as etapas num único trabalho de análise. De facto, é muitas vezes desejável para executar uma análise complexa de fases. Isto permite-nos examinar os resultados e confirmar se a análise está funcionando conforme o esperado antes de prosseguir para a próxima etapa. Os ficheiros de reiniciação gerados por uma análise do *ABAQUS*, permitem continuar a partir de uma etapa específica

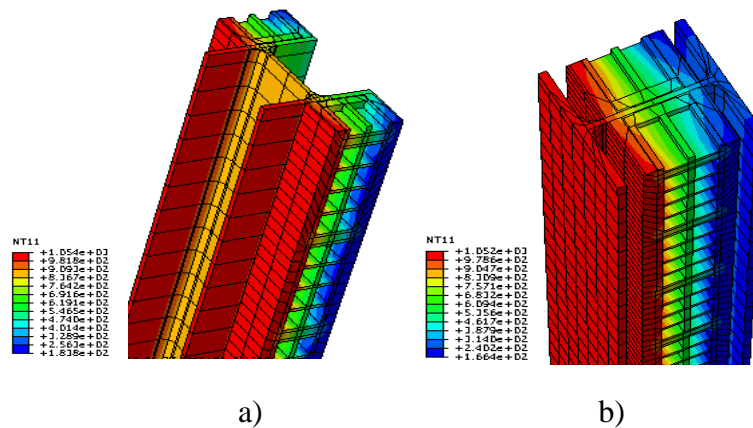


Figura 4.10: Visualização de resultados das simulações numéricas do perfil HE 160 A: a) alma paralela á parede b) alma perpendicular á parede

4.2.3. Elementos Finitos, Malha, Interações; Ações Térmicas

As figuras abaixo exibidas são exemplos de modelo numérico usado na análise de elementos finitos do comportamento de pilares de aço inseridos em paredes quando a existência de fogo. Com estas visualiza-se também a forma como foram selecionadas as superfícies que foram analisadas para a retirada das temperaturas dos modelos, isto é, os resultados térmicos, na alma e nos banzos, do lado aquecido e não aquecido. Para a representação usou-se o perfil HE 160 A, parede de 7cm com a alma paralela á parede. Neste caso, como nos restantes em que a alma se encontra paralela á parede, os banzos passam a designar-se por meio banzo visto que a parede cria uma espécie de proteção ao fogo e divide os banzos pela sua “metade”. Então, referimos meio banzo aquecido e meio banzo não aquecido. O mesmo não é aplicável para situações em que o perfil se encontra perpendicular á parede.

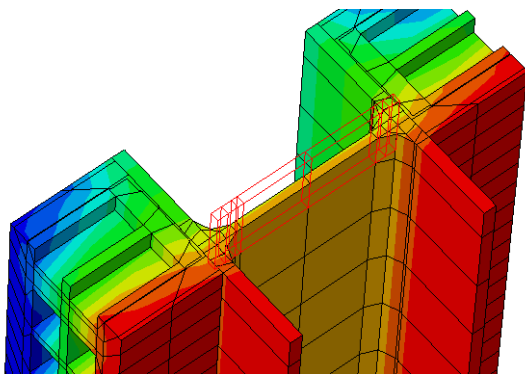


Figura 4.11: Visualização do método de obtenção de temperaturas na alma.

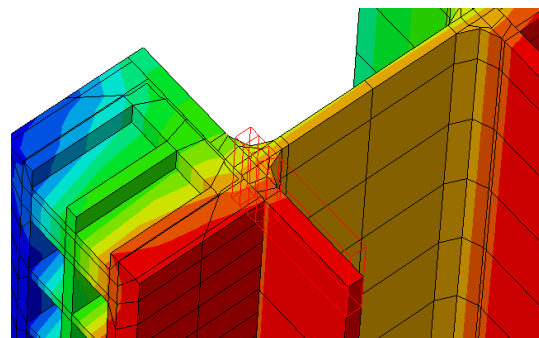


Figura 4.12: Visualização do método de obtenção de temperaturas no meio banzo aquecido.

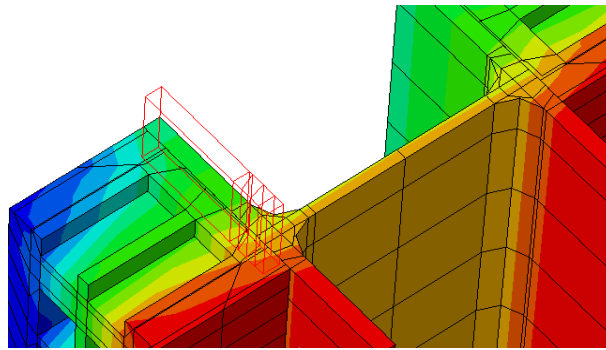


Figura 4.13: Visualização do método de obtenção de temperaturas no meio banzo não aquecido.

Apesar de só estar representada uma orientação e uma espessura de parede, foram consideradas duas orientações com a alma em relação á parede, paralela e perpendicular, e duas espessuras de parede, parede de 7 e parede de 15. As figuras apresentadas são um corte a meia altura do pilar. É de notar que os tijolos e as camadas argamassa vertical e horizontal entre eles foram modelados com precisão.

4.3. Resultados

No presente subcapítulo serão representados e comentados, de forma geral, alguns resultados obtidos através das simulações numéricas de pilares inseridos em paredes, quer com alma paralela, quer perpendicular em relação à posição da parede. No capítulo seguinte, estes resultados serão abordados de forma mais pormenorizada. O objetivo é avaliar a evolução das temperaturas do perfil/pilar ao longo do tempo. Serão escolhidos apenas alguns perfis para uma breve análise de temperaturas para este subcapítulo. Os resultados serão apresentados através de gráficos.

4.3.1. Análise de temperaturas

Para esta breve análise de temperaturas foram destacados dois pilares para quatro casos de estudo, dois dos quais encontram-se inseridos numa parede de 7 cm e os restantes inseridos numa parede de 15 cm. Os perfis escolhidos foram W 250x250x131 para a parede de 7cm e UB 406x178x54 para a parede de 15 cm. Cada gráfico apresenta quatro curvas que correspondem à curva ISO 834 do Eurocódigo 3 – parte 1.2 (EN 1993-1:2010), uma que corresponde ao banzo aquecido (BA) ou meio banzo aquecido (MBA), outra para a alma e por fim para o meio banzo não aquecido (MBNA) ou banzo não aquecido (BNA).

Para ver com mais detalhe todos os gráficos de todos os casos de estudo ver Anexo A.1., Anexo A.3., Anexo B.1. e Anexo B.3.

W 250x250x131 – alma paralela e perpendicular á parede

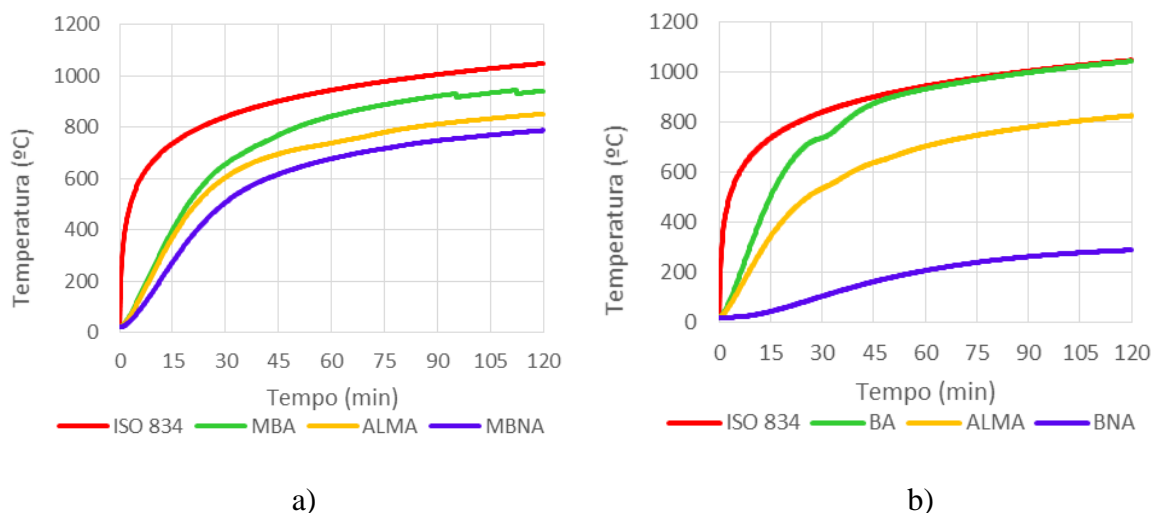


Figura 4.14: Gráfico de evolução de temperaturas no pilar W 250x250x131: a) com alma paralela á parede b) com alma perpendicular á parede

Na figura 4.14 a) verifica-se que até aos 90 min todas as curvas seguem o padrão da curva ISO 834 embora com valores distintos, sempre mais baixos e consoante a curva em estudo. É de esperar que no MBA ocorram temperaturas superiores às que ocorrem na ALMA e que esta, por sua vez, possua temperaturas superiores às do MBNA. Após os 90 min., a curva MBA sofre algumas irregularidades mas acompanha sempre a curva ISO 834 em termos de forma. A gama de valores aos 120 min situa-se entre os 800°C e ao 1020°C, aproximadamente.

A figura 4.14 b) apresenta curvas que experimentam uma gama de temperaturas mais distanciadas da curva ISO 834, nomeadamente na ALMA e no BNA. A curva BA acompanha a curva padrão a partir dos 45 min., assumindo valores semelhantes. Contudo, as restantes curvas apresentam grande diferença de temperaturas também entre si, assumindo para 120 min. 800°C para a ALMA e cerca de 300°C no BNA. A variação de temperatura, que se verifica entre as situações de estudo e o facto de estarem com valores muito mais distintos da curva ISO 834 que as situações da figura 4.14 a) deve-se ao facto da posição da parede, perpendicular, proteger a alma e o BNA. Sendo assim, mesmo expostos ao fogo, apresentam temperaturas muito baixas.

Esta diferença de temperaturas vai-se verificar em todos os casos em que a alma se situa perpendicular á parede, isto é, a diferença de valores para a curva padrão vai ser sempre superior nestes casos, pois a parede serve como uma barreira ao calor, protegendo o perfil.

UB 406x178x54 – alma paralela e perpendicular á parede

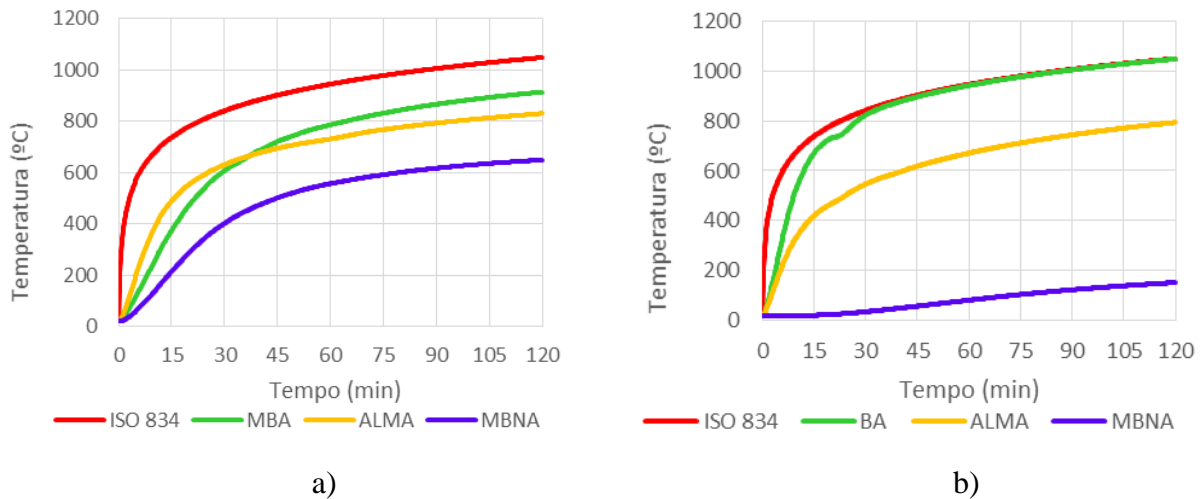


Figura 4.15: Evolução de temperaturas no pilar UB 406x178x54: a) com alma paralela á parede b) com alma perpendicular á parede

A figura 4.15 a) apresenta as curvas com a mesma forma da curva padrão mas com valores distintos, ou seja, inferiores tal como no gráfico anterior. Porém, até aos 37,5 min ocorre uma inversão do normal visto que a ALMA apresenta valores superiores aos do MBA, o que não se costuma observar.

Na figura 4.15 b) verificam-se situações idênticas às do gráfico 4.15 b), com valores de 800°C na ALMA e 170°C no BNA, aproximadamente, aos 120 min. Este valores são inferiores para o BNA do que o que se reflete no gráfico anterior na situação b) visto que a parede apresenta maior espessura, logo oferece maior proteção em relação ao fogo.

5. RESULTADOS

O aumento de temperatura do aço relaciona-se com a superfície exposta ao fogo e ao volume de um dado perfil metálico. Quanto menor for a superfície exposta ao fogo e maior o volume do perfil, mais lenta será a condução de calor através do aço e vice-versa. A evolução de temperaturas nos perfis metálicos depende do fator de forma ou massividade desse perfil. Como este estudo trata de perfis metálicos inseridos em paredes, para além do aço envolvente, temos de ter em conta o contacto da parede com o perfil e proceder à análise do efeito térmico que a parede provoca num dado perfil.

Apesar de este estudo envolver inúmeros modelos numéricos para o desenvolvimento deste capítulo foram considerados apenas alguns modelos numéricos para demonstrar os resultados obtidos. Foram selecionados dois perfis, um deles em contacto com a parede de 7 cm e outro com a parede de 15 cm, HE 160 M e HP 305x79, respetivamente. Esta seleção prendeu-se com o facto do perfil HE 160 M possuir uma massividade superior ao perfil HP 305x79 analisando assim, dois casos distintos.

Os resultados irão ser representados sob a forma de quadros, gráficos e figuras. Os mesmos surgirão por subcapítulos onde será descrito o modo de execução até chegarmos a conclusões finais, que serão analisadas e por fim comentadas, podendo existir comparação entre resultados numéricos de perfis distintos.

5.1. Análise térmica

5.1.1. Figuras do perfil

As figuras aqui representadas foram obtidas utilizando o *software* AutoCAD (*student version*). Os perfis foram desenhados de acordo com as dimensões rigorosas descritas no catálogo da ArcelorMittal, a empresa multinacional com maior produção de aço a nível mundial. Nestas figuras pretende-se mostrar a geometria de cada um dos casos, com o máximo rigor e detalhe, por forma a que seja possível identificar casos semelhantes que permitam a sistematização dos casos possíveis de encontrar na realidade dos edifícios construídos por pilares de aço, com paredes de alvenaria de tijolo.

Nestas figuras estão identificados com cores diferentes os perímetros expostos, perímetro da box, área da seção transversal do perfil exposta e área da seção transversal do perfil não exposta. A identificação rigorosa destas zonas é importante para o estudo que se vai desenvolver a seguir.

Perfil HE 160 M – parede 7 cm

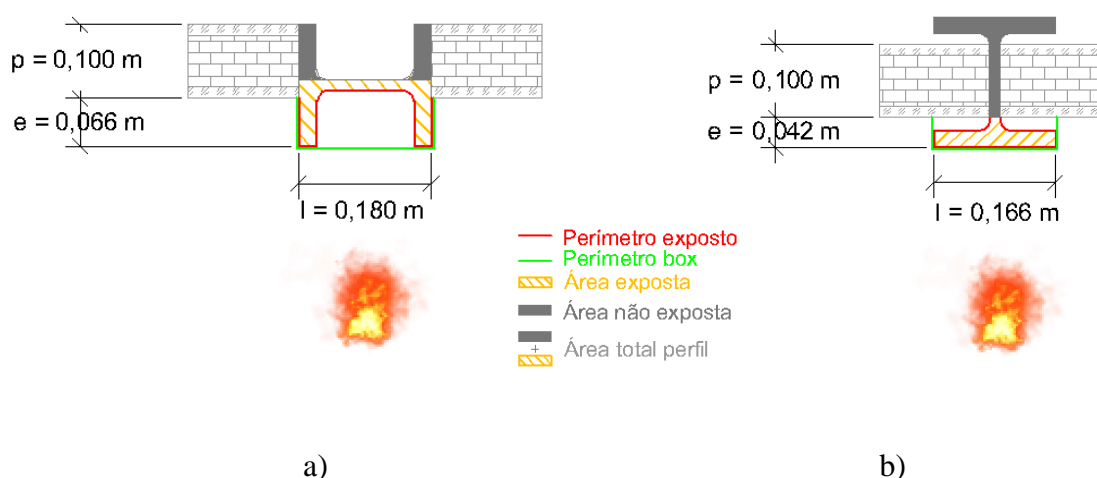


Figura 5.1: Perfil HE 160 M com alma paralela à parede a) Perfil HE 160 M com alma perpendicular à parede b)

Perfil HP 305x79 – parede 15 cm

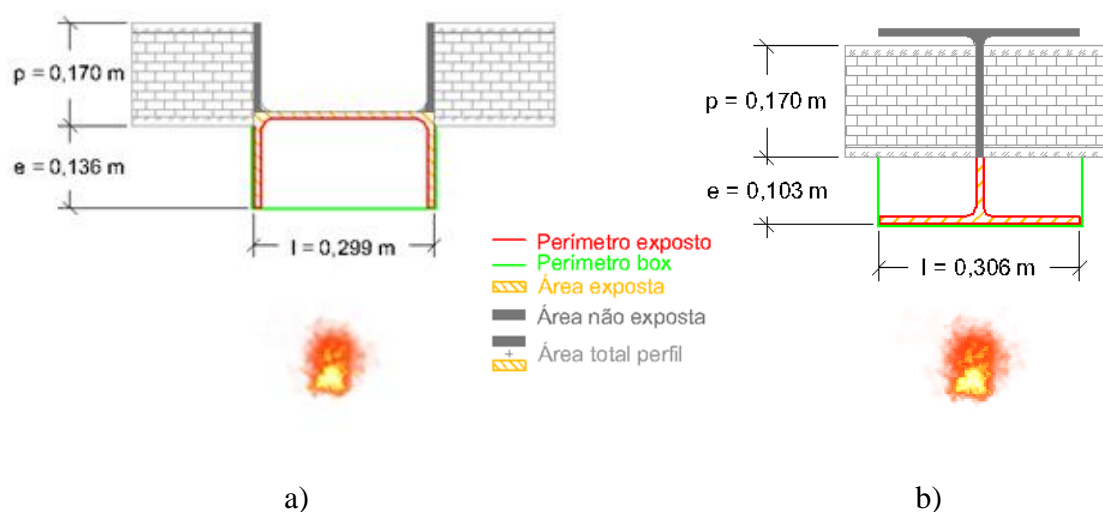


Figura 5.2: Perfil HP 305x79 com alma paralela à parede a) Perfil HP 305x79 com alma perpendicular à parede b)

5.1.2. Gráficos de temperatura

As curvas de temperaturas aqui referidas foram comparadas com a curva padrão ISO 834 do Eurocódigo 3. Esta segue o pressuposto que as temperaturas na seção dos perfis são sempre uniformes e que vão aumentando de forma exponencial, o que não se verifica na realidade. Para obtermos um resultado próximo da realidade simularam-se, com o Abaqus, situações de

incêndio o mais próximo da realidade possível para obter as curvas de temperatura de uma situação verídica.

Em cada gráfico surgem quatro curvas temperatura-tempo. A vermelho apresenta-se a curva ISO 834, a verde o BA ou MBA, a laranja temos a ALMA e a azul o BNA ou MBNA. As temperaturas do BNA (Banzo Não Aquecido) ou MBNA (Meio Banzo Não Aquecido), ALMA e BA (Banzo Aquecido) ou MBNA (Meio Banzo Não Aquecido) foram retiradas do modelo do *ABAQUS* que, posteriormente, foram exportadas para *Excel*. Assim, conseguiu obter-se um relatório que designava as temperaturas nas superfícies já mencionadas durante 7200 seg., isto é, 120 min, e com o cálculo da média das mesmas obtiveram-se valores para as situações pretendidas e já mencionadas. Por fim, foi possível desenhar um gráfico temperatura-tempo para cada situação pretendida. Para perfis com a alma perpendicular às paredes, quer inseridos em parede de 7 cm, quer em parede de 15 cm, foi calculada a média aritmética simples para o caso do BNA e BA, contudo para a ALMA foi considerada uma média aritmética ponderada que envolveu os comprimentos de cada elemento finito nela contido visto que é a situação mais rigorosa. Nos casos de perfis paralelos, em ambas as paredes, foi considerada uma média aritmética simples para todos os componentes, isto é, MBA, MBNA e ALMA.

Para os perfis que se encontram com a alma paralela à parede usam-se os termos MBNA e MBA, pois a parede aparece numa posição em que resguarda meio banzo do perfil, na presença do fogo. Portanto, verifica-se apenas que metade do banzo aparece exposto e “nu” perante um incêndio, daí a designação. Como o mesmo não se verifica para situações em que a alma do perfil se encontra perpendicular à parede, usam-se as denominações de BNA e BA para os banzos.

Para visualizar todos os gráficos de temperatura ver Anexo A.1., Anexo A.3., Anexo B.1. e Anexo B.4.

Perfil HE 160 M – parede 7 cm

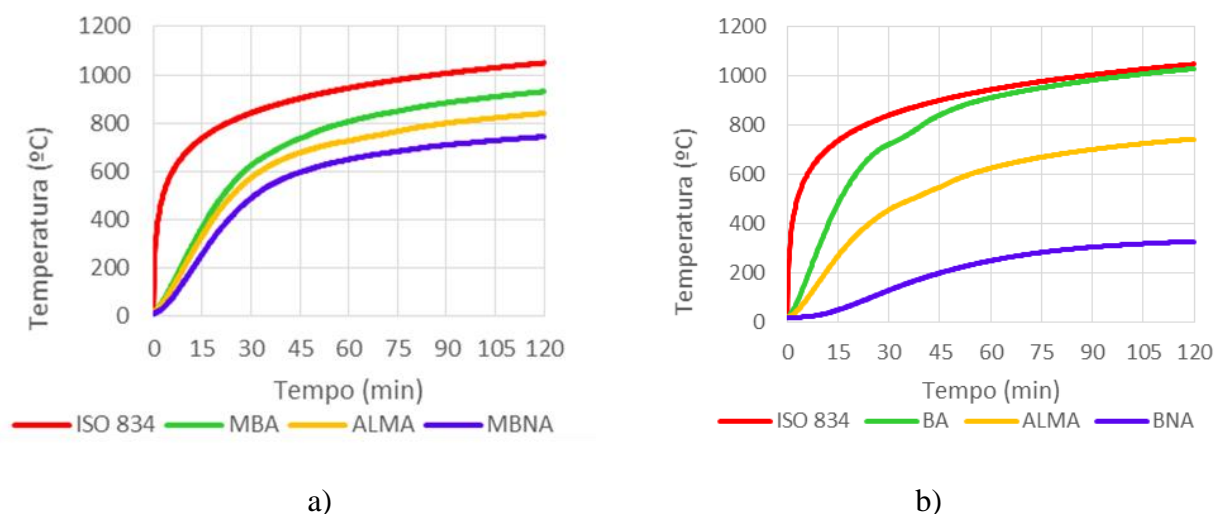


Figura 5.3: Gráfico de tempo-temperatura do perfil HE 160 M com alma paralela à parede a)
Gráfico de tempo-temperatura do perfil HE 160 M com alma perpendicular à parede b)

Os gráficos da figura 5.3 a) e b) apresentam as curvas temperatura-tempo no perfil HE 160 M, com a alma paralela e perpendicular à parede, respetivamente.

No gráfico a) todas as curvas seguem o crescimento exponencial da curva ISO 834, no entanto, sugerem temperaturas mais baixas que vão diminuindo de acordo com a exposição à fonte de calor, isto é, a temperatura é mais elevada no MBA, temos a ALMA no meio e com registos inferiores de temperatura temos o MBNA, como era de esperar. Verificam-se diferenciais de temperatura de curva para curva de cerca de 100°C para $t=120$ min.

O gráfico b) sugere que, sensivelmente, a partir dos 45 min o BA segue fielmente a curva padrão, observando-se valores bastante próximos a partir dos 60 min. Aqui o diferencial de temperatura para $t=120$ min não é significativo. O mesmo não se verifica para as restantes curvas onde existe um enorme decréscimo de temperatura, atingindo intervalos de temperatura na ordem dos 350°C para os 120 min. Esta redução de temperatura deve-se à posição da parede que serve como barreira protetora contra o fogo, daí que a alma e o lado não exposto sigam esta disparidade de temperatura.

Perfil HP 305x79 – parede 15 cm

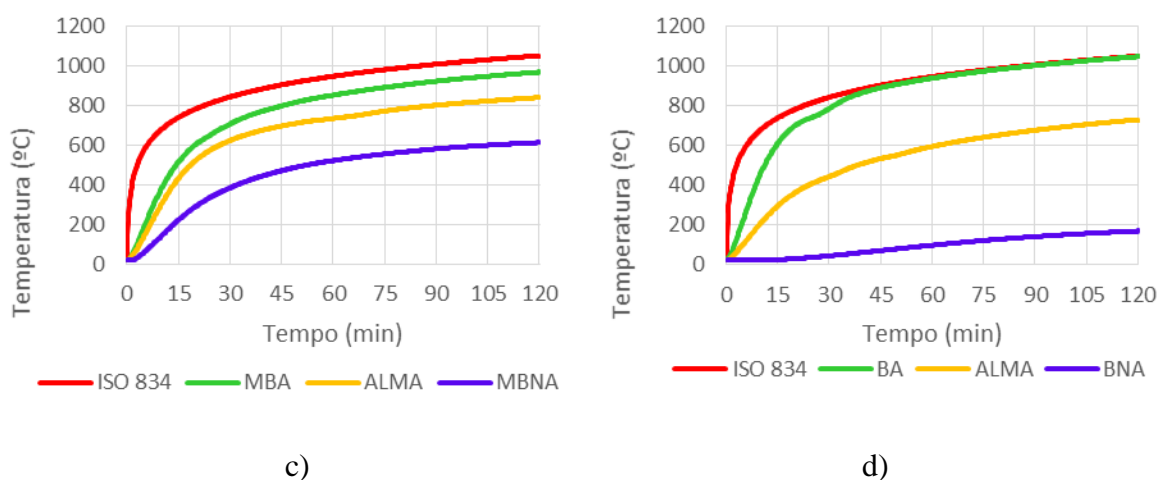


Figura 5.4: Gráfico de tempo-temperatura do perfil HP 305x79 com alma paralela à parede c)
Gráfico de tempo-temperatura do perfil HP 305x79 com alma perpendicular à parede d)

Nos gráficos da figura 5.4 c) e d) observam-se as evoluções de temperatura-tempo do perfil HP 305x79, com a alma paralela e perpendicular à parede, respetivamente.

O gráfico c) desenvolve resultados semelhantes aos analisados no gráfico a), contudo os diferenciais de temperatura variam um pouco visto que, para $t=120$ min., obtemos uma diferença de 50°C entre a curva ISO e a curva do MBA, cerca de 200°C entre MBA e ALMA e 220°C entre a ALMA e o MBNA, aproximadamente.

O gráfico d) volta a sugerir a fiel aproximação das curvas BA e ISO 834 mas neste caso em menor tempo, isto é, para $t = 37,5$ min, aproximadamente. Contém também decréscimos muito elevados de temperatura ao longo do perfil, verificando-se um diferencial de 350°C entre a curva da ALMA e a do BA e outro de 500°C entre BNA e ALMA. Esta diferença de temperaturas encontra-se explicada na análise anterior do gráfico b).

5.1.3. Resultados obtidos por elementos finitos e cálculo de temperaturas através do fator de massividade do Eurocódigo 3 – parte 1.2.

Os quadros seguintes refletem tanto os resultados retirados do programa de elementos finitos *ABAQUS* como os resultados a partir do Eurocódigo 3 - parte 1.2. Cada quadro encontra-se dividido em três colunas principais onde são apresentados resultados: a primeira é referente ao Eurocódigo, a segunda ao Abaqus e a última corresponde ao quociente entre os resultados obtidos pelo Eurocódigo e pelo código de elementos finitos *ABAQUS*. Foram retiradas temperaturas para 15 min, 60 min e 120 min. E por último, procedeu-se ao cálculo da média de temperaturas para a terceira coluna.

Para cada perfil estudado, apresentam-se os seus resultados em quatro casos, e consequentemente, quatro tabelas, que não são mais do que formas distintas para o cálculo do fator de massividade. Diferentes tentativas de obter de forma o mais rigorosa possível as temperaturas no perfil.

Os casos referidos anteriormente são:

$$\begin{aligned}
 \text{- Caso I: } & \frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp} \\
 \text{- Caso II: } & \frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil} \\
 \text{- Caso III: } & \frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp} \\
 \text{- Caso IV: } & \frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}
 \end{aligned}$$

Onde:

Am: área da seção do perfil

V: volume;

Pexp: perímetro exposto;

Aexp: área exposta;

Pbox: perímetro da box;

Atot.perfil: área total do perfil

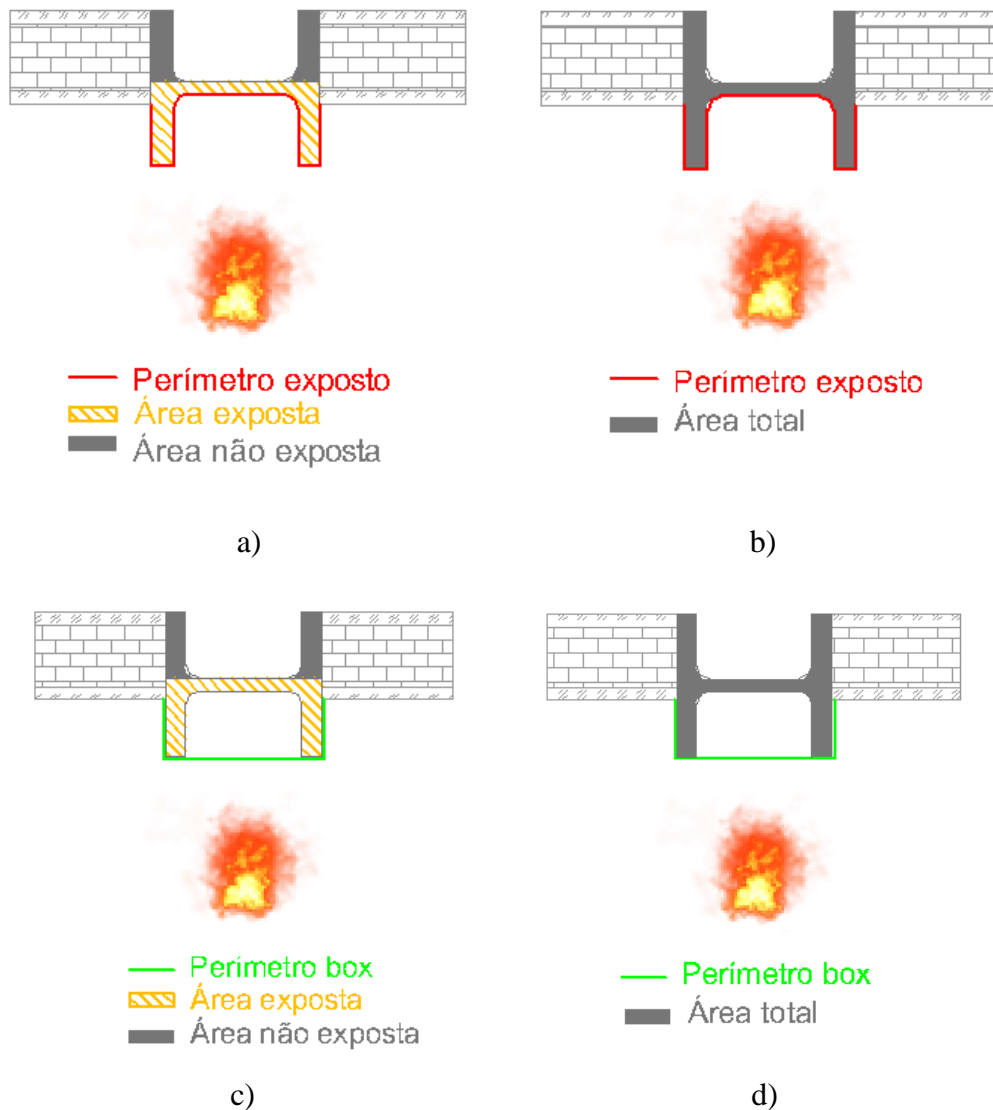


Figura 5.5: Caso 1 a) Caso 2 b) Caso 3 c) Caso 4 d)

Através das figura 5.5 a), b), c) e d) podemos observar que P_{exp} está representado com linha a vermelho, A_{exp} encontra-se a tracejado diagonal laranja, P_{box} apresenta-se com linha de cor verde, a Área não exposta encontra-se a cinza escuro bem como a $A_{tot.perfil}$.

O caso 1, $\frac{Am}{V} = \frac{P_{exp}}{A_{exp}}$, está representado na figura 6.4: Caso 1 a) e é relativo ao quociente entre o perímetro exposto, que se encontra a vermelho e a área exposta, que se ilustra com traços na diagonal e de cor laranja. O perímetro exposto corresponde á fronteira do perfil que se encontra em contacto com o fogo, enquanto a área exposta traduz qual a superfície exposta ao mesmo.

No caso 2, $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$, verifica-se o quociente entre o perímetro exposto e a área total do perfil, demonstrada a cheio e a cinzento, que representa a superfície do perfil na sua totalidade.

O caso 3, $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$, expõe a divisão entre o perímetro da “box”, representada com uma linha verde, e a área exposta que designa a superfície sujeita ao fogo.

A designação de “box” é referente a uma caixa que envolve o perfil apenas pelo lado exposto.

Este conceito de “box” pretende considerar o perímetro que vai ser aquecido no perfil pela entrada na chama numa superfície côncava.

O caso 4, $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$, refere-se á divisão entre o perímetro da box, já mencionada anteriormente, e a área total do perfil, também já referida.

Como já referido, foi utilizado o *software* AutoCAD para desenhar de acordo com as dimensões exatas, e foi também através deste programa que se calcularam a $Atot.perfil$, o $Pbox$, a $Aexp$ e o $Pexp$ e assim foram obtidos o fator de forma para cada uma das situações apresentadas.

Com o cálculo anterior e com o auxílio de uma folha de cálculo do *Excel*, procedeu-se à estimativa de temperaturas de acordo com o Eurocódigo 3 – parte 1.2, para 15 min, 60 min e 120 min. Estes resultados encontram-se na primeira coluna de cada tabela.

A segunda coluna, que se subdivide em três colunas, corresponde aos gradientes de temperatura retirados diretamente do *ABAQUS*, para os mesmos instantes de tempo, e posteriormente convertidas para uma folha de *Excel*. Foram retiradas as temperaturas em cada elemento finito a meia altura do BA ou MBA, ALMA e BNA ou MBNA e calculada a média dos mesmos para assim se obter o resultado final. Estes valores repetem-se nos quadros respeitantes aos quatro casos do mesmo perfil.

A terceira coluna, também subdividida em três, diz respeito aos coeficientes de redução descritos através da divisão entre as temperaturas registadas pelo Eurocódigo e as temperaturas provenientes do *ABAQUS*. Após este cálculo foi calculada a média de cada para o BA ou MBA, ALMA, BNA ou MBA.

Nos quadros posteriormente referidos podemos observar que os gradientes de temperatura retirados pelo *ABAQUS*, referidos na subdivisão da segunda coluna, se alteram dependendo da situação analisada.

Perfil HE 160 M – parede 7 cm – alma paralela

Os quadros 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 são referentes ao perfil HE 160 M com a posição de alma paralela à parede de 7 cm.

Quadro 5.1 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	486	369.230	332.720	257.340	0.760	0.685	0.530
60	933	806.090	725.840	649.230	0.864	0.778	0.696
120	1046	930.280	839.890	742.850	0.889	0.803	0.710
MÉDIA					0.838	0.755	0.691

Quadro 5.2 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	361	369.230	332.720	257.340	1.023	0.922	0.713
60	912	806.090	725.840	649.230	0.884	0.796	0.712
120	1043	930.280	839.890	742.850	0.892	0.805	0.712
MÉDIA					0.933	0.841	0.712

Quadro 5.3 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	392	369.230	332.720	257.340	0.942	0.849	0.656
60	919	806.090	725.840	649.230	0.877	0.790	0.706
120	1044	930.280	839.890	742.850	0.891	0.804	0.712
MÉDIA					0.903	0.814	0.691

Quadro 5.4 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	279	369.230	332.720	257.340	1.323	1.193	0.922
60	880	806.090	725.840	649.230	0.916	0.825	0.738
120	1040	930.280	839.890	742.850	0.895	0.808	0.714
MÉDIA					1.045	0.942	0.791

Para este perfil e posição da alma paralelamente em relação à parede verificam-se diferenciais de temperatura na ordem de 40°C quando, aos 15 min., analisamos o MBA e a ALMA e de 75°C quando passamos da ALMA para o MBNA, decrescendo a temperatura mas aumentando o diferencial, respetivamente. Para t=60 min observam-se gradientes distintos, sendo esta diferença de 81°C e de 76°C e para t=120 min. a diferença diminui bastante em apenas 5°C, obtendo diferenciais com valores 91°C e 96°C (valores aproximados).

É de notar que nos três primeiros casos descritos as temperaturas do MBA são as que mais se aproximam das temperaturas dadas pelo Eurocódigo 3. O último quadro apresenta valores análogos no MBA aos 60 e 120 min, contudo aos 15 min é a alma que detém tal proximidade. As temperaturas que se verificam próximas dos valores recomendados, aproximam-se sempre por defeito, o que nos indica que o regulamento atua pelo lado da segurança.

O valor de referência, para a análise destas situações é o valor 1 visto que estamos a comparar cálculos rigorosos (*ABAQUS*) com valores menos precisos (Eurocódigo 3) e calculando a divisão entre estes o coeficiente mais correto é o que se encontrar mais próximo de 1. Esta situação aplica-se á análise de todos os casos que se seguem.

Posto isto, o caso 4 é o que apresenta melhores resultados em termos de coeficientes de redução visto que é o que mais se aproxima do valor 1, de forma global.

Perfil HE 160 M – parede 7 cm – alma perpendicular

Os quadros 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8 são referentes ao perfil HE 160 M com a posição de alma perpendicular à parede de 7 cm.

Quadro 5.5 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	549	484.450	271.399	50.240	0.882	0.494	0.530
60	938	912.660	626.422	250.370	0.973	0.668	0.696
120	1046	1030.800	744.852	372.990	0.985	0.712	0.710
MÉDIA					0.947	0.625	0.691

Quadro 5.6 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	328	484.450	271.399	50.240	1.477	0.827	0.153
60	901	912.660	626.422	250.370	1.013	0.695	0.278
120	1042	1030.800	744.852	372.990	0.989	0.715	0.315
MÉDIA					1.160	0.746	0.249

Quadro 5.7 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	432	484.450	271.399	50.240	1.121	0.628	0.116
60	926	912.660	626.422	250.370	0.986	0.676	0.270
120	1045	1030.800	744.852	372.990	0.986	0.713	0.314
MÉDIA					1.031	0.672	0.234

Quadro 5.8 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	236	484.450	271.399	50.240	2.053	1.150	0.213
60	843	912.660	626.422	250.370	1.083	0.743	0.297
120	1038	1030.800	744.852	372.990	0.993	0.718	0.316
MÉDIA					1.376	0.870	0.275

Analisando esta situação, constatamos que os gradientes variam em cerca de 213°C do BA para a ALMA e de 221°C da ALMA para o BNA, em t=15 min. Aos 60 e 120 min., o diferencial situa-se, aproximadamente, em 286°C entre BA e ALMA e 370°C entre ALMA e BNA. A variação acentuada da temperatura deve-se á posição da parede relativamente á alma.

Observa-se que o BA possui gradientes de temperatura idênticos às do Eurocódigo 3 nos quadros 5.5 e 5.7. No entanto, visto que na restante seção as temperaturas são muito inferiores, continuamos a verificar a segurança fornecida pelo Eurocódigo. Nos quadros 5.6 e 5.8 temos que, para t=15 min, a ALMA possui semelhanças com o Eurocódigo 3 e para 60 e 120 min é o BA que representa esta analogia. As aproximações verificadas (no conjunto BA, ALMA e BNA para t=15,60 e 120 min) obtém-se através de valores inferiores descritos nos quadros, logo estamos a prever pelo lado seguro.

Neste caso as médias dos coeficientes de redução são muito díspares pois, de forma global, temos para o BA valores na ordem de 1, para a ALMA valores na ordem de 0.6 e para o BNA 0.3.

Conclui-se que o caso mais favorável é o último pois é o que nos indica maiores coeficientes de redução apesar de o quadro 5.6 também apresentar valores próximos dos desejáveis.

Perfil HP 305x79 – parede 15 cm - alma paralela

Os quadros 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12 são referentes ao perfil HP 305x79 com a posição de alma paralela à parede de 15 cm.

Quadro 5.9 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	617	738.561	432.549	222.688	1.197	0.701	0.361
60	940	945.340	732.523	520.467	1.006	0.779	0.554
120	1047	1049.040	838.424	611.304	1.002	0.801	0.584
MÉDIA					1.068	0.760	0.499

Quadro 5.10 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	524	738.561	432.549	222.688	1.409	0.825	0.425
60	937	945.340	732.523	520.467	1.009	0.782	0.555
120	1046	1049.040	838.424	611.304	1.003	0.802	0.584
MÉDIA					1.140	0.803	0.522

Quadro 5.11 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	526	738.561	432.549	222.688	1.404	0.822	0.423
60	937	945.340	732.523	520.467	1.009	0.782	0.555
120	1046	1049.040	838.424	611.304	1.003	0.802	0.584
MÉDIA					1.139	0.802	0.521

Quadro 5.12 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	416	738.561	432.549	222.688	1.775	1.040	0.535
60	924	945.340	732.523	520.467	1.023	0.793	0.563
120	1044	1049.040	838.424	611.304	1.005	0.803	0.586
MÉDIA					1.268	0.879	0.561

Quanto à análise deste perfil, verificamos que as temperaturas variam em cerca de 300°C de MBA para ALMA e cerca de 210°C de ALMA para MBNA, para 15 min. Para 60 e 120 min verificamos que nas mesmas circunstâncias as temperaturas variam cerca de 200°C.

No quadro 5.9 o BA tem gradientes térmicos cujas temperaturas se assemelham às ditadas pelo Eurocódigo. Nas restantes situações verifica-se que o banzo aquecido continua com valores mais aproximados para os instantes t=60 e 120 min mas para t= 15min é a alma que traduz proximidade com o Eurocódigo.

Quanto aos coeficientes de redução observam-se valores próximos de 1 no MBA, 0.8 na ALMA e 0.5 no MBNA. Os quadros representativos do caso II e III apresentam valores muito semelhantes, contudo a última situação continua a ser a mais favorável em termos de coeficientes de redução.

Perfil HP 305x79 – parede 15 cm – alma perpendicular

Os quadros 5.13, 5.14, 5.15 e 5.16 são referentes ao perfil HP 305x79 com a posição de alma perpendicular à parede de 15 cm.

Quadro 5.13 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	666	611.186	296.093	23.485	0.918	0.445	0.035
60	941	937.618	593.921	96.129	0.996	0.631	0.102
120	1048	1046.023	728.636	167.684	0.998	0.695	0.160
MÉDIA					0.971	0.590	0.099

Quadro 5.14 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	505	611.186	296.093	23.485	1.210	0.586	0.047
60	934	937.618	593.921	96.129	1.004	0.636	0.103
120	1046	1046.023	728.636	167.684	1.000	0.697	0.160
MÉDIA					1.071	0.640	0.103

Quadro 5.15 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	387	611.186	296.093	23.485	1.579	0.765	0.061
60	918	937.618	593.921	96.129	1.021	0.647	0.105
120	1044	1046.023	728.636	167.684	1.002	0.698	0.161
MÉDIA					1,201	0.703	0.109

Quadro 5.16 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	256	611.186	296.093	23.485	2.387	1.157	0.092
60	543	937.618	593.921	96.129	1.727	1.094	0.177
120	1039	1046.023	728.636	167.684	1.007	0.701	0.161
MÉDIA					2.107	0.984	0.143

Para o perfil HP 305x79 com a alma perpendicular à parede é possível constatar que nos quadros 5.13 e 5.14 os gradientes de temperatura que mais se aproximam das temperaturas do Eurocódigo 3- Parte 1-2, são os do banzo aquecido. No quadro 5.15 observa-se semelhante situação, contudo, é na alma que encontramos uma temperatura mais próxima da dada pelo

Eurocódigo para $t=15$ min. No último quadro temos que os valores mais aproximados se verificam na ALMA para $t=15$ e 60 min, com exceção para $t=120$ min onde se verifica que o valor mais próximo é registado no banzo aquecido.

No que respeita às diferenças ou diferenciais de temperatura entre BA e ALMA e entre ALMA e BNA, reconhece-se que se situa na ordem dos 300°C para a primeira situação e em todas as temperaturas descritas, já na segunda situação verifica-se que, para $t=15$ min, o diferencial ronda os 270°C entre ALMA e BNA, para $t=60$ min, situa-se nos 500°C e para $t=120$ min regista 560°C , aproximadamente.

Para os coeficientes de redução, verificam-se valores próximos de 1 em todos os quadros para o banzo aquecido, embora no último quadro apresente um valor próximo de 2. Para a alma temos coeficientes a rondar valores de 0.6 contudo o terceiro e o último diferem um pouco com valores de 0.703 e 0.984, respetivamente. No BNA registam-se coeficientes de 0.1. O caso IV e o caso II verificam ser os mais vantajosos cuja ronda média de coeficientes se situa mais chegada ao valor de 1.

Depois uma análise de todos estes resultados partiu-se para o cálculo de novas expressões para o fator de massividade, tendo então em conta que a temperatura não é uniforme como assumido pelo Eurocódigo 3, mas varia consoante o perfil e as condições envolventes. O capítulo seguinte descreve as propostas para o cálculo de novas expressões para este fator.

Para uma análise mais detalhada acerca dos resultados obtidos em cada perfil ver Anexo A.2., Anexo A.4., Anexo B.2. e Anexo B.4.

6. PROPOSTA DE NOVAS EXPRESSÕES PARA O CÁLCULO DO FATOR DE MASSIVIDADE

No presente capítulo desenvolveram-se métodos de cálculo com vista a obter novas expressões para o cálculo do fator de massividade. Este fator, embora se encontre presente no Eurocódigo 3, não se encontra adaptado a situações reais pois apenas assume que a distribuição de temperaturas acontece de forma uniforme e gradual ao longo do tempo.

Foram utilizados estudos paramétricos, em 94 casos distintos, em perfis de aço inseridos, quer em parede de 7 cm quer em parede de 15 cm, e com a posição da alma paralela e/ou perpendicular á parede. Foram modelados no programa ABAQUS, como já referido em capítulos anteriores, aplicando-se um estudo térmico onde se obtiveram as temperaturas para cada situação.

Subdividiu-se o problema em quatro casos distintos onde foi considerado o perímetro da box, o perímetro exposto, a área exposta do perfil em estudo e ainda a área total do perfil, com é explicado no capítulo 5 referente aos resultados. Com as temperaturas obtidas e comparadas com as fornecidas pelo Eurocódigo foram conseguidos coeficientes de redução térmica para três instantes de tempo, sendo eles 15, 60 e 120 min para o banzo aquecido, alma e banzo não aquecido (no caso da alma perpendicular à parede), ou meio banzo aquecido, alma e meio banzo não aquecido (no caso da alma paralela à parede) e calculadas a média aritmética para cada um dos casos.

Após o cálculo dos coeficientes médios recorreu-se ao método dos mínimos quadrados, efetuado para cada caso e situação estudada, para que assim se pudesse verificar qual dos casos estudados teria o menor erro. Para esta avaliação utilizaram-se os casos onde foi considerado o perímetro da box versus casos onde este não foi considerado. Assim destacou-se o caso I versus caso II e caso III versus caso IV.

Foram ainda distribuídas as situações em novos quatro casos. Estes dizem respeito às dimensões da parede e às dimensões do perfil e também à posição do mesmo relativamente à parede, subdividindo-se nos casos A, B, C e D que serão detalhados ao longo desta secção. Assim para cada caso foi construída um quadro onde se verificam as situações descritas no parágrafo anterior e através do qual se analisam os menores erros.

Nos casos que apresentaram erros inferiores, que sugerem ser os mais favoráveis, foram retirados coeficientes k_1 , k_2 e k_3 , que representam o banzo aquecido, alma e o banzo não aquecido, respetivamente (no caso da alma perpendicular à parede) e meio banzo aquecido, alma e meio banzo não aquecido (no caso da alma paralela à parede). Estes representam os coeficientes de correção a aplicar nas fórmulas já existentes do Eurocódigo para obter uma aproximação o mais real possível de temperaturas obtidas durante a ocorrência de um incêndio.

A fórmula do Eurocódigo 3 – parte 1-2 a utilizar será:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net,d} \Delta t \quad (6.1)$$

Onde:

- k_{sh} é a correção do fator do efeito de sombra;
- A_m/V é o fator de secção para os membros de aço não protegidos;
- A_m é a área da superfície do membro por unidade de comprimento [m^2];
- V é o volume do membro por unidade de comprimento [m^3];
- c_a é o calor específico do aço [J/kgK];
- $\dot{h}_{net,d}$ é o valor de cálculo do fluxo efetivo por unidade de área [W/m^2];
- Δt é o intervalo de tempo [segundos];
- ρ_a é a unidade de massa do aço [kg/m^3].

A proposta será implementar outro coeficiente de correção, k_c , na fórmula anterior para que esta preveja assim temperaturas não uniformes ao longo da secção e, conseqüentemente, mais realistas.

$$\Delta\theta_{a,t} = k_c k_{sh} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net,d} \Delta t \quad (6.2)$$

As grandezas desta nova expressão são as mesmas descritas anteriormente com introdução de uma nova, sendo esta k_c que corresponde aos coeficientes de correção obtidos.

6.1. Caso A: $p > 0.5 \times b$

Esta subsecção remete-nos para situações em que a alma dos perfis se encontra paralela à parede (p) e esta, por sua vez, é maior que metade da altura do banzo (b), isto é, $p > 0.5 \times b$.

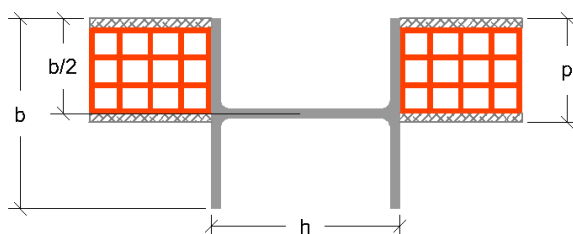


Figura 6.1: perfil sujeito ao caso A: $p > 0.5 \times b$

Quadro 6.1 – Caso A: $p > 0.5 \times b$

ERROS 7 CM	I	II	CASO COM MENOR ERRO	III	IV	CASO COM MENOR ERRO
IPE 180	0.205	0.168	II	0.166	0.110	IV
HE 160 A	0.192	0.143	II	0.125	0.048	IV
HE 160 AA	0.190	0.157	II	0.164	0.106	IV
HE 160 M	0.212	0.113	II	0.139	0.049	IV
IPEA 100	0.290	1.083	I	0.913	3.208	III
IPE 400	0.211	0.165	II	0.182	0.125	IV
IPEA 180	0.195	0.166	II	0.165	0.119	IV
IPEO 270	0.203	0.150	II	0.165	0.099	IV
UB 254X102X28	0.203	0.150	II	0.152	0.087	IV
UB 406X178X54	0.162	0.131	II	0.133	0.094	IV
ERROS 15 CM	I	II	CASO COM MENOR ERRO	III	IV	CASO COM MENOR ERRO
HD 320X127	0.305	0.213	II	0.239	0.161	IV
HE 450 AA	0.317	0.261	II	0.273	0.206	IV
HE 450 A	0.392	0.361	II	0.368	0.310	IV
HE 450 M	0.285	0.180	II	0.215	0.129	IV
HP 250X62	0.335	0.277	II	0.275	0.200	IV
HP 305X79	0.313	0.287	II	0.288	0.279	IV
HP 305X110	0.349	0.277	II	0.280	0.201	IV
IPEA 270	0.303	0.261	II	0.257	0.193	IV
IPEA 400	0.430	0.369	II	0.380	0.300	IV
IPE 400	0.318	0.257	II	0.266	0.194	IV
IPEO 270	0.271	0.209	II	0.213	0.136	IV
UB 254X102X28	1.057	1.039	II	1.039	1.027	IV
UB 406X178X54	0.346	0.268	II	0.318	0.210	IV
UC 254X254X107	0.182	0.154	II	0.131	0.074	IV
W 250X250X167	0.279	0.177	II	0.212	0.132	IV
W 460X280X235	0.263	0.176	II	0.259	0.145	IV

Este quadro surgiu após uma análise dos quadros de resultados de cada situação que se insere neste caso A.

Verificou-se, através do método dos mínimos quadrados, que na maioria das situações apresentadas os casos mais favoráveis seriam o caso II e o caso IV. Assim sendo, foram calculadas as médias aritméticas dos coeficientes de redução para os casos mais favoráveis obtendo-se assim coeficientes gerais k_1 , k_2 e k_3 para três instantes, 15, 60 e 120 min.

O quadro seguinte traduz os resultados, cujo coeficiente k_1 se destina ao meio banzo aquecido da secção, k_2 para a alma e k_3 para o meio banzo não aquecido.

Quadro 6.2 – Coeficientes de correção k_1 , k_2 e k_3 para a situação II

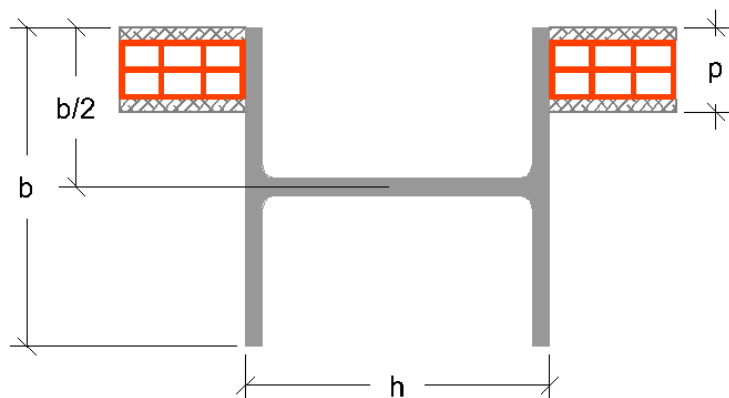
Tempo (min)	k_1	k_2	k_3
15	0.901	0.905	0.507
60	0.865	0.778	0.610
120	0.885	0.793	0.633

Quadro 6.3 – Coeficientes de correção k_1 , k_2 e k_3 para a situação IV

Tempo (min)	k_1	k_2	k_3
15	1.116	1.117	0.635
60	0.878	0.787	0.619
120	0.886	0.792	0.634

6.2. Caso B: $p < 0.5 \times b$

Este ponto destina-se a situações em que a alma dos perfis se encontra paralela à parede (p) e esta, por sua vez, é menor que metade da altura do banzo (b), isto é, $p < 0.5 \times b$.

Figura 6.2: perfil sujeito ao caso B: $p < 0.5 \times b$

Quadro 6.4 – Caso B: $p < 0.5 \times b$

ERROS 7 CM	I	II	CASO COM MENOR ERRO	III	IV	CASO COM MENOR ERRO
HD 320X127	0.141	0.098	II	0.093	0.057	IV
HE 450 M	0.137	0.076	II	0.072	0.068	IV
HP 360X174	0.139	0.108	II	0.093	0.071	IV
HP 250X62	0.142	0.112	II	0.107	0.070	IV
HP 360X152	0.139	0.110	II	0.094	0.071	IV
HP 305X79	0.139	0.115	II	0.105	0.077	IV
HP 400X194	0.142	0.110	II	0.092	0.071	IV
UBP 356X368X133	0.128	0.115	II	0.086	0.075	IV
UC 254X254X107	0.174	0.118	II	0.121	0.073	IV
UC 356X406X551	0.180	0.065	II	0.106	0.078	IV
W 250X250X131	0.154	0.088	II	0.093	0.044	IV
W 460X280X235	0.144	0.085	II	0.090	0.067	IV
ERROS 15 CM	I	II	CASO COM MENOR ERRO	III	IV	CASO COM MENOR ERRO
HP 360X152	0.287	0.226	II	0.227	0.175	IV
HP 4360X174	0.284	0.221	II	0.222	0.187	IV
HP 400X194	0.231	0.165	II	0.165	0.115	IV
HP 400X231	0.239	0.165	II	0.164	0.118	IV
UBP 356X368X133	0.259	0.206	II	0.206	0.158	IV
UC 356X406X551	0.193	0.122	II	0.141	0.111	IV
W 920X420X344	0.234	0.162	II	0.217	0.170	IV

Seguiu-se o método de análise da situação do caso anterior, contudo para casos que se encaixam no caso B. O cálculo dos erros a partir dos mínimos quadrados propõe-nos que os casos mais favoráveis, isto é, com menor erro, continuam a verificar-se nas situações II e IV. O cálculo dos coeficientes gerais de correção k_1 , k_2 e k_3 foram calculados da mesma forma que no caso anterior, k_1 é para o meio banzo aquecido, k_2 para a alma e k_3 para o meio banzo não aquecido e para os instantes apresentados. Os quadros seguintes revelam os resultados dos cálculos efetuados.

Quadro 6.5 – Coeficientes k_1 , k_2 e k_3 para a situação II

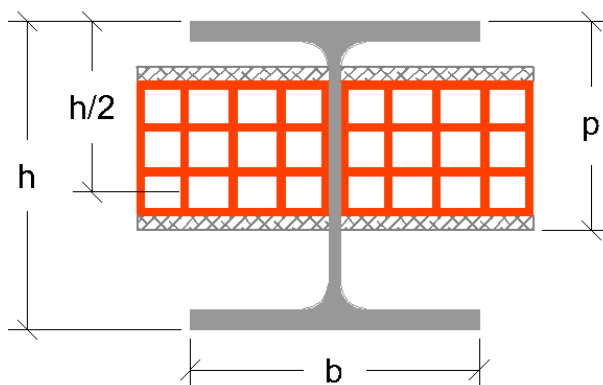
Tempo (min)	k_1	k_2	k_3
15	1.122	0.959	0.635
60	0.965	0.828	0.699
120	0.945	0.813	0.707

Quadro 6.6 – Coeficientes k_1 , k_2 e k_3 para a situação IV

Tempo (min)	k_1	k_2	k_3
15	1.376	1.177	0.779
60	0.967	0.830	0.702
120	0.946	0.814	0.713

6.3. Caso C: $p > 0.5 \times h$

Para situações em que a alma dos perfis se encontra perpendicular à parede (p) e esta, por sua vez, é maior que metade da altura total do perfil (h), isto é, $p > 0.5 \times h$.

Figura 6.3: perfil sujeito ao caso C: $p > 0.5 \times h$ Quadro 6.7 – Caso C: $p > 0.5 \times h$

ERROS 7 CM	I	II	CASO COM MENOR ERRO	III	IV	CASO COM MENOR ERRO
IPE 180	0.726	0.700	II	0.719	0.682	IV
HE 160 A	0.888	0.846	II	0.868	0.812	IV
HE 160 AA	1.000	0.973	II	0.988	0.942	IV
HE 160 M	0.746	0.655	II	0.696	0.684	IV
HE 450 M	0.756	0.692	II	0.725	0.693	IV
IPEO 180	0.753	0.735	II	0.749	0.719	IV
IPEA 180	0.718	0.699	II	0.714	0.682	IV
UB 254X102X28	0.683	0.652	II	0.673	0.636	IV
W 250X250X131	0.727	0.672	II	0.694	0.690	IV

ERROS 15 CM	I	II	CASO COM MENOR ERRO	III	IV	CASO COM MENOR ERRO
HD 320X127	1.069	1.011	II	1.036	1.079	III
HP 250X62	1.126	1.080	II	1.105	1.063	IV
HP 360X152	0.954	0.895	II	0.922	0.894	IV
HP 360X174	0.824	0.893	I	0.913	0.919	III
HP 305X79	1.017	0.955	II	0.889	0.813	IV
HP 305X110	1.011	0.962	II	0.986	0.973	IV
HP 400X194	0.950	0.897	II	0.916	0.934	III
HP 400X231	0.950	0.891	II	0.910	0.936	III
IPEA 270	1.088	1.060	II	1.080	1.044	IV
IPEA 400	0.941	0.913	II	0.934	0.901	IV
IPE 400	0.922	0.888	II	0.912	0.877	IV
UBP 356X406X551	0.964	0.919	II	0.939	0.926	IV
UB 254X102X28	1.200	1.147	II	1.182	1.151	IV
UC 254X254X107	1.103	1.047	II	1.071	1.082	III
UC 356X406X551	0.977	0.863	II	0.900	0.918	III
W 250X250X131	1.102	1.032	II	1.056	1.085	III
W 250X250X167	1.078	1.008	II	1.032	1.068	III

O procedimento de análise verifica-se semelhante aos anteriores, embora para situações que verificam o caso C. Apesar dos mínimos quadrados se apresentarem mais favoráveis em alguns dos casos apresentados, continuamos a obter maioritariamente o caso II e IV como os mais favoráveis. O cálculo dos coeficientes gerais de correção k_1 , k_2 e k_3 foram calculados como já referido e para os mesmos momentos de tempo, contudo, k_1 é agora banzo aquecido, k_2 para a alma e k_3 para o banzo não aquecido. Nos quadros 6.8 e 6.9 estão indicados os coeficientes de correção obtidos.

Quadro 6.8 – Coeficientes de correção k_1 , k_2 e k_3 para a situação II

Tempo (min)	k_1	k_2	k_3
15	1.297	0.637	0.081
60	1.012	0.621	0.155
120	0.999	0.668	0.207

Quadro 6.9 – Coeficientes de correção k_1 , k_2 e k_3 para a situação IV

Tempo (min)	k_1	k_2	k_3
15	1.526	0.804	0.102
60	1.061	0.675	0.180
120	1.000	0.685	0.219

6.4. Caso D: $p < 0.5 \times h$

A metodologia apresentada no ponto 6.4 utiliza-se quando a alma dos perfis se encontra perpendicular à parede (p) e esta, por sua vez, é menor que metade da altura total do perfil (h), isto é, $p < 0.5 \times h$.

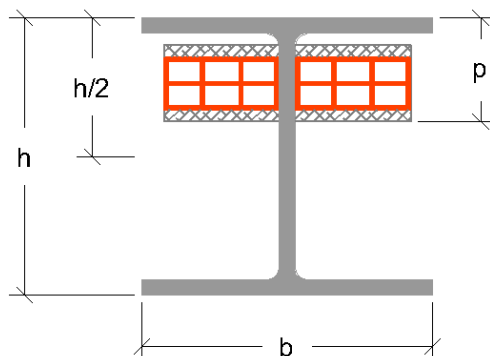


Figura 6.4: perfil sujeito ao caso D: $p < 0.5 \times h$

Quadro 6.10 – Caso D: $p < 0.5 \times h$

ERROS 7 CM	I	II	CASO COM MENOR ERRO	III	IV	CASO COM MENOR ERRO
HD 320X127	0.753	0.706	II	0.727	0.716	IV
HP 360X174	0.711	0.674	II	0.687	0.694	III
HP 360X152	0.713	0.679	II	0.692	0.691	IV
HP 305X79	0.723	0.697	II	0.710	0.687	IV
HP 400X194	0.711	0.674	II	0.685	0.700	III
IPE 400	0.682	0.662	II	0.676	0.655	IV
IPEO 270	0.689	0.663	II	0.682	0.653	IV
HP 250X62	0.731	0.699	II	0.716	0.684	IV
UBP 356X368X133	0.720	0.689	II	0.702	0.694	IV
UB 406X178X54	0.692	0.679	II	0.688	0.674	IV
UC 254X254X107	0.729	0.674	II	0.699	0.677	IV
UC 356X406X551	0.727	0.671	II	0.690	0.743	III
W 460X280X235	0.699	0.795	I	0.715	0.929	III
W 920X420X390	0.720	0.703	II	0.710	0.713	III
ERROS 15 CM	I	II	CASO COM MENOR ERRO	III	IV	CASO COM MENOR ERRO
HE 450AA	0.937	0.902	II	0.923	0.892	IV
HE 450A	0.943	0.892	II	0.923	0.890	IV
HE 450 M	0.894	0.829	II	0.859	0.770	IV
IPEO 270	1.065	1.026	II	1.053	1.019	IV
UB 406X178X54	0.919	0.892	II	0.920	0.893	IV
W 460X280X235	0.831	0.808	II	0.828	0.811	IV
W 920X420X344	0.818	0.864	I	0.826	0.819	IV
W 920X420X390	0.816	0.832	I	0.825	0.821	IV

Para casos que se inserem neste caso D temos que o cálculo e as verificações são similares aos casos anteriores assim como a sua análise. Os mínimos quadrados apresentam novamente casos em que algumas das outras situações são mais vantajosas mas o caso II e IV são definitivamente e no geral os mais benéficos. O cálculo dos coeficientes gerais de correção k_1 , k_2 e k_3 foram calculados como já referido e para os mesmos momentos de tempo, contudo, k_1 é agora banzo aquecido, k_2 para a alma e k_3 para o banzo não aquecido. Nos quadros 6.11 e 6.12 estão indicados os coeficientes de correção obtidos.

Quadro 6.11 – Coeficientes de correção k_1 , k_2 e k_3 para a situação II

Tempo (min)	k_1	k_2	k_3
15	1.289	0.929	0.093
60	1.011	0.781	0.179
120	1.001	0.806	0.226

Quadro 6.12 – Coeficientes de correção k_1 , k_2 e k_3 para a situação IV

Tempo (min)	k_1	k_2	k_3
15	1.508	1.091	0.100
60	1.026	0.788	0.167
120	1.003	0.804	0.212

Na obtenção dos quadros de coeficientes de correção apenas foram consideradas as médias aritméticas dos coeficientes de redução para os casos mais favoráveis, isto é, caso II e IV. As situações que apresentaram casos mais vantajosos como sendo o caso I e III foram desprezadas devido à sua minoria.

7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

7.1. Conclusões

7.1.1. Pilares de aço inseridos em paredes

O presente trabalho desenvolvido teve como principais objetivos:

- Compreender a resistência ao fogo de um pilar de aço inserido em paredes de diferentes espessuras;
- Avaliar os gradientes térmicos desenvolvidos na secção transversal dos pilares analisados;
- Comparar as temperaturas dos perfis de aço em contacto com paredes com as temperaturas dadas pelo Eurocódigo 3;
- Propor novas expressões para o cálculo do fator de massividade para perfis de aço inseridos em paredes.

A avaliação da temperatura de elementos estruturais sujeitos a aquecimento diferencial é essencial para o desenvolvimento de métodos analíticos para prever e sugerir novas expressões de cálculo para o fator de forma destes. No princípio deste estudo foram realizados diversos testes de simulação numérica com o programa ABAQUS para a avaliação térmica anteriormente citada. A evolução térmica nos diferentes pontos da secção transversal obtida a partir de cálculos realizados com o programa de elementos finitos foi comparada com o método de cálculo simplificado apresentado na EN 1993- 1-2 (2005) cuja finalidade é a mesma.

Esta comparação levou-nos a constatar que o método prescrito na EN 1993-1-2 (2005), pela curva padrão ISO 834, sugere temperaturas mais elevadas que as obtidas através das simulações numéricas.

Quando estamos perante um perfil com a alma paralela à parede de 7 cm verificamos que as temperaturas acompanham o crescimento da curva padrão mas com valores inferiores, geralmente diferem entre os 700°C e 1000°C para MBNA-ALMA-MBA.

Nos perfis inseridos em paredes de 7 cm com a posição da alma perpendicular às paredes constatamos que, de forma geral, apenas o BA atinge temperaturas muito próximas às da curva ISO 834 a partir de determinado instante de tempo, dependendo do caso estudado. A evolução de temperaturas entre BA e ALMA apresentam valores, para $t=120$ min, com cerca de 400°C no limite máximo e de 200°C no limite inferior. Os diferenciais de temperatura entre ALMA e BNA, para $t=120$ min, rondam valores entre 200 e 1000°C. Neste caso as temperaturas não elevam muito para o BNA pois este encontra-se protegido pela parede.

Quando estamos perante um perfil com a alma paralela à parede de 15 cm verificamos que as temperaturas acompanham o crescimento da curva padrão mas com valores inferiores, geralmente diferem entre os 600°C e 1000°C para MBNA-ALMA-MBA.

Nos perfis inseridos em paredes de 15 cm com a posição da alma perpendicular às paredes constatamos que, de forma geral, apenas o BA atinge temperaturas muito próximas às da curva ISO 834 a partir do instante 30 ou 45 min, dependendo da situação. A evolução de temperaturas entre BA e ALMA apresentam valores, para $t=120$ min, com cerca de 400°C no limite máximo e de 200°C no limite inferior. Os diferenciais de temperatura entre ALMA e MBNA, para $t=120$ min, rondam valores entre 200 e 1000°C. No BNA as temperaturas não são muito elevadas porque o pilar encontra-se resguardado pela parede, com já referido anteriormente.

Podemos verificar que a norma Europeia já referida sobrestima as temperaturas na secção transversal do perfil de aço, quando este se encontra incorporado nas paredes, fato observado pela curva padrão que esta impõe. Posto isto, confirma-se que, se tivermos em conta apenas a distribuição de temperaturas, (desprezando o efeito do “Thermal Bowing”, que não era o objetivo deste estudo) é uma norma conservadora na estimativa da verdadeira resistência ao fogo do elemento e que, assim, atua pelo lado da segurança.

De forma geral, para casos em que a alma se encontra perpendicular à superfície da parede, observa-se que as temperaturas para os banzos expostos ao fogo apresentam valores semelhantes quer pela EN 1993-1-2 (2005), quer pelos resultados das simulações numéricas. O mesmo já não acontece quando se trata da alma e do banzo não exposto, cujas temperaturas neste último se verificam bastante inferiores. A norma já citada prevê uma temperatura exponencial mas uniforme ao longo de todo o perfil de aço cuja veracidade não se verifica com este estudo. Conclui-se, então, que o definido no Eurocódigo 3 para secções de aço inseridos em paredes não é o mais adequado. Os estudos debruçados sobre esta temática têm a finalidade de representar este fator com maior fidelidade.

Como previsto, em pilares de aço em contacto com paredes, os banzos diretamente expostos ao fogo apresentam temperaturas mais elevadas comparando com as do banzo não exposto. Isto provocará maior expansão no banzo aquecido, induzindo momentos de flexão na secção transversal do pilar, provocando assim curvatura térmica.

Foi provado que a formulação EN 1993-1-2 (2005), para o fator de forma pode ser usada, embora seja válida apenas para o banzo exposto ao fogo. Em todos os outros casos, a temperatura em cada zona da secção transversal pode ser calculada em função da temperatura da superfície exposta. A temperatura na zona correspondente é obtida multiplicando a temperatura do banzo exposto por fatores de redução que foram calculados ao longo deste trabalho.

As propostas de novas expressões de cálculo para o fator de massividade de pilares de aço inseridos em paredes surgem com a introdução dos fatores de redução referidos no capítulo anterior.

Comparando as duas orientações da alma em relação á parede, observou-se que a parede com maior espessura apresenta um papel fulcral não só na redução das temperaturas no meio-banzo não exposto ao fogo mas também na redução térmica de todo o perfil. Para situações em que a alma é perpendicular à superfície da parede foi observado um resultado muito interessante: na face não exposta do banzo, as temperaturas eram ligeiramente mais elevada com a parede mais espessa. Pelo contrário no banzo expostos as temperaturas foram mais elevadas para as paredes mais finas.

No âmbito desta investigação, foi apresentada uma proposta de novas expressões para o cálculo do fator de forma em elementos estruturais em contacto com paredes. Grande número dos pilares de edifícios reais tem uma parte incorporada nas paredes do mesmo. Foram apresentadas fórmulas para o caso da alma paralela e perpendicular à superfície da parede nesta tese. Este estudo abordou a questão de cálculo de temperaturas em elementos de aço nas secções transversais com gradientes térmicos, em contradição com as formulações da norma EN 1993-1-2 (2005) que considera a distribuição de temperatura uniforme. O método de cálculo simplificado proposto é válido para todas as secções transversais de aço com dimensões proporcionais às espessuras paredes como nos casos estudados. Outros casos de proporcionalidade entre as dimensões do perfil de aço e da espessura da parede têm que ser estudados.

7.2. Trabalhos futuros

Futuramente, outros estudos semelhantes deveriam ser realizados, nomeadamente, para outras secções transversais de aço inseridas no canto das paredes para que assim se propusessem novas fórmulas para a avaliação da temperatura. Não menos importante será avaliar a curvatura térmica em pilares de perímetro ou exteriores, ou seja, sujeitos a momentos de flexão iniciais bastante elevados. Perante esta situação, a curvatura térmica poderá desempenhar uma função distinta no comportamento do pilar.

Seria interessante, testar pilares com alongamento térmico restringido, com diversos tipos de materiais isolantes, como placas de gesso e de silicato, e o desenvolvimento de novos materiais.

Também seria estimulante realizar testes de fogo no que respeita á curvatura de pilares de aço com vista a avaliar a carga plástica para cada temperatura.

Sugere-se ainda que pilares de materiais distintos, como madeira e aço formados a frio, e com alongamento térmico restrito, sejam estudados quer de forma experimental, quer através de simulações numéricas.

Concluindo, tudo o que respeita a métodos simplificados para projeto ao fogo de todos os tipos de pilares seria fundamental para o desenvolvimento do estudo na área de incêndios estruturais.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAQUS. ABAQUS/standard version 6.7 user's manual: volumes I-III. Pawtucket, Rhode Island: Hibbit, Carlsson & Sorensson, Inc.; 2005.

ABAQUS (2007). <http://www.egr.msu.edu/software/abaqus/Documentation/docs/>. Dassault Systèmes - Abaqus Version 6.7 Documentation.

Anil Agarwal; Lisa Choe; Amit H. Varma. (2013). *Fire design of steel columns: Effects of thermal gradients*. Journal of Constructional Steel Research 93, pp. 107-118.

Burgess I.W., Najjar S.R. (1994). *A Simple Approach to the Behavior of Steel Columns in Fire*. Journal of Constructional Steel Research 31, 115-134.

Cooke, G. M. E., (1988a). *Thermal Bowing and how it affects the design of fire separating construction*, Proceedings of the Interflamm'88, 230-236, London.

Correia A.M., Rodrigues J.P.C., Silva V.P. (2007). *Studies on the fire behaviour of steel columns embedded on walls*. 11th International Conference on Fire Science and Engineering – Interflam, London.

Correia A.M., Rodrigues J.P.C., Silva V.P. (2009a). *Experimental research on the fire behaviour of steel columns embedded on walls*. Application of Structural Fire Engineering, Prague, Czech Republic.

Correia, A. M., Rodrigues, J. P., Silva, V. P., Laim, L. (2009b). *Section factor and steel columns embedded in walls*; Nordic Steel – Construction Conference, Malmö, Sweden.

Correia, A. M.; Rodrigues, J. P., (2009c). *Análise experimental da resistência ao fogo de pilares de aço com dilatação térmica restringida*; VII Congresso CMM – Construção Metálica e Mista, Lisboa.

Correia, A. M.; Rodrigues, J. P., (2009d). *Comportamento termomecânico de pilares de aço inseridos em paredes em caso de incêndio*; VII Congresso CMM – Construção Metálica e Mista, Lisboa.

Correia, A.M., Rodrigues, J.P.C., Silva, V. P. (2009e). *Influence of Brick walls on the Temperature Distribution in Steel Columns in Fire*, Acta Polytechnica – Journal of Advanced Engineering, vol.49 No.1/2009, ISSN 1210-2709.

Correia, A. M., Pires, T. A. C. and Rodrigues, J. P. C., (2010a). *Behaviour of Steel Columns subjected to Fire*, Sixth International Seminar on Fire and Explosion Hazards, Leeds, UK.

Correia A. M., Rodrigues J.P.C. (2010b) *Buckling of Steel and Composite Steel and Concrete Columns in Case of fire*; SDSS’Rio 2010 STABILITY AND DUCTILITY OF STEEL STRUCTURES, Rio de Janeiro, Brazil.

Correia, A.M., Rodrigues, J.P.C., Silva, V. P.; (2010c). Numerical Study on the Behavior of Steel Columns Embedded on Brick Walls Subjected to Fire; International Symposium “SSCS 2010 - Steel Structures: Culture & Sustainability 2010”, Istanbul, Turkey.

Correia, A. M., Rodrigues, J.P.C., Silva V.P. (2010). *A Simplified Calculation Method for Temperature Evaluation of Steel Columns Embedded in Walls*; Fire and Materials, DOI:10.1002/fam.1063.

Correia, A., Rodrigues, J. (2011). *Fire Resistance of Steel Columns with Restrained Thermal Elongation*, Fire Safety Journal, vol. 67, pp. 593-601.

Correia, A., Rodrigues, J. (2012). *Experimental and Numerical Tests on Building Steel Columns Subjected to Fire*. ISISE – Institute for Sustainability and Innovation on Structural Engineering Polytechnic Institute of Coimbra, Portugal.

Correia, (2011b). *Fire Resistance of Steel and Composite Steel-Concrete Columns. Tese de doutoramento*. Universidade de Coimbra.

Correia, A.M., Rodrigues, J.P. e Vila Real, P. (2012). Parametric Study on the Behaviour of Steel Columns Embedded on Walls. Proceedings of the 7th International Conference on Structures in Fire, Zurique.

Dassault Systèmes (2012). Abaqus 6.12 - Abaqus/CAE User's Manual, Providence.

Dassault Systèmes (2012). Abaqus 6.12 - Getting Started with Abaqus: Interactive Edition, Providence.

Dwaikat, M., Kodur.,(2010). *A simplified approach for evaluating plastic axial and moment capacity curves for beam_columns with non-uniform thermal gradients*. Engineering Structures 32 (2010) 1423_1436.

Dwaikat, M., Kodur., R. Quiel, S., Garlock, M. (2011). *Experimental behavior of steel beam_columns subjected to fire-induced thermal gradients*. Journal of Constructional Steel Research. vol. 67, Issue 1, pp. 30-38.

Foster, S., Chladná, M., Hsieh, C., Burgess, I. e Plank, R. (2007). *Thermal and structural behaviour of a full-scale composite building subject to a severe compartment fire*. Fire Safety Journal, Vol. 42, Issue 3, pp. 183-199.

Garlock, M., Kruppa, J., Li, G.-Q. e Zhao, B. (2014). *White Paper on Fire Behavior of Steel Structures (Draft)*. National Institute of Standards and Technology (NIST), Washington, D. C.

Garlock, M. E. M., Quiel, S. E, (2006b). *Combined axial load and moment capacity of fire-exposed beam-columns with thermal gradients*. Proc. 4th International Workshop for Structures in Fire (SIF 06), Vol. I, University of Aveiro, 187-198, Portugal.

Garlock, M., Quiel, S. (2007). *Mechanics of Wide-flanged Steel Sections that Develop Thermal Gradients Due to Fire Exposure*. Steel Structures. vol. 7, pp. 153-162.

Garlock, M., Quiel, S. (2007). *The Behavior of Steel Perimeter Columns in a High-Rise Building under Fire*. Engineering Journal. vol. 40, Issue 4, pp. 359-372.

Garlock, M., Quiel, S. (2008). *Plastic Axial Load and Moment Interaction Curves for Fire-Exposed Steel Sections with Thermal Gradients*. Journal of Structural Engineering. pp. 874-880.

Guimarães, P. (2007). *Sobre o Dimensionamento do Revestimento Contra Fogo de Estruturas de Aço*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

ISO (1999). *ISO 834-1:1999 Fire-resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements*. International Organization for Standardization, Genebra.

Kimura, E. (2009). *Análise Termoestrutural de Pilares de Aço em Situação de Incêndio*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

Kimura, E., Neto, J., Silva, V. (2009). *Análise Numérica de Pilares de Aço em Situação de Incêndio Considerando os Efeitos da Compartimentação em Ambiente em Chamas Minerva*. vol. 6, Issue 2, pp. 127-137.

Kirchhof, L., Neto, J., Malite, M., Gonçalves, R. (2005). *Análise Numérica de Vigas Mistas Aço-Concreto em Temperatura Ambiente e em Situação de Incêndio*. Seminas: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina. vol. 26. Issue1. pp. 69-82.

Landesmann, A., Batista, E., Alves, J. (2005). *Implementation of Advanced Analysis Method for Steel-Framed Structures Under Fire Conditions*. Fire Safety Journal. vol. 40, pp. 339-366.

NP EN 1991-1-2 (2010). *Eurocódigo 1 - Acções em estruturas, Parte 1-2: Acções gerais, Acções em estruturas expostas ao fogo*. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

NP EN 1992-1-2 (2010). *Eurocódigo 2 - Projecto de estruturas de betão, Parte 1-2: Regras gerais, Verificação da resistência ao fogo*. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

NP EN 1993-1-2 (2010). *Eurocódigo 3 - Projecto de estruturas de aço, Parte 1-2: Regras gerais, Verificação da resistência ao fogo*. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

Quiel, S., Garlock, M. (2007). *Mechanics of Wide-flanged Steel Sections that Develop Thermal Gradients Due to Fire Exposure*. Steel Structures 7, 2007, 153-162., 2010.

Quiel, S., Garlock, M. (2008). *Plastic Axial Load and Moment Interaction Curves for Fire-Exposed Steel Sections with Thermal Gradients*. Journal of Structural Engineering. pp. 874-880.

Quiel, S., Garlock, M. (2008). *A closed-form analysis of perimeter member behavior in a steel building frame subject to fire*. Engineering Structures. vol. 30 pp. 3276-3284.

Quiel, S., Garlock, M. (2008). *Parameters for Modeling a High-Rise Steel Building Frame Subject to Fire*. Journal of Fire Engineering. vol. 1 pp. 114-134.

Quiel, S. (2009). *Behavior and Analysis of Fire-Exposed Steel Beam-Columns that Develop Thermal Gradients*. Tese De Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e de Ambiente, Princeton University In Candidacy, Candidacy. 1 vol.

Quiel, S., Garlock, M. (2010). *Closed-Form Prediction of the Thermal and Structural Response of a Perimeter Column in a Fire*. The Open Construction and Building Technology Journal. vol. 4, pp. 64-78.

Quiel, S., Garlock, M., Paya-Zaforteza, M. (2010). *Parameters for Modeling a High-Rise Steel Building Frame Subject to Fire*. Journal of Structural Fire Engineering. vol. 1, Issue 2, pp. 115-134.

Quiel, S., Garlock, M., Paya-Zaforteza, M. (2011). *Closed-Form Procedure for Predicting the Capacity and Demand of Steel Beam-Columns under Fire*. Journal of Structural Engineering. vol. 137, pp. 967-976.

Rotter, J. M., Usmani, A.S., (2000). *Fundamental Principles of Structural Behavior under Thermal Effects*. Proceedings of First International Workshop on Structures in Fire, Denmark.

Silva, V. (2006). *Determination of the Temperature of Thermally unprotected Steel Members under Fire Situations: considerations on the Section Factor*. Latin American Journal of Solids and Structures, vol. 3, pp 113-125.

Tan K. H., Toh W.S., Huang Z.F., Phng G.H. (2007). *Structural responses of restrained steel columns at elevated temperatures*. Part 1: Experiments. Engineering Structures 29, 1641-1652.

Tan, K., Yuan, W. (2008). *Buckling of elastically restrained steel columns under longitudinal non-uniform temperature distribution*. Journal of Constructional Steel Research, vol. 64, pp. 51–61.

Tsalikis, C. T., Koltsakis, E. K., Baniotopoulos, C. C. (2009). *Steel beam-columns under thermal gradient*, Proc. of int. conference Application of Structural Fire Engineering, 2009, Prague, Czech Republic.

Tsalikis, C. T., Koltsakis, E. K., Baniotopoulos, C. C. (2011). *Elastic buckling of steel columns under thermal gradient*, Proc. of 2nd Application of Structural Fire Engineering, 2011, Czech Republic.

Usmani, A.S., Rotter, J. M., Lamont, S., Sanad, A. M., Gilie, M. (2001). *Fundamental principles of structural behavior under thermal effects*. Fire Safety Journal (36), 721-744.

Vila Real, P.M.M., Lopes, N., Simões da Silva, L., Piloto, P., Franssen, J.M., (2004). *Numerical modelling of steel beam-columns in case of fire - comparisons with the Eurocode 3*, Fire Safety Journal 39, 23-39.

Wald, F., Chloubá, J., Uhlír A., Kallerová, P., Stujberová. (2009). *Temperatures During Fire Tests on Structure and its Prediction According to Eurocodes M*. Fire Safety Journal, vol. 44, pp. 135-146.

Wang, H., Tan, H., (2006). *Residual Area method for heat transfer analysis of concrete-encased I-sections in fire*. Engineering Structures. vol.28, pp. 411-422.

Wang, W., Li, G. (2009). *Behavior of Steel Columns in Fire with Partial Damage to Fire Protection*. Journal of Constructional Steel Research. Vol. 65, pp. 1392-1400.

ANEXO A. Temperaturas nos pilares com alma paralela à parede

A.1. Pilares inseridos em parede de 7 cm - Gráficos

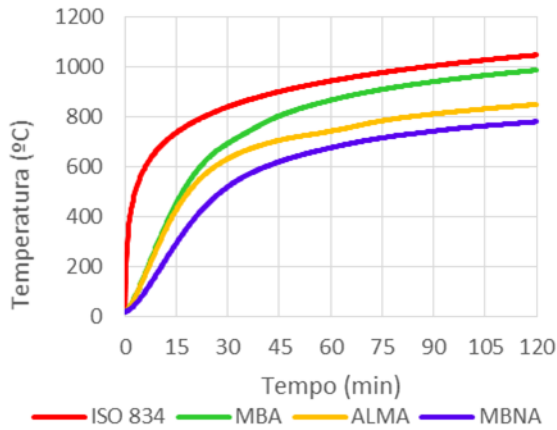


Figura A.1.1: Gráfico HD 320x127

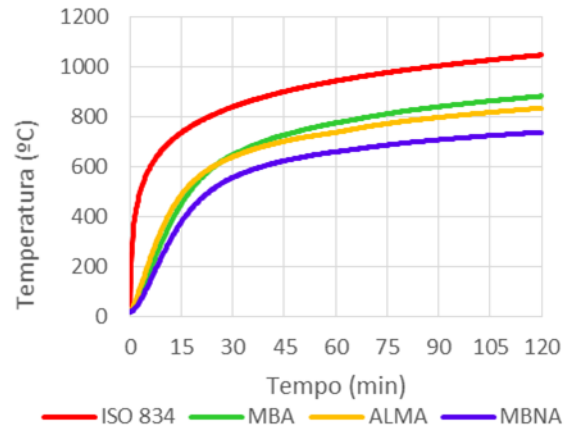


Figura A.1.4: Gráfico IPE 180

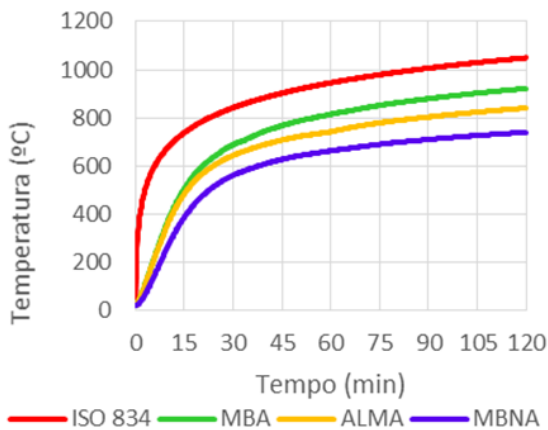


Figura A.1.2: Gráfico HE 160 A

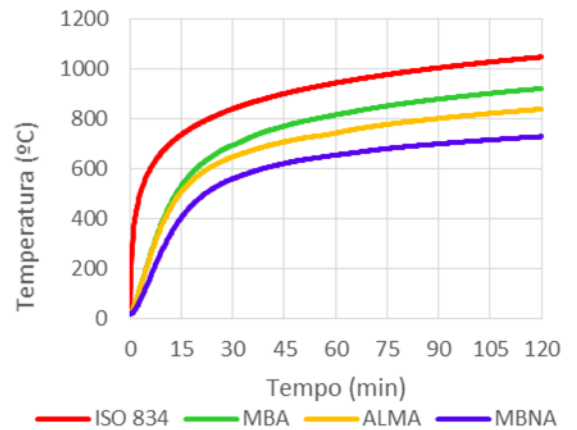


Figura A.1.5: Gráfico HE 160 AA

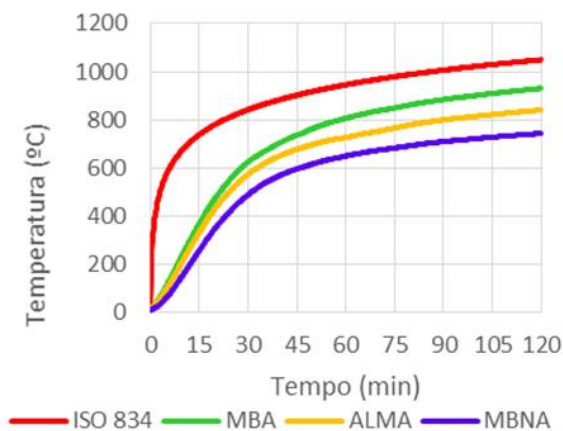


Figura A.1.3: Gráfico HE 160 M

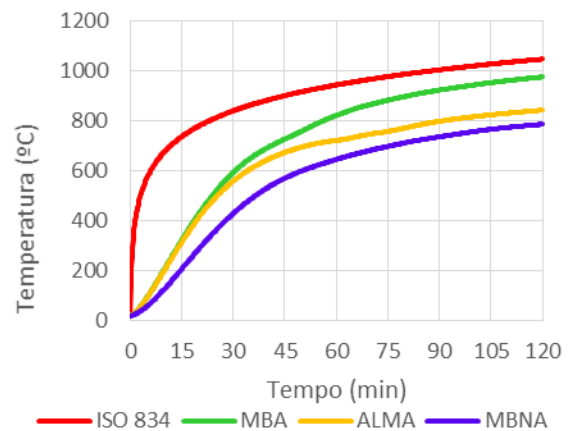


Figura A.1.6: Gráfico HE 450 M

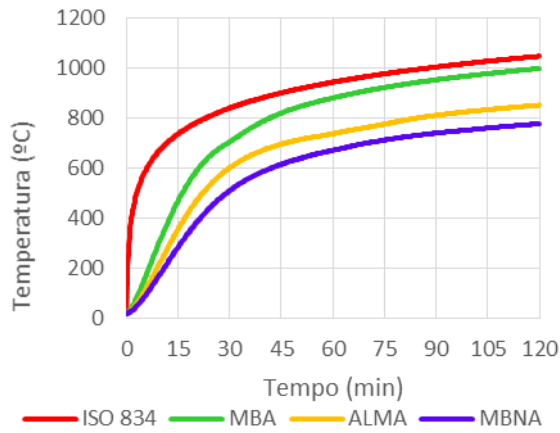


Figura A.1.7: Gráfico HP 360x174

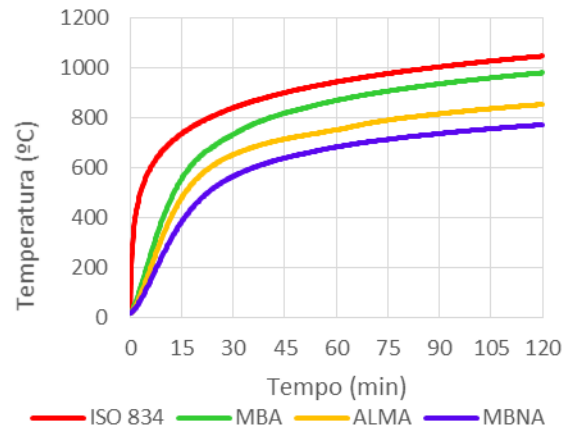


Figura A.1.10: Gráfico HP 250x62

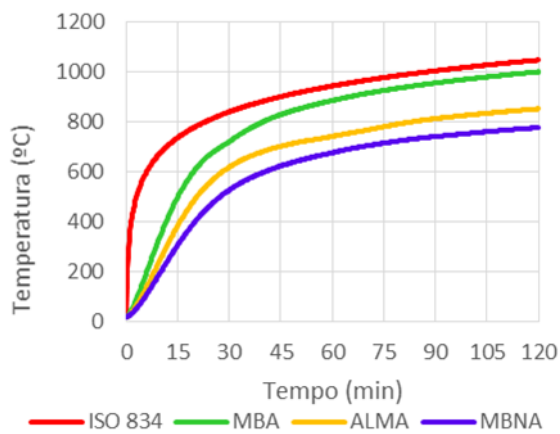


Figura A.1.8: Gráfico HP 360x152

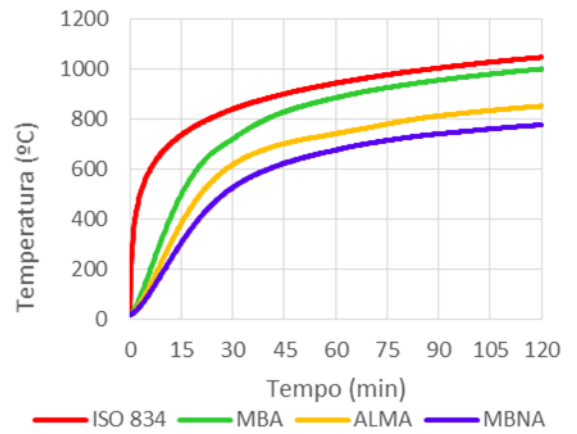


Figura A.1.11: Gráfico HP 305x79

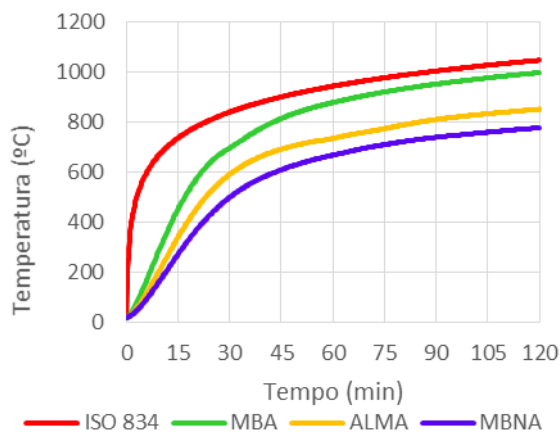


Figura A.1.9: Gráfico HP 400x194

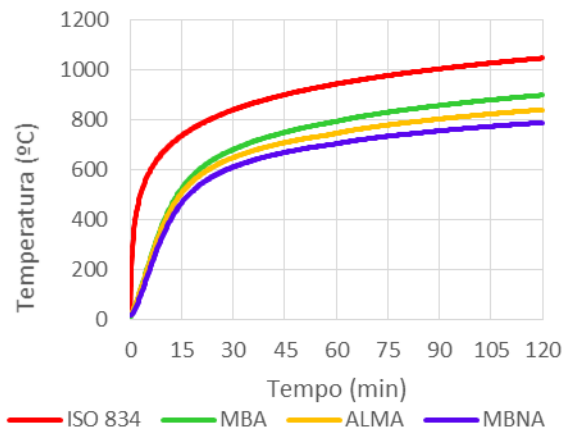


Figura A.1.12: Gráfico IPEA 100

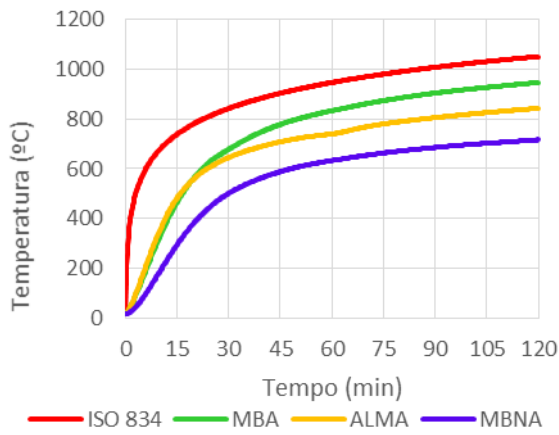


Figura A.1 13: Gráfico IPE 400

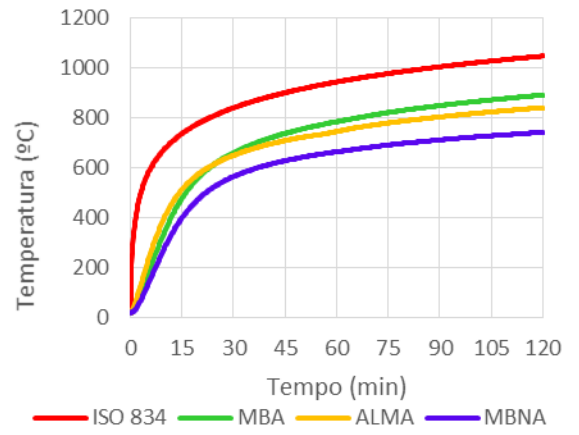


Figura A.1.16: Gráfico IPEA 180

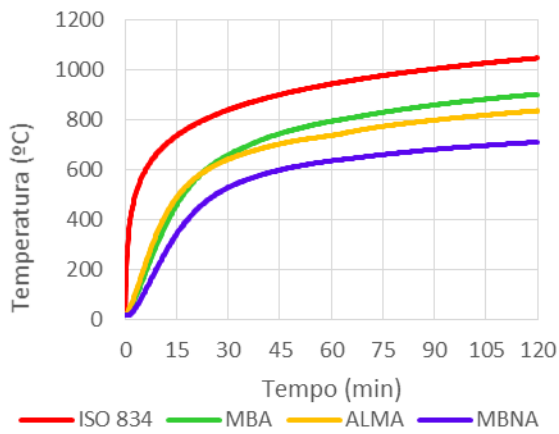


Figura A.1.14: Gráfico IPEO 270

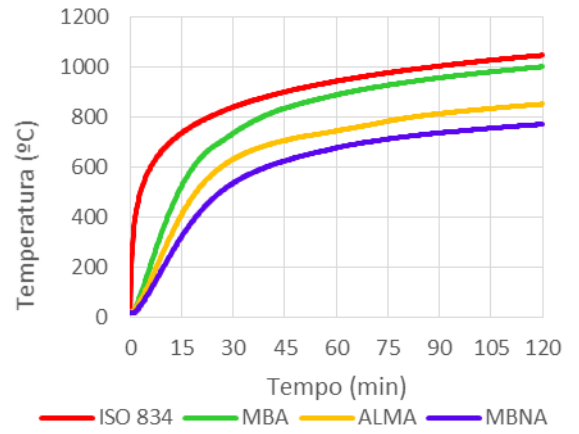


Figura A.1.17: Gráfico UBP 356x368x133

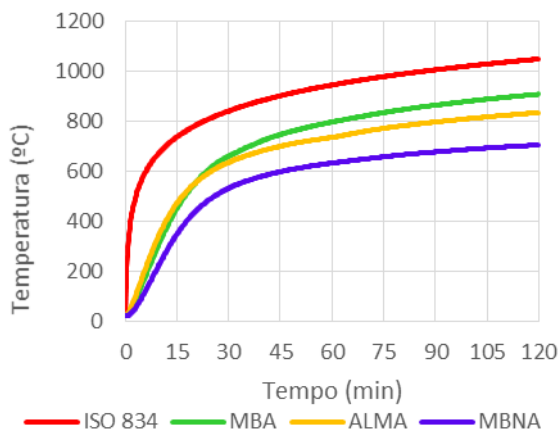


Figura A.1.15: Gráfico UB 254x102x28

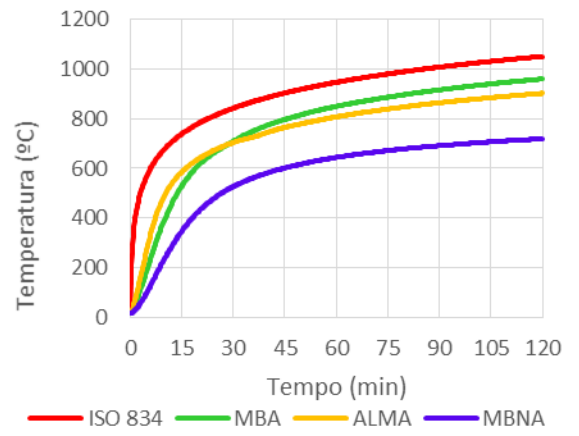


Figura A.1.18: Gráfico UB 406x178x54

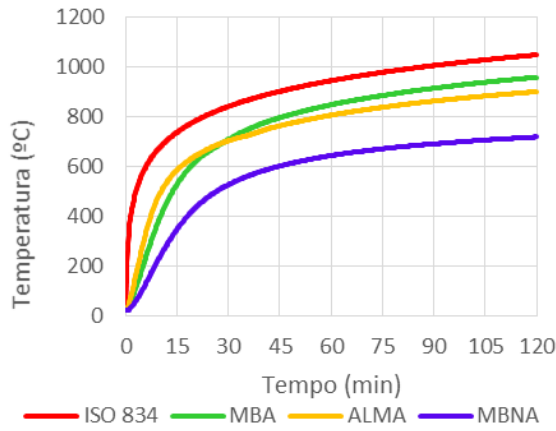


Figura A.1.19: Gráfico UC 254x254x107

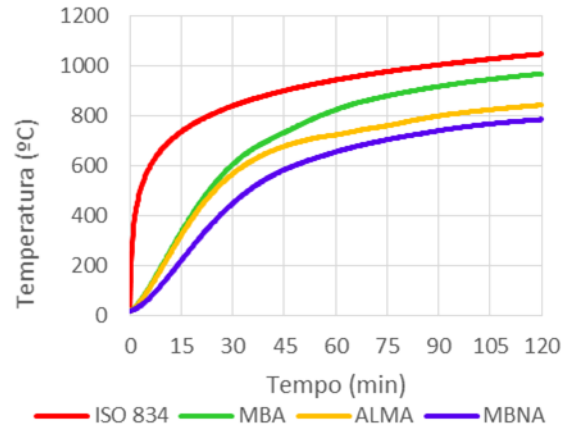


Figura A.1.22: Gráfico UC 356x400x551

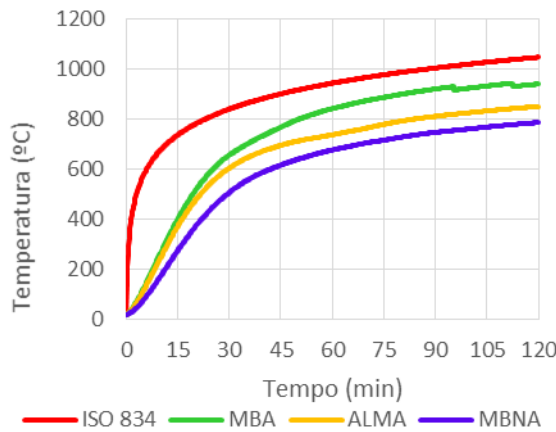


Figura A.1 20: Gráfico W 250x250x131

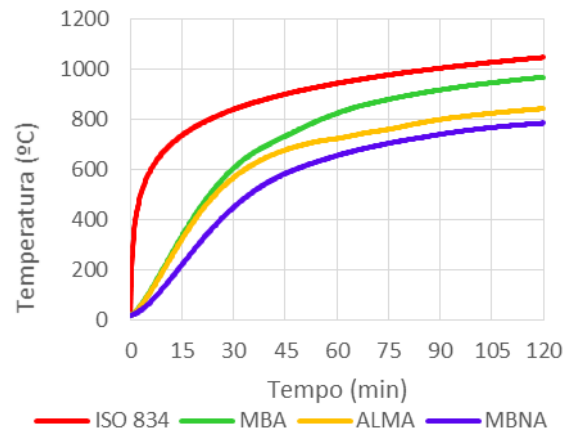


Figura A.1.23: Gráfico W 460x280x235

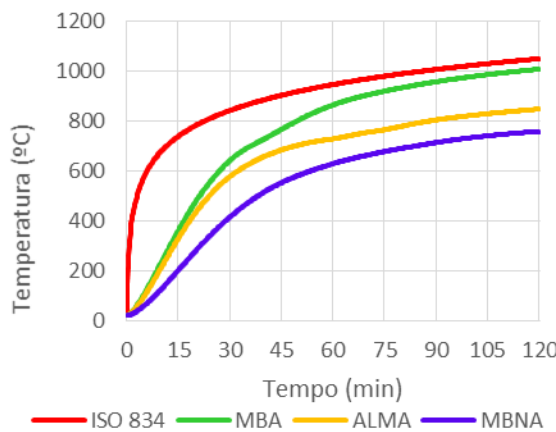
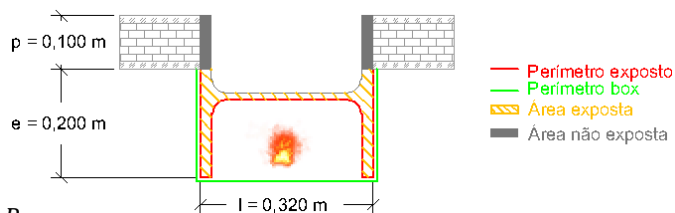


Figura A.1 21:Gráfico W 920x420x390

A.2. Pilares inseridos em parede de 7 cm - Quadros

A.2.1. HD 320x127



Quadro A.2.1: HD 320x127 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{P_{exp}}{A_{exp}}$ Figura A.2.1: HD 320x127

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	513	457.300	429.240	295.880	0.891	0.837	0.577
60	935	868.150	744.250	677.300	0.929	0.796	0.724
120	1046	988.370	850.570	781.840	0.945	0.813	0.747
MÉDIA					0.922	0.815	0.683

Quadro A.2.2: HD 320x127 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{P_{exp}}{A_{tot.perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	437	457.300	429.240	295.880	1.046	0.982	0.677
60	927	868.150	744.250	677.300	0.937	0.803	0.731
120	1045	988.370	850.570	781.840	0.946	0.814	0.748
MÉDIA					0.976	0.866	0.719

Quadro A.2.3: HD 320x127 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{P_{box}}{A_{exp}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	428	457.300	429.240	295.880	1.068	1.003	0.691
60	926	868.150	744.250	677.300	0.938	0.804	0.731
120	1045	988.370	850.570	781.840	0.946	0.814	0.748
MÉDIA					0.984	0.874	0.724

Quadro A.2.4: HD 320x127 - Caso IV: $\frac{Am}{V} = \frac{P_{box}}{A_{tot.perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	355	457.300	429.240	295.880	1.288	1.209	0.833
60	910	868.150	744.250	677.300	0.954	0.818	0.744
120	1043	988.370	850.570	781.840	0.948	0.816	0.750
MÉDIA					1.063	0.947	0.776

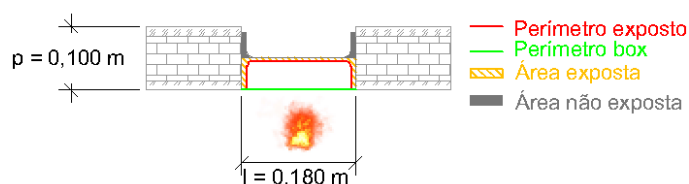
A.2.2. IPE 180


Figura A.2.2: IPE 180

 Quadro A.2.5: IPE 180 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{P_{exp}}{A_{exp}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	648	454.210	489.470	380.580	0.701	0.755	0.587
60	941	776.600	738.490	660.960	0.825	0.785	0.702
120	1047	884.150	836.190	739.550	0.844	0.799	0.706
MÉDIA					0.790	0.780	0.665

 Quadro A.2.6: IPE 180 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{P_{exp}}{A_{tot.perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	583	454.210	489.470	380.580	0.779	0.840	0.653
60	939	776.600	738.490	660.960	0.827	0.786	0.704
120	1047	884.150	836.190	739.550	0.844	0.799	0.706
MÉDIA					0.817	0.808	0.688

 Quadro A.2.7: IPE 180 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{P_{box}}{A_{exp}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	579	454.210	489.470	380.580	0.784	0.845	0.657
60	939	776.600	738.490	660.960	0.827	0.786	0.704
120	1047	884.150	836.190	739.550	0.844	0.799	0.706
MÉDIA					0.819	0.810	0.689

 Quadro A.2.8: IPE 180 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{P_{box}}{A_{tot.perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	493	454.210	489.470	380.580	0.921	0.993	0.772
60	933	776.600	738.490	660.960	0.832	0.792	0.708
120	1046	884.150	836.190	739.550	0.845	0.799	0.707
MÉDIA					0.866	0.861	0.729

A.2.3. HE 160 A

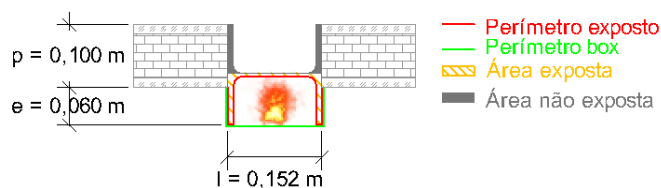


Figura A.2.3: HE 160 A

Quadro A.2.9: HE 160 A - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	666	505.530	484.450	386.740	0.759	0.727	0.581
60	941	814.460	741.780	662.340	0.866	0.788	0.704
120	1048	921.650	840.320	739.300	0.879	0.802	0.705
MÉDIA					0.835	0.773	0.663

Quadro A.2.10: HE 160 A - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	573	505.530	484.450	386.740	0.882	0.845	0.675
60	938	814.460	741.780	662.340	0.868	0.791	0.706
120	1047	921.650	840.320	739.300	0.880	0.803	0.706
MÉDIA					0.877	0.813	0.696

Quadro A.2.11: HE 160 A - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	542	505.530	484.450	386.740	0.933	0.894	0.714
60	937	814.460	741.780	662.340	0.869	0.792	0.707
120	1046	921.650	840.320	739.300	0.881	0.803	0.707
MÉDIA					0.894	0.830	0.709

Quadro A.2.12: HE 160 A - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	407	505.530	484.450	386.740	1.242	1.190	0.950
60	922	814.460	741.780	662.340	0.883	0.805	0.718
120	1044	921.650	840.320	739.300	0.883	0.805	0.708
MÉDIA					1.003	0.933	0.792

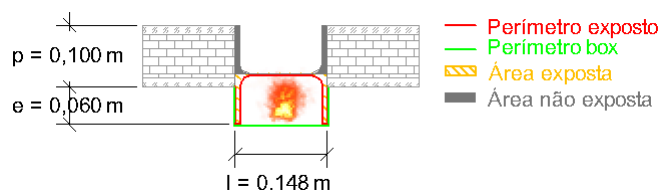
A.2.4. HE 160 AA


Figura A.2.4: HE 160 AA

 Quadro A.2.13: HE 160 AA - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	689	533.800	509.220	406.250	0.775	0.739	0.590
60	942	817.290	744.130	655.500	0.868	0.790	0.696
120	1048	922.760	839.820	729.730	0.880	0.801	0.696
MÉDIA					0.841	0.777	0.661

 Quadro A.2.14: HE 160 AA - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	624	533.800	509.220	406.250	0.855	0.816	0.651
60	940	817.290	744.130	655.500	0.869	0.792	0.697
120	1047	922.760	839.820	729.730	0.881	0.802	0.697
MÉDIA					0.869	0.803	0.682

 Quadro A.2.15: HE 160 AA - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	637	533.800	509.220	406.250	0.838	0.799	0.638
60	940	817.290	744.130	655.500	0.869	0.792	0.697
120	1047	922.760	839.820	729.730	0.881	0.802	0.697
MÉDIA					0.863	0.798	0.677

 Quadro A.2.16: HE 160 AA - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	531	533.800	509.220	406.250	1.005	0.959	0.765
60	937	817.290	744.130	655.500	0.872	0.794	0.700
120	1046	922.760	839.820	729.730	0.882	0.803	0.698
MÉDIA					0.920	0.852	0.721

A.2.5. HE 450 M

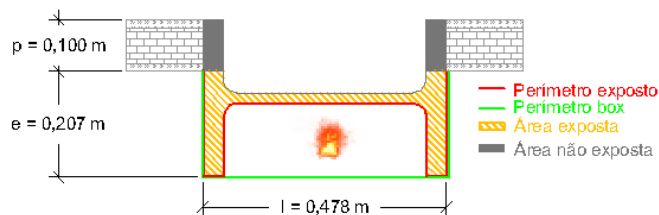


Figura A.2.5: HE 450 M

Quadro A.2.17: HE 450 M - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	357	323.610	315.490	207.990	0.906	0.884	0.583
60	911	823.230	722.380	646.750	0.904	0.793	0.710
120	1043	977.460	844.200	787.490	0.937	0.809	0.755
MÉDIA					0.916	0.829	0.683

Quadro A.2.18: HE 450 M - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{A_{tot.perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	294	323.610	315.490	207.990	1.101	1.073	0.707
60	858	823.230	722.380	646.750	0.959	0.842	0.754
120	1041	977.460	844.200	787.490	0.939	0.811	0.756
MÉDIA					1.000	0.909	0.739

Quadro A.2.19: HE 450 M - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	296	323.610	315.490	207.990	1.093	1.066	0.703
60	830	823.230	722.380	646.750	0.992	0.870	0.779
120	1041	977.460	844.200	787.490	0.939	0.811	0.756
MÉDIA					1.008	0.916	0.746

Quadro A.2.20: HE 450 M - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{A_{tot.perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	242	323.610	315.490	207.990	1.337	1.304	0.859
60	1030	823.230	722.380	646.750	0.799	0.701	0.628
120	1039	977.460	844.200	787.490	0.941	0.813	0.758
MÉDIA					1.026	0.939	0.748

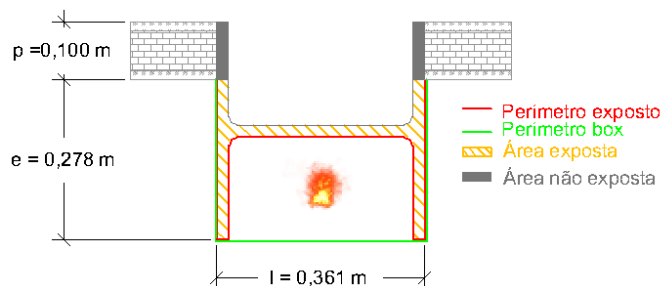
A.2.6. HP 360x174


Figura A.2.6: HP 360x174

 Quadro A.2.21: HP 360x174 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	469	471.070	357.680	286.020	1.004	0.763	0.610
60	931	882.240	738.930	672.640	0.948	0.794	0.722
120	1045	1000.060	853.050	778.640	0.957	0.816	0.745
MÉDIA					0.970	0.791	0.692

 Quadro A.2.22: HP 360x174 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	414	471.070	357.680	286.020	1.138	0.864	0.691
60	924	882.240	738.930	672.640	0.955	0.800	0.728
120	1044	1000.060	853.050	778.640	0.958	0.817	0.746
MÉDIA					1.017	0.827	0.722

 Quadro A.2.23: HP 360x174 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	387	471.070	357.680	286.020	1.217	0.924	0.739
60	918	882.240	738.930	672.640	0.961	0.805	0.733
120	1044	1000.060	853.050	778.640	0.958	0.817	0.746
MÉDIA					1.045	0.849	0.739

 Quadro A.2.24: HP 360x174 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	336	471.070	357.680	286.020	1.402	1.065	0.851
60	904	882.240	738.930	672.640	0.976	0.817	0.744
120	1043	1000.060	853.050	778.640	0.959	0.818	0.747
MÉDIA					1.112	0.900	0.781

A.2.7. HP 250x62

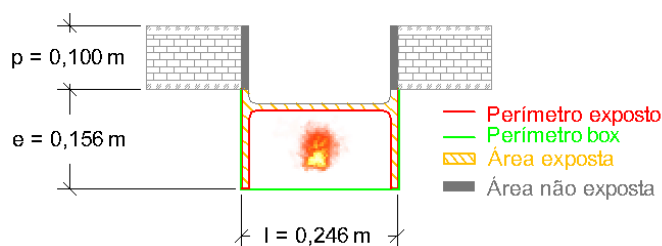


Figura A.2.7: HP 250x62

Quadro A.2.25: HP 250x62 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	627	558.040	481.830	385.790	0.890	0.768	0.615
60	940	871.550	753.250	684.350	0.927	0.801	0.728
120	1047	982.030	855.190	773.320	0.938	0.817	0.739
MÉDIA					0.918	0.796	0.694

Quadro A.2.26: HP 250x62 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	563	558.040	481.830	385.790	0.991	0.856	0.685
60	938	871.550	753.250	684.350	0.929	0.803	0.730
120	1046	982.030	855.190	773.320	0.939	0.818	0.739
MÉDIA					0.953	0.825	0.718

Quadro A.2.27: HP 250x62 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	552	558.040	481.830	385.790	1.011	0.873	0.699
60	938	871.550	753.250	684.350	0.929	0.803	0.730
120	1046	982.030	855.190	773.320	0.939	0.818	0.739
MÉDIA					0.960	0.831	0.723

Quadro A.2.28: HP 250x62 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	472	558.040	481.830	385.790	1.182	1.021	0.817
60	931	871.550	753.250	684.350	0.936	0.809	0.735
120	1045	982.030	855.190	773.320	0.940	0.818	0.740
MÉDIA					1.019	0.883	0.764

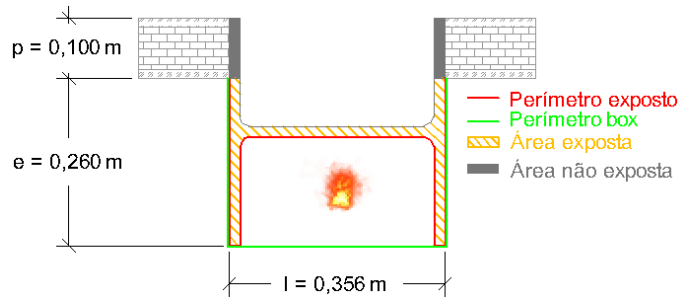
A.2.8. HP 360x152


Figura A.2.8: HP 360x152

 Quadro A.2.29: HP 360x152 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	506	501.320	386.160	308.440	0.991	0.763	0.610
60	934	887.100	743.330	677.460	0.950	0.796	0.725
120	1046	1001.980	853.310	778.110	0.958	0.816	0.744
MÉDIA					0.966	0.792	0.693

 Quadro A.2.30: HP 250x62 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	452	501.320	386.160	308.440	1.109	0.854	0.682
60	929	887.100	743.330	677.460	0.955	0.800	0.729
120	1045	1001.980	853.310	778.110	0.959	0.817	0.745
MÉDIA					1.008	0.824	0.719

 Quadro A.2.31: HP 250x62 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	420	501.320	386.160	308.440	1.194	0.919	0.734
60	924	887.100	743.330	677.460	0.960	0.804	0.733
120	1044	1001.980	853.310	778.110	0.960	0.817	0.745
MÉDIA					1.038	0.847	0.738

 Quadro A.2.32: HP 250x62 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	366	501.320	386.160	308.440	1.370	1.055	0.843
60	914	887.100	743.330	677.460	0.971	0.813	0.741
120	1043	1001.980	853.310	778.110	0.961	0.818	0.746
MÉDIA					1.100	0.895	0.777

A.2.9. HP 305x79

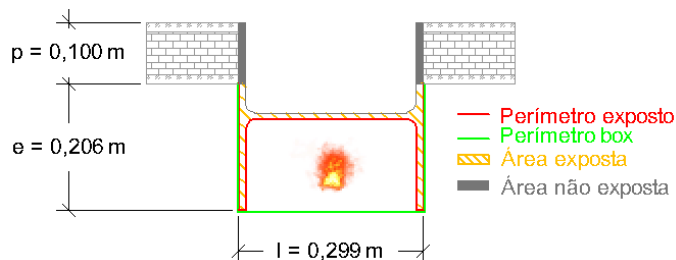
Quadro A.2.33: HP 305x79 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Figura A.2.9: HP 305x79

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	615	547.580	477.810	375.490	0.934	0.777	0.611
60	940	887.280	752.180	682.940	0.944	0.800	0.727
120	1047	996.780	854.060	771.960	0.952	0.816	0.737
MÉDIA					0.943	0.798	0.691

Quadro A.2.34: HP 250x62 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	561	547.580	477.810	375.490	1.024	0.852	0.669
60	938	887.280	752.180	682.940	0.946	0.802	0.728
120	1046	996.780	854.060	771.960	0.953	0.817	0.738
MÉDIA					0.974	0.823	0.712

Quadro A.2.35: HP 250x62 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	540	547.580	477.810	375.490	1.064	0.885	0.695
60	937	887.280	752.180	682.940	0.947	0.803	0.729
120	1046	996.780	854.060	771.960	0.953	0.817	0.738
MÉDIA					0.988	0.835	0.721

Quadro A.2.36: HP 250x62 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	475	547.580	477.810	375.490	1.210	1.006	0.791
60	932	887.280	752.180	682.940	0.952	0.807	0.733
120	1045	996.780	854.060	771.960	0.954	0.817	0.739
MÉDIA					1.039	0.877	0.754

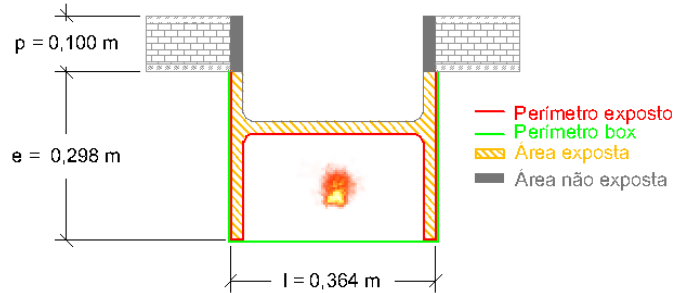
A.2.10. HP 400x194


Figura A.2.10: HP 400x194

 Quadro A.2.37: HP 400x194 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	453	454.170	342.020	273.580	1.003	0.755	0.604
60	929	887.800	736.240	669.590	0.947	0.793	0.721
120	1045	999.340	853.010	778.570	0.956	0.816	0.745
MÉDIA					0.969	0.788	0.690

 Quadro A.2.38: HP 400x194 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	400	454.170	342.020	273.580	1.135	0.855	0.684
60	921	887.800	736.240	669.590	0.955	0.799	0.727
120	1044	999.340	853.010	778.570	0.957	0.817	0.746
MÉDIA					1.016	0.824	0.719

 Quadro A.2.39: HP 400x194 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	368	454.170	342.020	273.580	1.234	0.929	0.743
60	914	887.800	736.240	669.590	0.963	0.806	0.733
120	1043	999.340	853.010	778.570	0.958	0.818	0.746
MÉDIA					1.052	0.851	0.741

 Quadro A.2.40: HP 400x194 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	320	454.170	342.020	273.580	1.419	1.069	0.855
60	895	887.800	736.240	669.590	0.983	0.823	0.748
120	1042	999.340	853.010	778.570	0.959	0.819	0.747
MÉDIA					1.120	0.903	0.783

A.2.11. IPEA 100

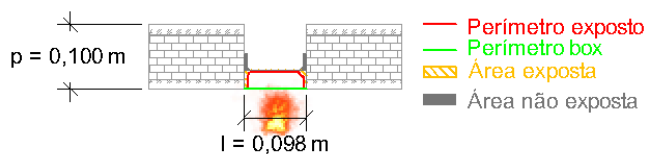


Figura A.2.11: IPEA 100

Quadro A.2.41: IPEA 100 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{P_{exp}}{A_{exp}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	226	526.980	509.130	469.670	2.332	2.253	2.078
60	854	795.420	747.460	705.650	0.931	0.875	0.826
120	1037	900.340	841.830	789.800	0.868	0.812	0.762
MÉDIA					1.377	1.313	1.222

Quadro A.2.42: IPEA 100 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{P_{exp}}{A_{tot.perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	165	526.980	509.130	469.670	3.194	3.086	2.846
60	811	795.420	747.460	705.650	0.981	0.922	0.870
120	1028	900.340	841.830	789.800	0.876	0.819	0.768
MÉDIA					1.683	1.609	1.495

Quadro A.2.43: IPEA 100 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{P_{box}}{A_{exp}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	168	526.980	509.130	469.670	3.137	3.031	2.796
60	900	795.420	747.460	705.650	0.884	0.831	0.784
120	1030	900.340	841.830	789.800	0.874	0.817	0.767
MÉDIA					1.632	1.559	1.449

Quadro A.2.44: IPEA 100 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{P_{box}}{A_{tot.perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	123	526.980	509.130	469.670	4.284	4.139	3.818
60	646	795.420	747.460	705.650	1.231	1.157	1.092
120	996	900.340	841.830	789.800	0.904	0.845	0.793
MÉDIA					2.140	2.047	1.901

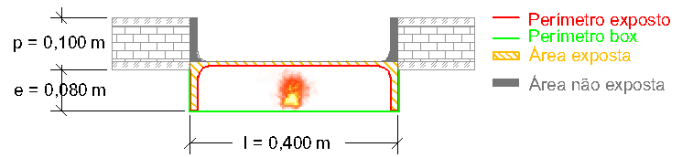
A.2.12. IPE 400


Figura A.2.12: IPE 400

 Quadro A.2.45: IPE 400 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	607	467.315	483.639	296.591	0.770	0.797	0.489
60	940	832.635	739.359	633.163	0.886	0.787	0.674
120	1047	945.119	841.937	715.946	0.903	0.804	0.684
MÉDIA					0.853	0.796	0.615

 Quadro A.2.46: IPE 400 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	523	467.315	483.639	296.591	0.894	0.925	0.567
60	937	832.635	739.359	633.163	0.889	0.789	0.676
120	1046	945.119	841.937	715.946	0.904	0.805	0.684
MÉDIA					0.895	0.840	0.642

 Quadro A.2.47: IPE 400 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	553	467.315	483.639	296.591	0.845	0.875	0.536
60	938	832.635	739.359	633.163	0.888	0.788	0.675
120	1046	945.119	841.937	715.946	0.904	0.805	0.684
MÉDIA					0.879	0.823	0.632

 Quadro A.2.48: IPE 400 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	459	467.315	483.639	296.591	1.018	1.054	0.646
60	930	832.635	739.359	633.163	0.895	0.795	0.681
120	1045	945.119	841.937	715.946	0.904	0.806	0.685
MÉDIA					0.939	0.885	0.671

A.2.13. IPEA 180

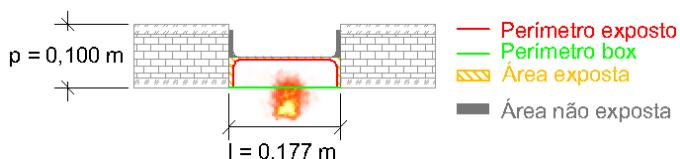


Figura A.2.13: IPEA 180

Quadro A.2.49: IPEA 180 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	675	479.780	514.780	401.520	0.711	0.763	0.595
60	942	786.050	746.680	665.130	0.834	0.793	0.706
120	1048	892.830	842.140	743.490	0.852	0.804	0.709
MÉDIA					0.799	0.786	0.670

Quadro A.2.50: IPEA 180 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	622	479.780	514.780	401.520	0.771	0.828	0.646
60	940	786.050	746.680	665.130	0.836	0.794	0.708
120	1047	892.830	842.140	743.490	0.853	0.804	0.710
MÉDIA					0.820	0.809	0.688

Quadro A.2.51: IPEA 180 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	620	479.780	514.780	401.520	0.774	0.830	0.648
60	940	786.050	746.680	665.130	0.836	0.794	0.708
120	1047	892.830	842.140	743.490	0.853	0.804	0.710
MÉDIA					0.821	0.810	0.688

Quadro A.2.52: IPEA 180 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	540	479.780	514.780	401.520	0.888	0.953	0.744
60	937	786.050	746.680	665.130	0.839	0.797	0.710
120	1046	892.830	842.140	743.490	0.854	0.805	0.711
MÉDIA					0.860	0.852	0.721

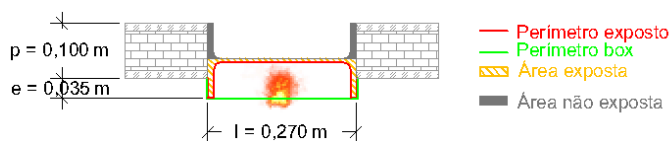
A.2.14. IPEO 270


Figura A.2.14: IPEO 270

 Quadro A.2.53: IPEO 270 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	612	461.860	491.590	344.650	0.755	0.803	0.563
60	940	795.750	738.510	637.000	0.847	0.786	0.678
120	1047	903.980	837.590	711.660	0.863	0.800	0.680
MÉDIA					0.822	0.796	0.640

 Quadro A.2.54: IPEO 270 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	523	461.860	491.590	344.650	0.883	0.940	0.659
60	937	795.750	738.510	637.000	0.849	0.788	0.680
120	1046	903.980	837.590	711.660	0.864	0.801	0.680
MÉDIA					0.866	0.843	0.673

 Quadro A.2.55: IPEO 270 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	547	461.860	491.590	344.650	0.844	0.899	0.630
60	938	795.750	738.510	637.000	0.848	0.787	0.679
120	1046	903.980	837.590	711.660	0.864	0.801	0.680
MÉDIA					0.852	0.829	0.663

 Quadro A.2.56: IPEO 270 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	446	461.860	491.590	344.650	1.036	1.102	0.773
60	928	795.750	738.510	637.000	0.857	0.796	0.686
120	1045	903.980	837.590	711.660	0.865	0.802	0.681
MÉDIA					0.919	0.900	0.713

A.2.15. UBP 356x368x133

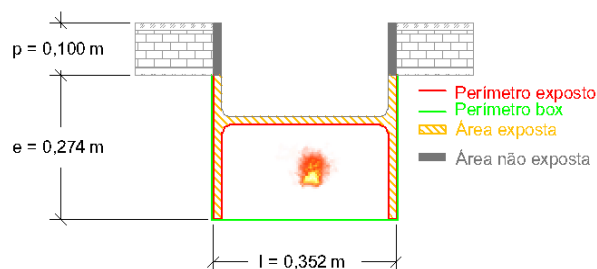


Figura A.2.15: UBP 356x368x133

Quadro A.2.57: UBP 356x368x133 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pex_r}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	513	527.450	413.400	325.140	1.028	0.806	0.634
60	935	890.620	746.640	678.250	0.953	0.799	0.725
120	1046	1003.000	853.370	772.460	0.959	0.816	0.738
MÉDIA					0.980	0.807	0.699

Quadro A.2.58: UBP 356x368x133 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	486	527.450	413.400	325.140	1.085	0.851	0.669
60	933	890.620	746.640	678.250	0.955	0.800	0.727
120	1046	1003.000	853.370	772.460	0.959	0.816	0.738
MÉDIA					1.000	0.822	0.711

Quadro A.2.59: UBP 356x368x133 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	425	527.450	413.400	325.140	1.241	0.973	0.765
60	925	890.620	746.640	678.250	0.963	0.807	0.733
120	1045	1003.000	853.370	772.460	0.960	0.817	0.739
MÉDIA					1.055	0.866	0.746

Quadro A.2.60: UBP 356x368x133 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	425	527.450	413.400	325.140	1.241	0.973	0.765
60	925	890.620	746.640	678.250	0.963	0.807	0.733
120	1045	1003.000	853.370	772.460	0.960	0.817	0.739
MÉDIA					1.055	0.866	0.746

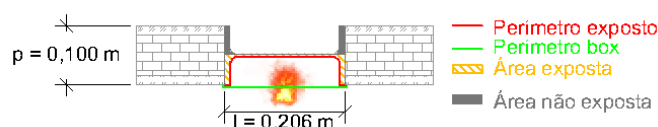
A.2.16. UB 254x102x28


Figura A.2.16: UB 254x102x28

 Quadro A.2.61: UB 254x102x28 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	604	453.950	474.510	350.440	0.752	0.786	0.580
60	939	797.280	735.600	632.750	0.849	0.783	0.674
120	1047	908.240	843.610	705.250	0.867	0.806	0.674
MÉDIA					0.823	0.792	0.643

 Quadro A.2.62: UB 254x102x28 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	519	453.950	474.510	350.440	0.875	0.914	0.675
60	935	797.280	735.600	632.750	0.853	0.787	0.677
120	1046	908.240	843.610	705.250	0.868	0.807	0.674
MÉDIA					0.865	0.836	0.675

 Quadro A.2.63: UB 254x102x28 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	521	453.950	474.510	350.440	0.871	0.911	0.673
60	937	797.280	735.600	632.750	0.851	0.785	0.675
120	1046	908.240	843.610	705.250	0.868	0.807	0.674
MÉDIA					0.863	0.834	0.674

 Quadro A.2.64: UB 254x102x28 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	425	453.950	474.510	350.440	1.068	1.116	0.825
60	925	797.280	735.600	632.750	0.862	0.795	0.684
120	1045	908.240	843.610	705.250	0.869	0.807	0.675
MÉDIA					0.933	0.906	0.728

A.2.17. UB 406x178x54

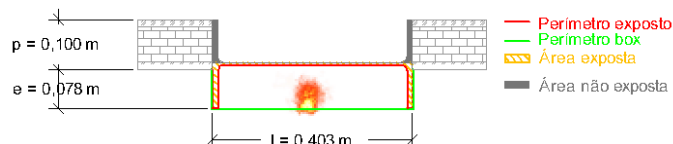


Figura A.2.17: UB 406x178x54

Quadro A.2.65: UB 406x178x54 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	645	529.850	586.331	348.645	0.821	0.909	0.541
60	941	848.658	806.600	644.054	0.902	0.857	0.684
120	1047	958.683	900.762	718.863	0.916	0.860	0.687
MÉDIA					0.880	0.876	0.637

Quadro A.2.66: UB 406x178x54 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	575	529.850	586.331	348.645	0.921	1.020	0.606
60	939	848.658	806.600	644.054	0.904	0.859	0.686
120	1047	958.683	900.762	718.863	0.916	0.860	0.687
MÉDIA					0.914	0.913	0.660

Quadro A.2.67: UB 406x178x54 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	581	529.850	586.331	348.645	0.912	1.009	0.600
60	939	848.658	806.600	644.054	0.904	0.859	0.686
120	1047	958.683	900.762	718.863	0.916	0.860	0.687
MÉDIA					0.910	0.909	0.658

Quadro A.2.68: UB 406x178x54 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	491	529.850	586.331	348.645	1.079	1.194	0.710
60	933	848.658	806.600	644.054	0.910	0.865	0.690
120	1046	958.683	900.762	718.863	0.917	0.861	0.687
MÉDIA					0.968	0.973	0.696

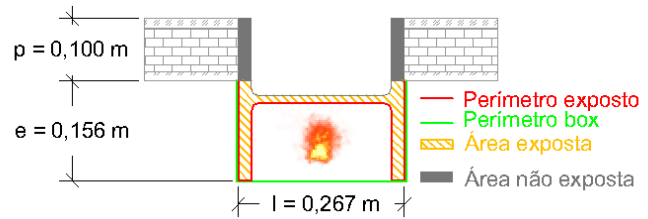
A.2.18. UC 254x254x107


Figura A.2.18: UC 254x254x107

 Quadro A.2.69: UC 254x254x107 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{P_{exp}}{A_{exp}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	527	461.294	414.684	276.994	0.875	0.787	0.526
60	937	865.846	740.891	651.609	0.924	0.791	0.695
120	1046	985.634	849.975	752.126	0.942	0.813	0.719
MÉDIA					0.914	0.797	0.647

 Quadro A.2.70: UC 254x254x107 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{P_{exp}}{A_{tot.perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	432	461.294	414.684	276.994	1.068	0.960	0.641
60	926	865.846	740.891	651.609	0.935	0.800	0.704
120	1045	985.634	849.975	752.126	0.943	0.813	0.720
MÉDIA					0.982	0.858	0.688

 Quadro A.2.71: UC 254x254x107 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{P_{box}}{A_{exp}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	437	461.294	414.684	276.994	1.056	0.949	0.634
60	927	865.846	740.891	651.609	0.934	0.799	0.703
120	1045	985.634	849.975	752.126	0.943	0.813	0.720
MÉDIA					0.978	0.854	0.686

 Quadro A.2.72: UC 254x254x107 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{P_{box}}{A_{tot.perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	344	461.294	414.684	276.994	1.341	1.205	0.805
60	907	865.846	740.891	651.609	0.955	0.817	0.718
120	1043	985.634	849.975	752.126	0.945	0.815	0.721
MÉDIA					1.080	0.946	0.748

A.2.19. UC 356x406x551

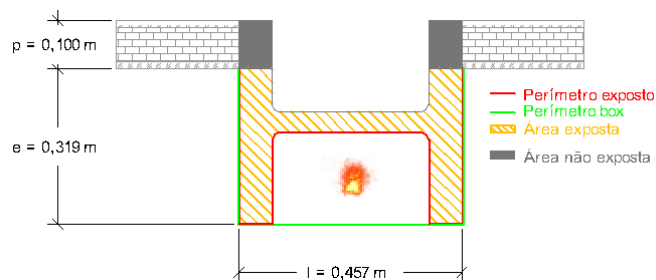


Figura A.2.19: UC 356x406x551

Quadro A.2.73: UC 356x406x551 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{P_{exp}}{A_{exp}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	235	237.810	192.620	135.070	1.012	0.820	0.575
60	918	756.900	669.370	568.970	0.825	0.729	0.620
120	1038	977.330	833.650	761.230	0.942	0.803	0.733
MÉDIA					0.926	0.784	0.643

Quadro A.2.74: UC 356x406x551 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{P_{exp}}{A_{tot.perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	199	237.810	192.620	135.070	1.195	0.968	0.679
60	611	756.900	669.370	568.970	1.239	1.096	0.931
120	1033	977.330	833.650	761.230	0.946	0.807	0.737
MÉDIA					1.127	0.957	0.782

Quadro A.2.75: UC 356x406x551 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{P_{box}}{A_{exp}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	188	237.810	192.620	135.070	1.265	1.025	0.718
60	865	756.900	669.370	568.970	0.875	0.774	0.658
120	1033	977.330	833.650	761.230	0.946	0.807	0.737
MÉDIA					1.029	0.868	0.704

Quadro A.2.76: UC 356x406x551 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{P_{box}}{A_{tot.perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	159	237.810	192.620	135.070	1.496	1.211	0.849
60	859	756.900	669.370	568.970	0.881	0.779	0.662
120	1027	977.330	833.650	761.230	0.952	0.812	0.741
MÉDIA					1.109	0.934	0.643

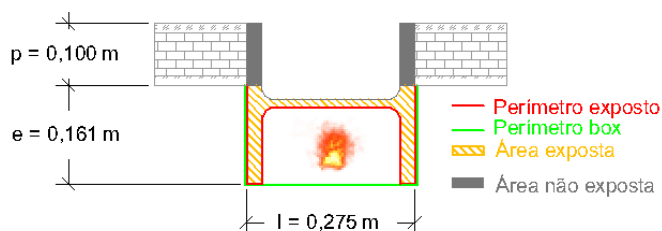
A.2.20. W 250x250x131


Figura A.2.20: W 250x250x131

 Quadro A.2.77: W 250x250x131 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	479	402.680	373.140	276.110	0.841	0.779	0.576
60	932	843.440	738.590	677.930	0.905	0.792	0.727
120	1045	941.880	852.150	787.870	0.901	0.815	0.754
MÉDIA					0.882	0.796	0.686

 Quadro A.2.78: W 250x250x131 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	382	402.680	373.140	276.110	1.054	0.977	0.7223
60	917	843.440	738.590	677.930	0.920	0.805	0.739
120	1044	941.880	852.150	787.870	0.902	0.816	0.755
MÉDIA					0.959	0.866	0.739

 Quadro A.2.79: W 250x250x131 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	390	402.680	373.140	276.110	1.033	0.957	0.708
60	919	843.440	738.590	677.930	0.918	0.804	0.738
120	1044	941.880	852.150	787.870	0.902	0.816	0.755
MÉDIA					0.951	0.859	0.733

 Quadro A.2.80: W 250x250x131 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	302	237.810	192.620	135.070	1.333	1.236	0.914
60	917	756.900	669.370	568.970	0.920	0.805	0.739
120	1041	977.330	833.650	761.230	0.905	0.819	0.757
MÉDIA					1.053	0.953	0.803

A.2.21. W 460x280x235

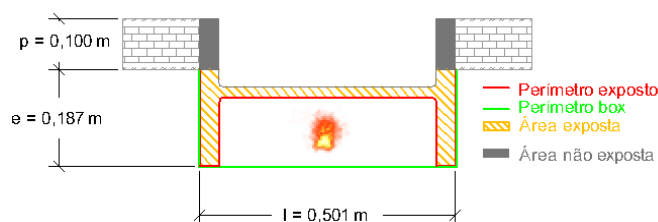


Figura A.2.21: W 460x280x235

Quadro A.2.81: W 460x280x235 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	384	337.370	324.420	222.690	0.879	0.845	0.580
60	918	826.240	724.740	657.230	0.900	0.789	0.716
120	1044	969.720	844.410	786.740	0.929	0.809	0.754
MÉDIA					0.902	0.814	0.683

Quadro A.2.82: W 460x280x235 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	315	337.370	324.420	222.690	1.071	1.030	0.707
60	890	826.240	724.740	657.230	0.928	0.814	0.738
120	1042	969.720	844.410	786.740	0.931	0.810	0.755
MÉDIA					0.977	0.885	0.733

Quadro A.2.83: W 460x280x235 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	320	337.370	324.420	222.690	1.054	1.014	0.696
60	895	826.240	724.740	657.230	0.923	0.810	0.734
120	1042	969.720	844.410	786.740	0.931	0.810	0.755
MÉDIA					0.969	0.878	0.728

Quadro A.2.84: W 460x280x235 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	260	337.370	324.420	222.690	1.298	1.248	0.856
60	576	826.240	724.740	657.230	1.434	1.258	1.141
120	1040	969.720	844.410	786.740	0.932	0.812	0.756
MÉDIA					1.221	1.106	0.918

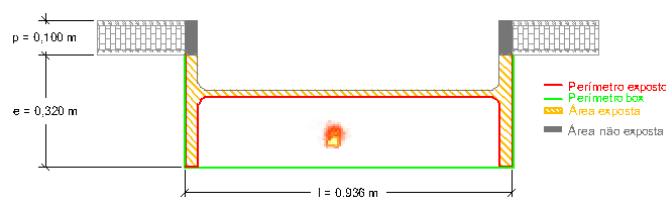
A.2.22. W 920x420x390


Figura A.2.22: W920x420x390

 Quadro A.2.85: W 920x420x390 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	365	361.138	329.091	201.728	0.989	0.902	0.553
60	913	863.609	727.253	628.099	0.946	0.797	0.688
120	1043	1007.096	846.927	757.599	0.966	0.812	0.726
MÉDIA					0.967	0.837	0.656

 Quadro A.2.86: W 920x420x390 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	326	361.138	329.091	201.728	1.108	1.009	0.619
60	899	863.609	727.253	628.099	0.961	0.809	0.699
120	1042	1007.096	846.927	757.599	0.967	0.813	0.727
MÉDIA					1.012	0.877	0.682

 Quadro A.2.87: W 920x420x390 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	312	361.138	329.091	201.728	1.157	1.055	0.647
60	885	863.609	727.253	628.099	0.976	0.822	0.710
120	1042	1007.096	846.927	757.599	0.967	0.813	0.727
MÉDIA					1.033	0.896	0.694

 Quadro A.2.88: W 920x420x390 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	277	361.138	329.091	201.728	1.304	1.188	0.728
60	911	863.609	727.253	628.099	0.948	0.798	0.689
120	1040	1007.096	846.927	757.599	0.968	0.814	0.728
MÉDIA					1.073	0.934	0.715

A.3. Pilares inseridos em parede de 15 cm - Gráficos

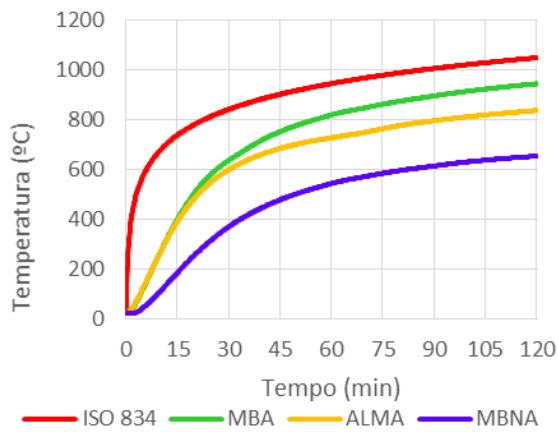


Figura A.3.1: Gráfico HD 320x127

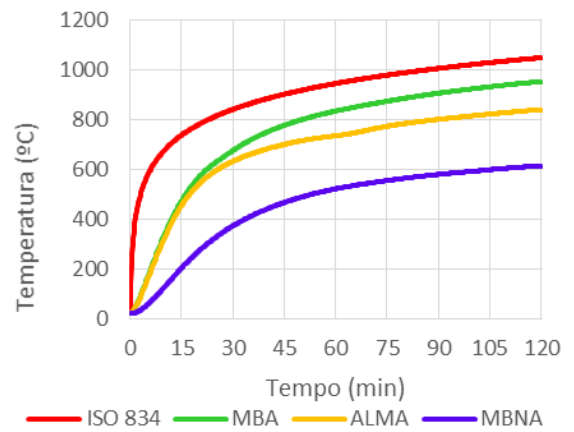


Figura A.3.4: Gráfico HE 450 AA

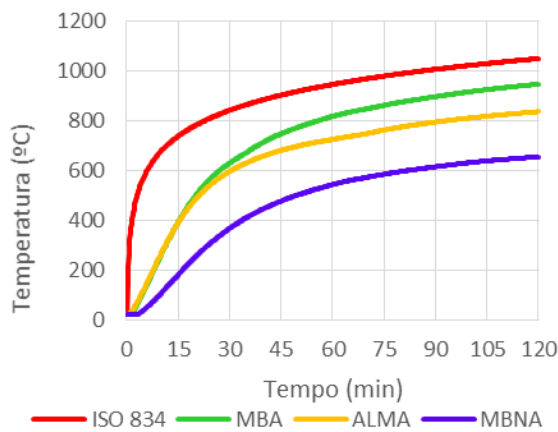


Figura A.3.2: Gráfico HE 450 A

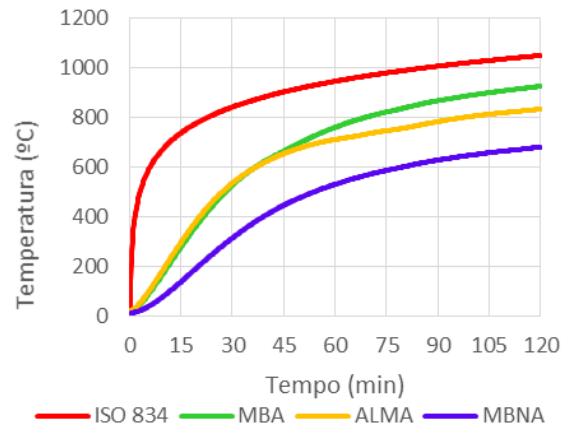


Figura A.3.5: Gráfico HE 450 M

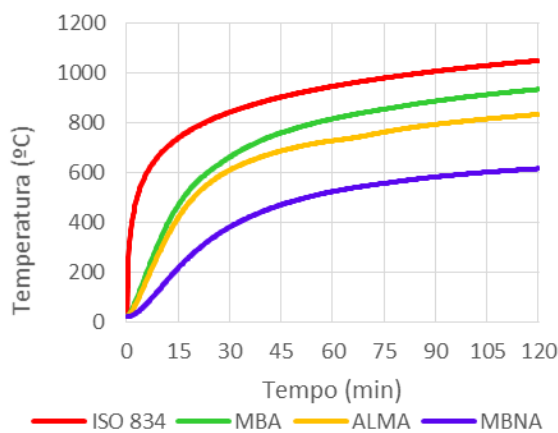


Figura A.3.3: Gráfico HP 250x62

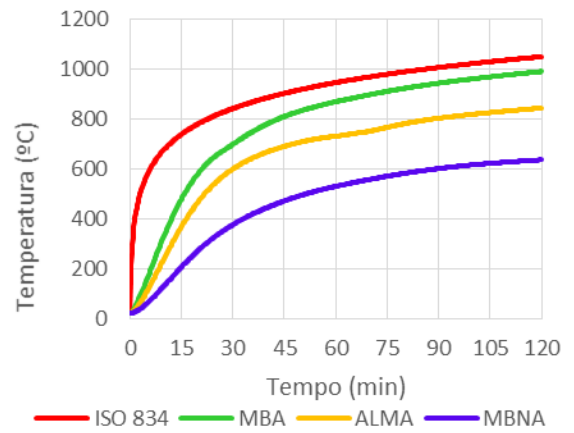


Figura A.3.6: Gráfico HP 360x152

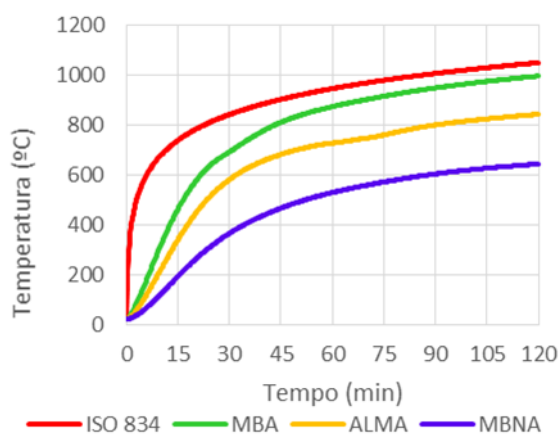


Figura A.3.7: Gráfico HP 360x174

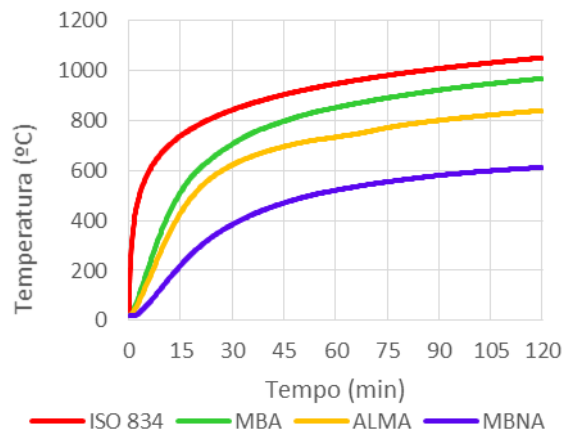


Figura A.3.10: Gráfico HP 305x79

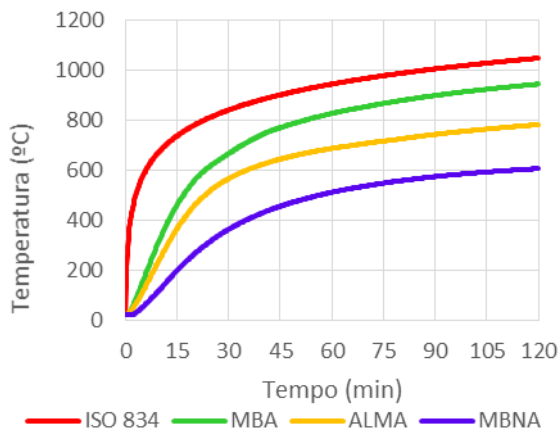


Figura A.3.8: Gráfico HP 305x110

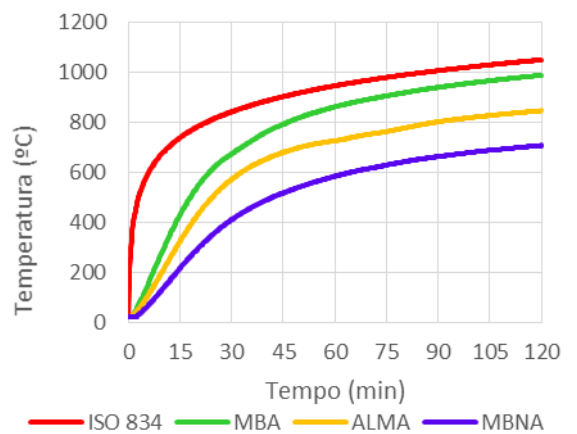


Figura A.3.11: Gráfico HP 400x194

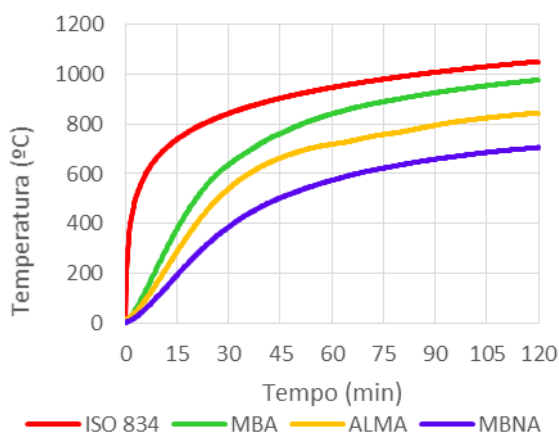


Figura A.3.9: Gráfico HP 400x231

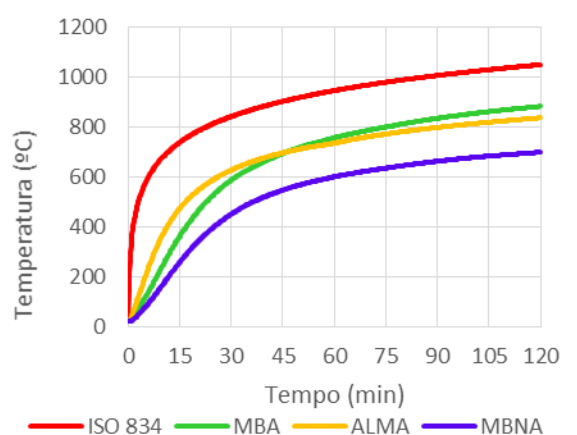


Figura A.3.12: Gráfico IPEA 270

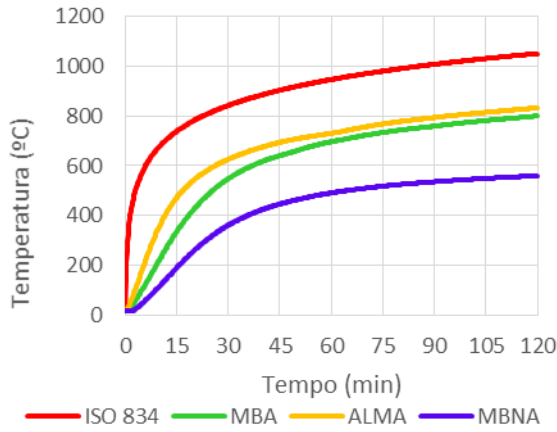


Figura A.3.13: Gráfico IPEA 400

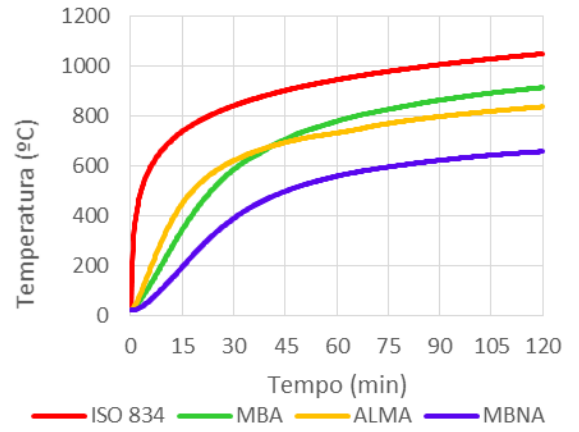


Figura A.3.16: Gráfico IPE 400

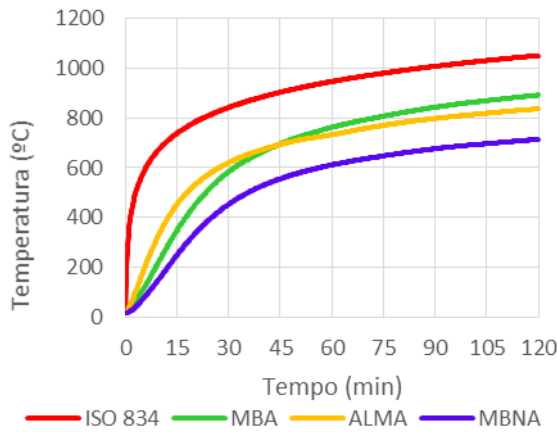


Figura A.3.14: Gráfico IPEO 270

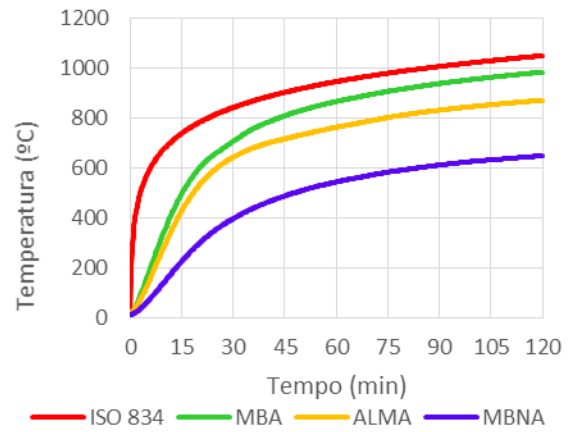


Figura A.3.17: Gráfico UBP 356x368x133

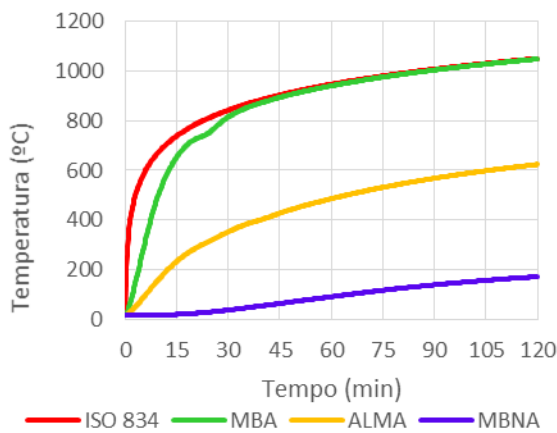


Figura A.3.15: Gráfico UB 254x102x28

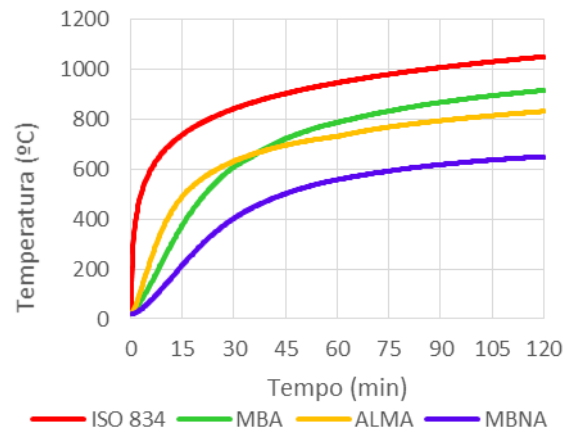


Figura A.3.18: Gráfico UB406x178x54

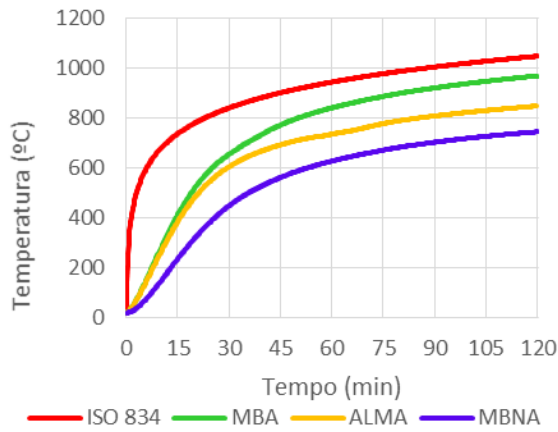


Figura A.3.19: Gráfico UC 254x254x107

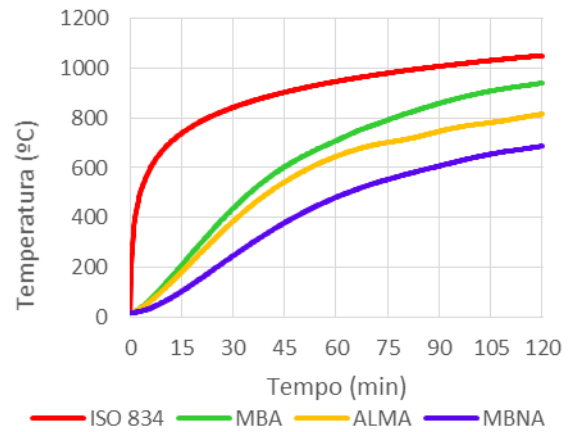


Figura A.3.22: Gráfico UC: 356x406x551

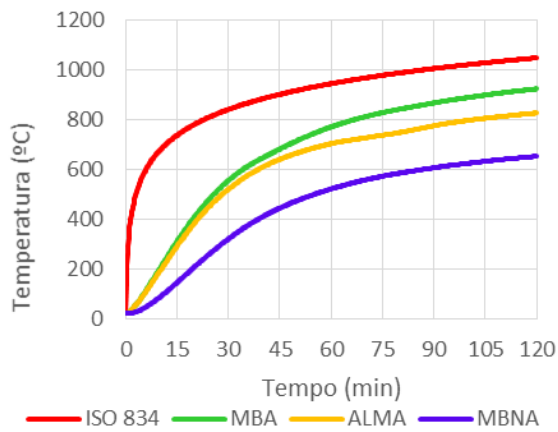


Figura A.3.20: Gráfico W 250x250x167

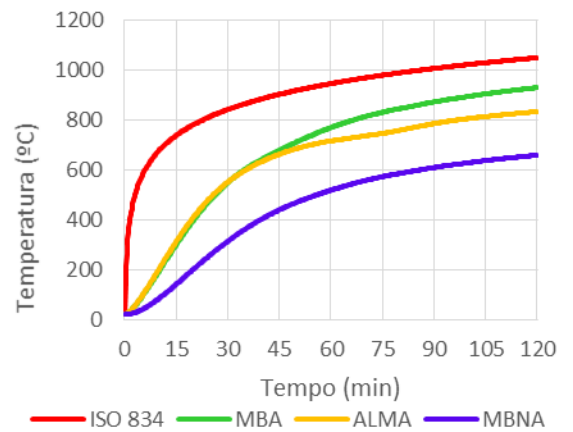


Figura A.3.23: Gráfico W 460x280x235

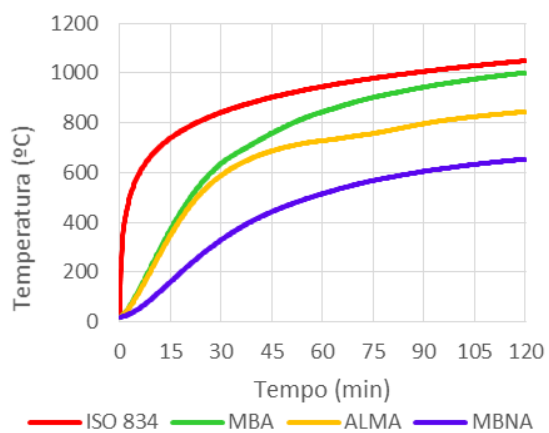
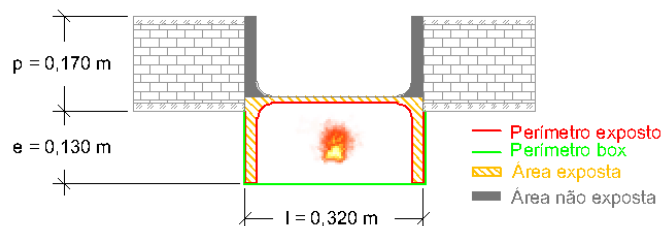


Figura A.3.21: Gráfico W 920x420x344

A.4. Pilares inseridos em parede de 15 cm - Quadros

A.4.1. HD 320 x127



Quadro A.4.1: HD 320x127 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{P_{exp}}{A_{exp}}$

Figura A.4.1: HD 320x127

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	525	401.951	392.362	185.718	0.766	0.747	0.354
60	937	819.526	726.911	543.194	0.875	0.776	0.580
120	1046	944.292	837.022	653.049	0.903	0.800	0.624
MÉDIA					0.848	0.774	0.519

Quadro A.4.2: HD 320x127 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{P_{exp}}{A_{tot. perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	393	401.951	392.362	185.718	1.023	0.998	0.473
60	920	819.526	726.911	543.194	0.891	0.790	0.590
120	1044	944.292	837.022	653.049	0.904	0.802	0.626
MÉDIA					0.939	0.863	0.563

Quadro A.4.3: HD 320x127 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{P_{box}}{A_{exp}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	427	401.951	392.362	185.718	0.941	0.919	0.435
60	926	819.526	726.911	543.194	0.885	0.785	0.587
120	1045	944.292	837.022	653.049	0.904	0.801	0.625
MÉDIA					0.910	0.835	0.549

Quadro A.4.4: HD 320x127 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{P_{box}}{A_{tot. perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	303	401.951	392.362	185.718	1.327	1.295	0.613
60	959	819.526	726.911	543.194	0.855	0.758	0.566
120	1041	944.292	837.022	653.049	0.907	0.804	0.627
MÉDIA					1.029	0.952	0.602

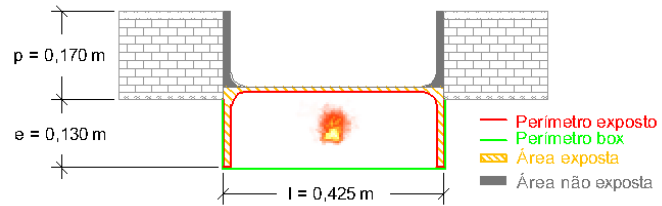
A.4.2. HE 450 AA


Figura A.4.2: HE 450 AA

 Quadro A.4.5: HE 450 AA- Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	591	475.047	456.649	205.154	0.804	0.773	0.347
60	939	834.795	734.840	521.819	0.889	0.783	0.556
120	1047	953.312	840.292	614.299	0.911	0.803	0.587
MÉDIA					0.868	0.786	0.497

 Quadro A.4.6: HE 450 AA- Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	492	475.047	456.649	205.154	0.966	0.928	0.417
60	933	834.795	734.840	521.819	0.895	0.788	0.559
120	1046	953.312	840.292	614.299	0.911	0.803	0.587
MÉDIA					0.924	0.840	0.521

 Quadro A.4.7: HE 450 AA- Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	512	475.047	456.649	205.154	0.928	0.892	0.401
60	935	834.795	734.840	521.819	0.893	0.786	0.558
120	1046	953.312	840.292	614.299	0.911	0.803	0.587
MÉDIA					0.911	0.827	0.515

 Quadro A.4.8: HE 450 AA- Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	403	475.047	456.649	205.154	1.179	1.133	0.509
60	922	834.795	734.840	521.819	0.905	0.797	0.566
120	1044	953.312	840.292	614.299	0.913	0.805	0.588
MÉDIA					0.999	0.912	0.554

A.4.3. HE 450 A

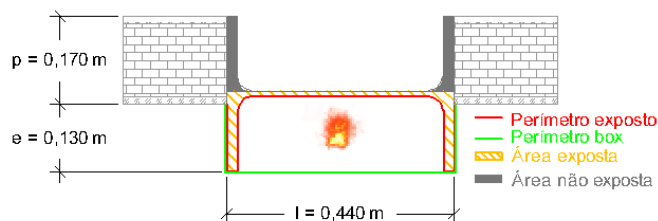


Figura A.4.3: HE 450 A

Quadro A.4.9: HE 450 A- Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	687	394.217	391.955	182.202	0.574	0.571	0.265
60	942	817.250	724.437	542.900	0.868	0.769	0.576
120	1048	946.277	835.639	653.659	0.903	0.797	0.624
MÉDIA					0.781	0.712	0.488

Quadro A.4.10: HE 450 A- Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	620	394.217	391.955	182.202	0.636	0.632	0.294
60	940	817.250	724.437	542.900	0.869	0.771	0.578
120	1047	946.277	835.639	653.659	0.904	0.798	0.624
MÉDIA					0.803	0.734	0.499

Quadro A.4.11: HE 450 A- Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	634	394.217	391.955	182.202	0.622	0.618	0.287
60	940	817.250	724.437	542.900	0.869	0.771	0.578
120	1047	946.277	835.639	653.659	0.904	0.798	0.624
MÉDIA					0.798	0.729	0.496

Quadro A.4.12: HE 450 A- Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	526	394.217	391.955	182.202	0.749	0.745	0.346
60	937	817.250	724.437	542.900	0.872	0.773	0.579
120	1046	946.277	835.639	653.659	0.905	0.799	0.625
MÉDIA					0.842	0.772	0.517

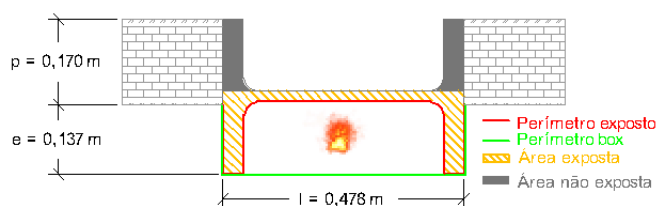
A.4.4. HE 450 M


Figura A.4.4: HE 450 M

 Quadro A.4.13: HE 450 M- Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{P_{exp}}{A_{exp}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	366	279.068	298.732	138.772	0.762	0.816	0.379
60	913	759.779	710.575	530.125	0.832	0.778	0.581
120	1043	925.190	832.642	679.967	0.887	0.798	0.652
MÉDIA					0.827	0.798	0.537

 Quadro A.4.14: HE 450 M- Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{P_{exp}}{A_{tot.perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	267	279.068	298.732	138.772	1.045	1.119	0.520
60	882	759.779	710.575	530.125	0.861	0.806	0.601
120	1040	925.190	832.642	679.967	0.890	0.801	0.654
MÉDIA					0.932	0.908	0.592

 Quadro A.4.15: HE 450 M- Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{P_{box}}{A_{exp}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	295	279.068	298.732	138.772	0.946	1.013	0.470
60	904	759.779	710.575	530.125	0.840	0.786	0.586
120	1041	925.190	832.642	679.967	0.889	0.800	0.653
MÉDIA					0.892	0.866	0.570

 Quadro A.4.16: HE 450 M- Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{P_{box}}{A_{tot.perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	212	279.068	298.732	138.772	1.316	1.409	0.655
60	858	759.779	710.575	530.125	0.886	0.828	0.618
120	1036	925.190	832.642	679.967	0.893	0.804	0.656
MÉDIA					1.032	1.014	0.643

A.4.5. HP 250x62

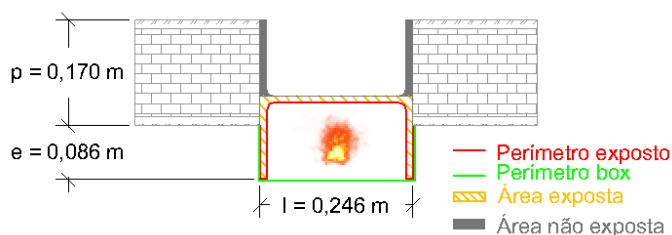


Figura A.4.5: HP 250x62

Quadro A.4.17: HP 250x62 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	607	469.461	419.999	217.173	0.773	0.692	0.358
60	940	815.193	726.762	522.626	0.867	0.773	0.556
120	1047	933.336	832.475	614.520	0.891	0.795	0.587
MÉDIA					0.844	0.753	0.500

Quadro A.4.18: HP 250x62 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

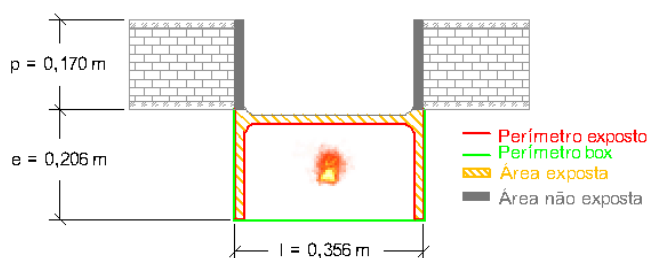
Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	509	469.461	419.999	217.173	0.922	0.825	0.427
60	935	815.193	726.762	522.626	0.872	0.777	0.559
120	1046	933.336	832.475	614.520	0.892	0.796	0.587
MÉDIA					0.895	0.799	0.524

Quadro A.4.19: HP 250x62 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	505	469.461	419.999	217.173	0.930	0.832	0.430
60	934	815.193	726.762	522.626	0.873	0.778	0.560
120	1046	933.336	832.475	614.520	0.892	0.796	0.587
MÉDIA					0.898	0.802	0.526

Quadro A.4.20: HP 250x62 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	395	469.461	419.999	217.173	1.189	1.063	0.550
60	920	815.193	726.762	522.626	0.886	0.790	0.568
120	1044	933.336	832.475	614.520	0.894	0.797	0.589
MÉDIA					0.990	0.884	0.569

A.4.6. HP 360x152

 Quadro A.4.21: HP 360x152 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{P_{exp}}{A_{exp}}$ Figura A.4.6: HP 360x152

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	520	479.190	367.806	206.623	0.922	0.707	0.397
60	935	868.955	729.943	529.566	0.929	0.781	0.566
120	1046	989.546	843.065	635.440	0.946	0.806	0.607
MÉDIA					0.932	0.765	0.524

 Quadro A.4.22: HP 360x152 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{P_{exp}}{A_{tot.perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	420	479.190	367.806	206.623	1.141	0.876	0.492
60	924	868.955	729.943	529.566	0.940	0.790	0.573
120	1044	989.546	843.065	635.440	0.948	0.808	0.609
MÉDIA					1.010	0.824	0.558

 Quadro A.4.23: HP 360x152 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{P_{box}}{A_{exp}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	421	479.190	367.806	206.623	1.138	0.874	0.491
60	925	868.955	729.943	529.566	0.939	0.789	0.573
120	1044	989.546	843.065	635.440	0.948	0.808	0.609
MÉDIA					1.008	0.823	0.557

 Quadro A.4.24: HP 360x152 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{P_{box}}{A_{tot.perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	326	479.190	367.806	206.623	1.470	1.128	0.634
60	899	868.955	729.943	529.566	0.967	0.812	0.589
120	1042	989.546	843.065	635.440	0.950	0.809	0.610
MÉDIA					1.129	0.916	0.611

A.4.7. HP 360x174

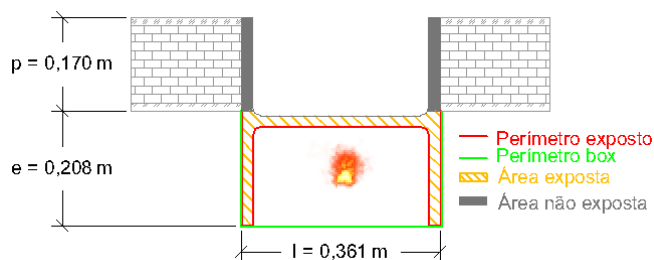


Figura A.4.7: HP 3690x174

Quadro A.4.25: HP 360x174 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{P_{exp}}{A_{exp}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	486	463.072	340.383	193.202	0.953	0.700	0.398
60	933	873.501	726.698	529.099	0.936	0.779	0.567
120	1046	995.643	842.292	642.861	0.952	0.805	0.615
MÉDIA					0.947	0.762	0.526

Quadro A.4.26: HP 360x174 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{P_{exp}}{A_{tot.perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	386	463.072	340.383	193.202	1.200	0.882	0.501
60	918	873.501	726.698	529.099	0.952	0.792	0.576
120	1044	995.643	842.292	642.861	0.954	0.807	0.616
MÉDIA					1.035	0.827	0.564

Quadro A.4.27: HP 360x174 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{P_{box}}{A_{exp}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	387	463.072	340.383	193.202	1.197	0.880	0.499
60	918	873.501	726.698	529.099	0.952	0.792	0.576
120	1044	995.643	842.292	642.861	0.954	0.807	0.616
MÉDIA					1.034	0.826	0.564

Quadro A.4.28: HP 360x174 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{P_{box}}{A_{tot.perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	297	463.072	340.383	193.202	1.559	1.146	0.651
60	980	873.501	726.698	529.099	0.891	0.742	0.540
120	1041	995.643	842.292	642.861	0.956	0.809	0.618
MÉDIA					1.136	0.899	0.603

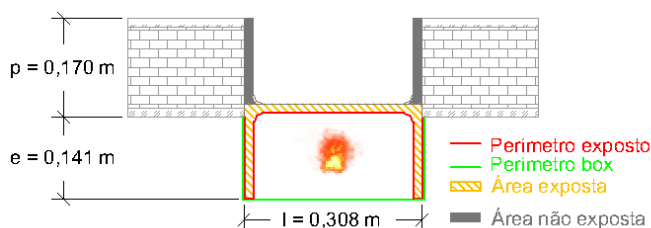
A.4.8. HP 305x110


Figura A.4.8: HP 305x110

 Quadro A.4.29: HP 305x110 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{P_{exp}}{A_{exp}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	549	462.427	367.312	199.287	0.842	0.669	0.363
60	938	828.089	687.831	512.096	0.883	0.733	0.546
120	1046	945.188	782.728	606.506	0.904	0.748	0.580
MÉDIA					0.876	0.717	0.496

 Quadro A.4.30: HP 305x110 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{P_{exp}}{A_{tot.perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	442	462.427	367.312	199.287	1.046	0.831	0.451
60	928	828.089	687.831	512.096	0.892	0.741	0.552
120	1045	945.188	782.728	606.506	0.904	0.749	0.580
MÉDIA					0.948	0.774	0.528

 Quadro A.4.31: HP 305x110 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{P_{box}}{A_{exp}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	447	462.427	367.312	199.287	1.035	0.822	0.446
60	928	828.089	687.831	512.096	0.892	0.741	0.552
120	1045	945.188	782.728	606.506	0.904	0.749	0.580
MÉDIA					0.944	0.771	0.526

 Quadro A.4.32: HP 305x110 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{P_{box}}{A_{tot.perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	341	462.427	367.312	199.287	1.356	1.077	0.584
60	906	828.089	687.831	512.096	0.914	0.759	0.565
120	1043	945.188	782.728	606.506	0.906	0.750	0.582
MÉDIA					1.059	0.862	0.577

A.4.9. HP 400x194

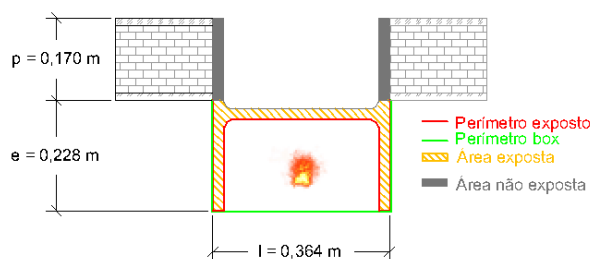


Figura A.4.9: HP 400x194

Quadro A.4.33: HP 400x194 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{P_{exp}}{A_{exp}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	467	430.637	324.326	216.328	0.922	0.694	0.463
60	931	861.264	725.277	583.381	0.925	0.779	0.627
120	1045	987.489	845.422	706.675	0.945	0.809	0.676
MÉDIA					0.931	0.761	0.589

Quadro A.4.34: HP 400x194 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{P_{exp}}{A_{tot.perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	371	430.637	324.326	216.328	1.161	0.874	0.583
60	915	861.264	725.277	583.381	0.941	0.793	0.638
120	1043	987.489	845.422	706.675	0.947	0.811	0.678
MÉDIA					1.016	0.826	0.633

Quadro A.4.35: HP 400x194 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{P_{box}}{A_{exp}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	370	430.637	324.326	216.328	1.164	0.877	0.585
60	914	861.264	725.277	583.381	0.942	0.794	0.638
120	1043	987.489	845.422	706.675	0.947	0.811	0.678
MÉDIA					1.018	0.827	0.633

Quadro A.4.36: HP 400x194 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{P_{box}}{A_{tot.perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	285	430.637	324.326	216.328	1.511	1.138	0.759
60	856	861.264	725.277	583.381	1.006	0.847	0.682
120	1041	987.489	845.422	706.675	0.949	0.812	0.679
MÉDIA					1.155	0.932	0.706

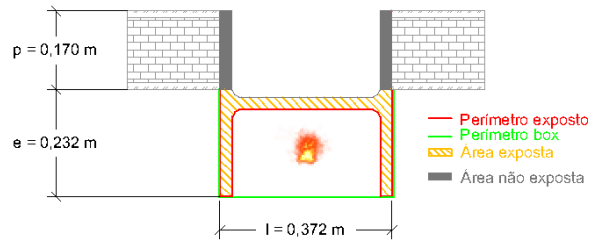
A.4.10. HP 400x231


Figura A.4.10: HP 400x231

 Quadro A.4.37: HP 400x231 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	423	380.280	289.755	195.155	0.899	0.685	0.461
60	925	839.909	718.043	574.129	0.908	0.776	0.621
120	1045	975.136	843.492	705.374	0.933	0.807	0.675
MÉDIA					0.913	0.756	0.586

 Quadro A.4.38: HP 400x231 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	333	380.280	289.755	195.155	1.142	0.870	0.586
60	903	839.909	718.043	574.129	0.930	0.795	0.636
120	1042	975.136	843.492	705.374	0.936	0.809	0.677
MÉDIA					1.003	0.825	0.633

 Quadro A.4.39: HP 400x231 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	331	380.280	289.755	195.155	1.149	0.875	0.590
60	902	839.909	718.043	574.129	0.931	0.796	0.637
120	1042	975.136	843.492	705.374	0.936	0.809	0.677
MÉDIA					1.005	0.827	0.634

 Quadro A.4.40: HP 400x231 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	254	380.280	289.755	195.155	1.497	1.141	0.768
60	924	839.909	718.043	574.129	0.909	0.777	0.621
120	1039	975.136	843.492	705.374	0.939	0.812	0.679
MÉDIA					1.115	0.910	0.690

A.4.11. IPEA 270

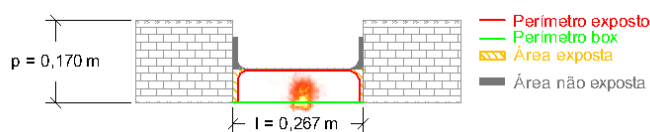


Figura A.4.11: IPEA 270

Quadro A.4.41: IPEA 270 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	635	362.298	473.959	257.912	0.571	0.746	0.406
60	940	756.837	734.240	599.885	0.805	0.781	0.638
120	1047	882.105	836.027	698.016	0.843	0.798	0.667
MÉDIA					0.739	0.775	0.570

Quadro A.4.42: IPEA 270 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{A_{tot.perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	562	362.298	473.959	257.912	0.645	0.843	0.459
60	938	756.837	734.240	599.885	0.807	0.783	0.640
120	1046	882.105	836.027	698.016	0.843	0.799	0.667
MÉDIA					0.765	0.808	0.589

Quadro A.4.43: IPEA 270 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	555	362.298	473.959	257.912	0.653	0.854	0.465
60	938	756.837	734.240	599.885	0.807	0.783	0.640
120	1046	882.105	836.027	698.016	0.843	0.799	0.667
MÉDIA					0.768	0.812	0.591

Quadro A.4.44: IPEA 270 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{A_{tot.perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	462	362.298	473.959	257.912	0.784	1.026	0.558
60	930	756.837	734.240	599.885	0.814	0.790	0.645
120	1045	882.105	836.027	698.016	0.844	0.800	0.668
MÉDIA					0.814	0.872	0.624

A.4.12. IPEA 400

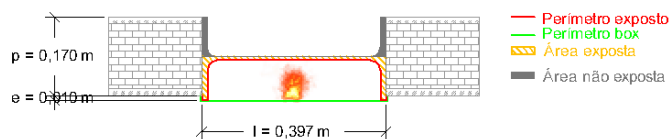


Figura A.4.12: IPEA 400

Quadro A.4.45: IPEA 400 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	594	337.917	473.775	192.335	0.569	0.798	0.324
60	939	696.570	729.943	491.518	0.742	0.777	0.523
120	1047	799.198	831.425	559.867	0.763	0.794	0.535
MÉDIA					0.691	0.790	0.461

Quadro A.4.46: IPEA 400 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{A_{tot.perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	503	337.917	473.775	192.335	0.672	0.942	0.382
60	934	696.570	729.943	491.518	0.746	0.782	0.526
120	1046	799.198	831.425	559.867	0.764	0.795	0.535
MÉDIA					0.727	0.839	0.481

Quadro A.4.47: IPEA 400 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	518	337.917	473.775	192.335	0.652	0.915	0.371
60	935	696.570	729.943	491.518	0.745	0.781	0.526
120	1046	799.198	831.425	559.867	0.764	0.795	0.535
MÉDIA					0.720	0.830	0.477

Quadro A.4.48: IPEA 400 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{A_{tot.perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	418	337.917	473.775	192.335	0.808	1.133	0.460
60	924	696.570	729.943	491.518	0.754	0.790	0.532
120	1044	799.198	831.425	559.867	0.766	0.796	0.536
MÉDIA					0.776	0.907	0.509

A.4.13. IPE 400

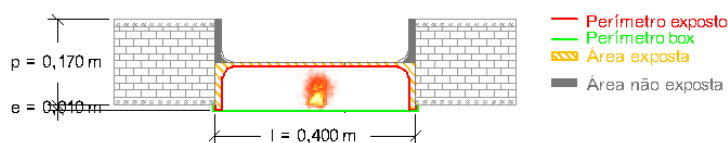


Figura A.4.13: IPE 400

Quadro A.4.49: IPE 400 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	558	345.347	450.480	195.982	0.619	0.807	0.351
60	938	779.317	731.779	558.556	0.831	0.780	0.595
120	1046	914.117	836.525	657.164	0.874	0.800	0.628
MÉDIA					0.775	0.796	0.525

Quadro A.4.50: IPE 400 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	465	345.347	450.480	195.982	0.743	0.969	0.421
60	931	779.317	731.779	558.556	0.837	0.786	0.600
120	1045	914.117	836.525	657.164	0.875	0.801	0.629
MÉDIA					0.818	0.852	0.550

Quadro A.4.51: IPE 400 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	478	345.347	450.480	195.982	0.722	0.942	0.410
60	932	779.317	731.779	558.556	0.836	0.785	0.599
120	1045	914.117	836.525	657.164	0.875	0.801	0.629
MÉDIA					0.811	0.843	0.546

Quadro A.4.52: IPE 400 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	382	345.347	450.480	195.982	0.904	1.179	0.513
60	917	779.317	731.779	558.556	0.850	0.798	0.609
120	1044	914.117	836.525	657.164	0.876	0.801	0.629
MÉDIA					0.876	0.926	0.584

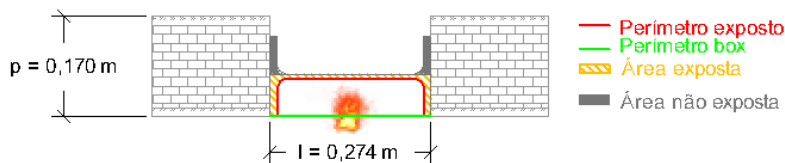
A.4.14. IPEO 270


Figura A.4.14: IPEO 270

 Quadro A.4.53: IPEO 270 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{P_{exp}}{A_{exp}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	576	350.772	455.049	252.247	0.609	0.790	0.438
60	939	762.317	732.609	611.810	0.812	0.780	0.652
120	1047	890.824	836.189	713.512	0.851	0.799	0.681
MÉDIA					0.757	0.790	0.590

 Quadro A.4.54: IPEO 270 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{P_{exp}}{A_{tot. perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	483	350.772	455.049	252.247	0.726	0.942	0.522
60	932	762.317	732.609	611.810	0.818	0.786	0.656
120	1045	890.824	836.189	713.512	0.852	0.800	0.683
MÉDIA					0.799	0.843	0.620

 Quadro A.4.55: IPEO 270 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{P_{box}}{A_{exp}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	487	350.772	455.049	252.247	0.720	0.934	0.518
60	933	762.317	732.609	611.810	0.817	0.785	0.656
120	1046	890.824	836.189	713.512	0.852	0.799	0.682
MÉDIA					0.796	0.840	0.619

 Quadro A.4.56: IPEO 270 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{P_{box}}{A_{tot. perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	388	350.772	455.049	252.247	0.904	1.173	0.650
60	919	762.317	732.609	611.810	0.830	0.797	0.666
120	1044	890.824	836.189	713.512	0.853	0.801	0.683
MÉDIA					0.862	0.924	0.666

A.4.15. UBP 356x368x133

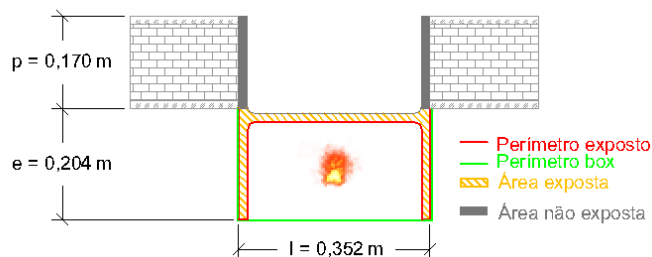


Figura A.4.15: UBP 356x368x133

Quadro A.4.57: UBP 356x368x133 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{P_{exp}}{A_{exp}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	552	496.101	428.236	225.721	0.899	0.776	0.409
60	938	865.526	762.297	543.107	0.923	0.813	0.579
120	1046	983.653	870.555	647.598	0.940	0.832	0.619
MÉDIA					0.921	0.807	0.536

Quadro A.4.58: UBP 356x368x133 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{P_{exp}}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	454	496.101	428.236	225.721	1.093	0.943	0.497
60	929	865.526	762.297	543.107	0.932	0.821	0.585
120	1045	983.653	870.555	647.598	0.941	0.833	0.620
MÉDIA					0.989	0.866	0.567

Quadro A.4.59: UBP 356x368x133 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{P_{box}}{A_{exp}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	454	496.101	428.236	225.721	1.093	0.943	0.497
60	929	865.526	762.297	543.107	0.932	0.821	0.585
120	1045	983.653	870.555	647.598	0.941	0.833	0.620
MÉDIA					0.989	0.866	0.567

Quadro A.4.60: UBP 356x368x133 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{P_{box}}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	356	496.101	428.236	225.721	1.394	1.203	0.634
60	911	865.526	762.297	543.107	0.950	0.837	0.596
120	1043	983.653	870.555	647.598	0.943	0.835	0.621
MÉDIA					1.096	0.958	0.617

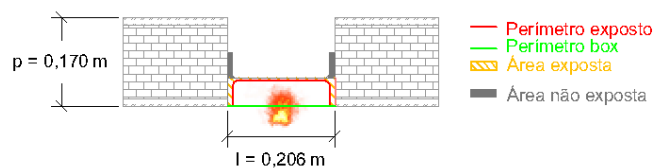
A.4.16. UB 254x102x28


Figura A.4.16: UB 254x102x28

 Quadro A.4.61: UB 254x102x28 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	600	654.334	235.660	22.191	1.091	0.393	0.037
60	939	939.109	486.744	93.222	1.000	0.518	0.099
120	1047	1046.461	623.715	173.584	0.999	0.596	0.166
MÉDIA					1.030	0.502	0.101

 Quadro A.4.62: UB 254x102x28 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	513	654.334	235.660	22.191	1.276	0.459	0.043
60	935	939.109	486.744	93.222	1.004	0.521	0.100
120	1046	1046.461	623.715	173.584	1.000	0.596	0.166
MÉDIA					1.093	0.525	0.103

 Quadro A.4.63: UB 254x102x28 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	516	654.334	235.660	22.191	1.268	0.457	0.043
60	935	939.109	486.744	93.222	1.004	0.521	0.100
120	1046	1046.461	623.715	173.584	1.000	0.596	0.166
MÉDIA					1.091	0.525	0.103

 Quadro A.4.64: UB 254x102x28 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	419	654.334	235.660	22.191	1.562	0.562	0.053
60	924	939.109	486.744	93.222	1.016	0.527	0.101
120	1044	1046.461	623.715	173.584	1.002	0.597	0.166
MÉDIA					1.193	0.562	0.107

A.4.17. UB 406x178x54

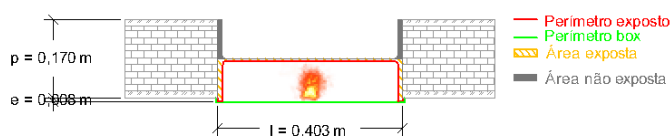


Figura A.4.17: UB 406x178x54

Quadro A.4.65: UB 406x178x54 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	659	376.440	491.190	216.020	0.571	0.745	0.328
60	941	786.640	731.030	557.300	0.836	0.777	0.592
120	1047	914.620	830.820	649.470	0.874	0.794	0.620
MÉDIA					0.760	0.772	0.513

Quadro A.4.66: UB 406x178x54 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	519	376.440	491.190	216.020	0.725	0.946	0.416
60	935	786.640	731.030	557.300	0.841	0.782	0.596
120	1046	914.620	830.820	649.470	0.874	0.794	0.621
MÉDIA					0.814	0.841	0.544

Quadro A.4.67: UB 406x178x54 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	604	376.440	491.190	216.020	0.623	0.813	0.358
60	939	786.640	731.030	557.300	0.838	0.779	0.593
120	1047	914.620	830.820	649.470	0.874	0.794	0.620
MÉDIA					0.778	0.795	0.524

Quadro A.4.68: UB 406x178x54 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	435	376.440	491.190	216.020	0.865	1.129	0.497
60	927	786.640	731.030	557.300	0.849	0.789	0.601
120	1045	914.620	830.820	649.470	0.875	0.795	0.622
MÉDIA					0.863	0.904	0.573

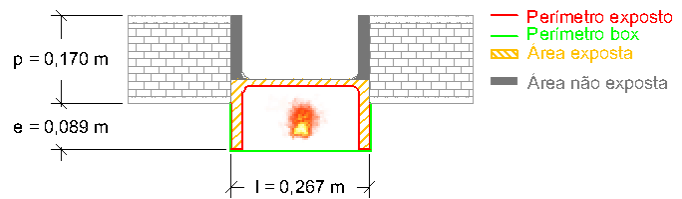
A.4.18. UC 254x254x107


Figura A.4.18: UC 254x254x107

 Quadro A.4.69: UB 254x254x107 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	469	413.160	386.240	236.520	0.881	0.824	0.504
60	931	842.050	736.290	628.130	0.904	0.791	0.675
120	1045	970.320	849.300	745.670	0.929	0.813	0.714
MÉDIA					0.905	0.809	0.631

 Quadro A.4.70: UB 254x254x107 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	437	413.160	386.240	236.520	0.945	0.884	0.541
60	908	842.050	736.290	628.130	0.927	0.811	0.692
120	1043	970.320	849.300	745.670	0.930	0.814	0.715
MÉDIA					0.934	0.836	0.649

 Quadro A.4.71: UB 254x254x107 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	393	413.160	386.240	236.520	1.051	0.983	0.602
60	920	842.050	736.290	628.130	0.915	0.800	0.683
120	1044	970.320	849.300	745.670	0.929	0.814	0.714
MÉDIA					0.965	0.866	0.666

 Quadro A.4.72: UB 254x254x107 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	282	413.160	386.240	236.520	1.465	1.370	0.839
60	901	842.050	736.290	628.130	0.935	0.817	0.697
120	1041	970.320	849.300	745.670	0.932	0.816	0.716
MÉDIA					1.111	1.001	0.751

A.4.19. UC 356x406x551

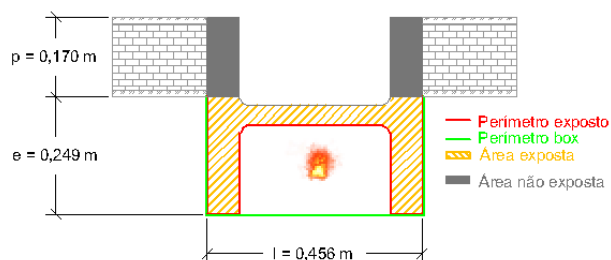


Figura A.4.19: UC 356x406x551

Quadro A.4.73: UC 356x406x551 – Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	180	211.430	184.310	106.270	1.175	1.024	0.590
60	917	708.830	645.790	482.210	0.773	0.704	0.526
120	1032	938.640	814.690	686.530	0.910	0.789	0.665
MÉDIA					0.952	0.839	0.594

Quadro A.4.74: UC 356x406x551 – Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	157	211.430	184.310	106.270	1.347	1.174	0.677
60	757	708.830	645.790	482.210	0.936	0.853	0.637
120	1022	938.640	814.690	686.530	0.918	0.797	0.672
MÉDIA					1.067	0.941	0.662

Quadro A.4.75: UC 356x406x551 – Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	165	211.430	184.310	106.270	1.281	1.117	0.644
60	805	708.830	645.790	482.210	0.881	0.802	0.599
120	1027	938.640	814.690	686.530	0.914	0.793	0.668
MÉDIA					1.025	0.904	0.637

Quadro A.4.76: UC 356x406x551 – Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	143	211.430	184.310	106.270	1.479	1.289	0.743
60	729	708.830	645.790	482.210	0.972	0.886	0.661
120	1039	938.640	814.690	686.530	0.903	0.784	0.661
MÉDIA					1.118	0.986	0.688

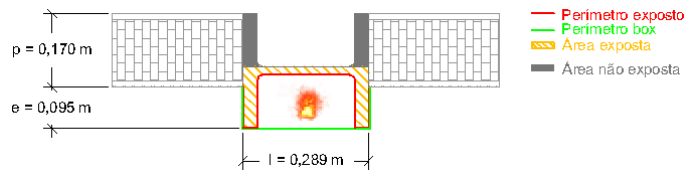
A.4.20. W 250x250x167


Figura A.4.20: W 250x250x167

 Quadro A.4.77: W 250x250x167 – Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	362	311.719	292.452	146.319	0.861	0.808	0.404
60	912	772.034	703.866	522.346	0.847	0.772	0.573
120	1043	924.363	826.939	652.948	0.886	0.793	0.626
MÉDIA					0.865	0.791	0.534

 Quadro A.4.78: W 250x250x167 – Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	258	311.719	292.452	146.319	1.208	1.134	0.567
60	905	772.034	703.866	522.346	0.853	0.778	0.577
120	1039	924.363	826.939	652.948	0.890	0.796	0.628
MÉDIA					0.984	0.902	0.591

 Quadro A.4.79: W 250x250x167 – Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	301	311.719	292.452	146.319	1.036	0.972	0.486
60	882	772.034	703.866	522.346	0.875	0.798	0.592
120	1041	924.363	826.939	652.948	0.888	0.794	0.627
MÉDIA					0.933	0.855	0.569

 Quadro A.4.80: W 250x250x167 – Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	212	311.719	292.452	146.319	1.470	1.379	0.690
60	827	772.034	703.866	522.346	0.934	0.851	0.632
120	1036	924.363	826.939	652.948	0.892	0.798	0.630
MÉDIA					1.099	1.010	0.651

A.4.21. W 460x280x235

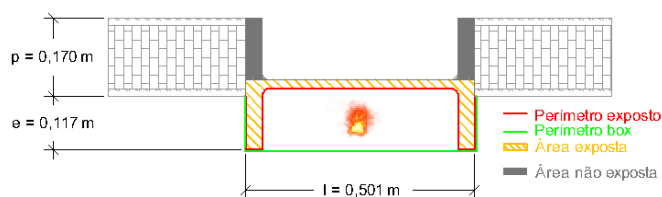


Figura A.4.21: W 460x280x235

Quadro A.4.81: W 460x280x235 – Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{P_{exp}}{A_{exp}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	349	301.107	313.622	141.700	0.863	0.899	0.406
60	908	769.269	715.602	518.187	0.847	0.788	0.571
120	1043	929.357	832.702	657.873	0.891	0.798	0.631
MÉDIA					0.867	0.828	0.536

Quadro A.4.82: W 460x280x235 – Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{P_{exp}}{A_{tot.perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	260	301.107	313.622	141.700	1.158	1.206	0.545
60	893	769.269	715.602	518.187	0.861	0.801	0.580
120	1040	929.357	832.702	657.873	0.894	0.801	0.633
MÉDIA					0.971	0.936	0.586

Quadro A.4.83: W 460x280x235 – Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{P_{box}}{A_{exp}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	307	301.107	313.622	141.700	0.981	1.022	0.462
60	1023	769.269	715.602	518.187	0.752	0.700	0.507
120	1042	929.357	832.702	657.873	0.892	0.799	0.631
MÉDIA					0.875	0.840	0.533

Quadro A.4.84: W 460x280x235 – Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{P_{box}}{A_{tot.perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	227	301.107	313.622	141.700	1.326	1.382	0.624
60	854	769.269	715.602	518.187	0.901	0.838	0.607
120	1037	929.357	832.702	657.873	0.896	0.803	0.634
MÉDIA					1.041	1.008	0.622

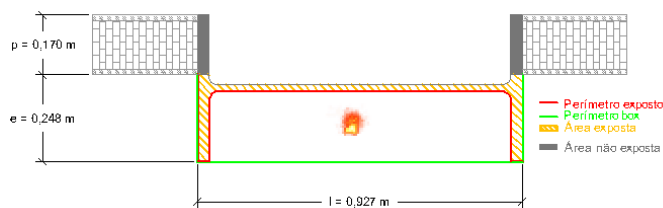
A.4.22. W 920x420x344


Figura A.4.22: W 920x420x344

 Quadro A.4.85: W 920x420x344 – Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	369	370.741	347.939	160.676	1.005	0.943	0.435
60	914	844.236	727.653	515.417	0.924	0.796	0.564
120	1043	1000.870	844.215	653.920	0.960	0.809	0.627
MÉDIA					0.963	0.849	0.542

 Quadro A.4.86: W 920x420x344 – Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	301	370.741	347.939	160.676	1.232	1.156	0.534
60	770	844.236	727.653	515.417	1.096	0.945	0.669
120	1041	1000.870	844.215	653.920	0.961	0.811	0.628
MÉDIA					1.097	0.971	0.610

 Quadro A.4.87: W 920x420x344 – Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	347	370.741	347.939	160.676	1.068	1.003	0.463
60	908	844.236	727.653	515.417	0.930	0.801	0.568
120	1043	1000.870	844.215	653.920	0.960	0.809	0.627
MÉDIA					0.986	0.871	0.553

 Quadro A.4.88: W 920x420x344 – Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		MBA	ALMA	MBNA	MBA	ALMA	MBNA
15	282	370.741	347.939	160.676	1.315	1.234	0.570
60	866	844.236	727.653	515.417	0.975	0.840	0.595
120	1041	1000.870	844.215	653.920	0.961	0.811	0.628
MÉDIA					1.084	0.962	0.598

ANEXO B. Temperaturas nos pilares c/ alma perpendicular à parede

B.1. Pilares inseridos em parede de 7 cm - Gráficos

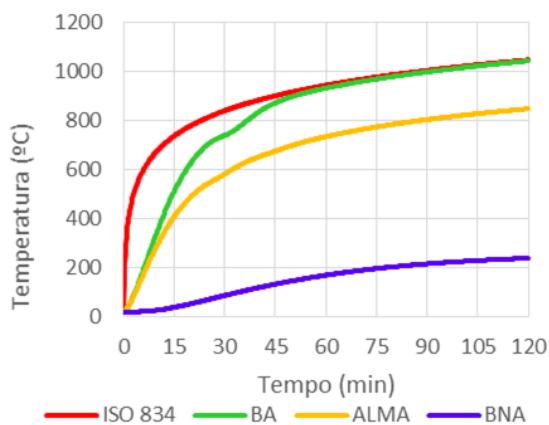


Figura B.1.1: Gráfico HD 320x127

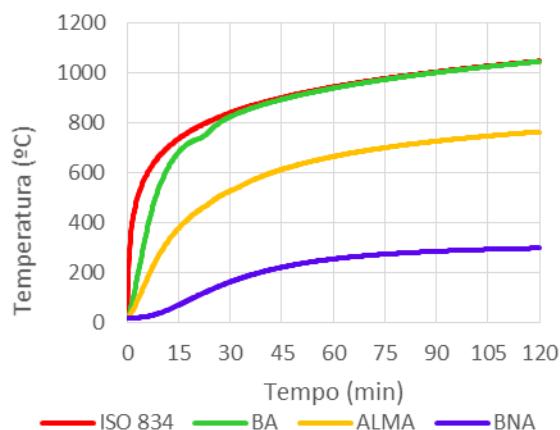


Figura B.1.4: Gráfico IPE 180

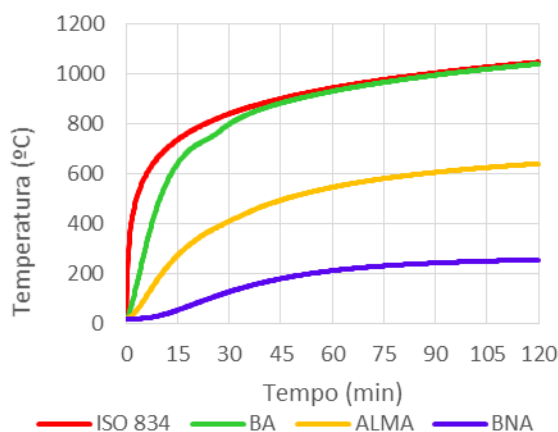


Figura B.1.2: Gráfico HE 160 A

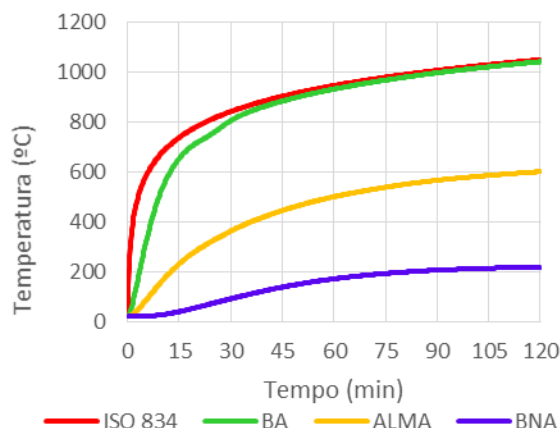


Figura B.1.5: Gráfico HE 160 AA

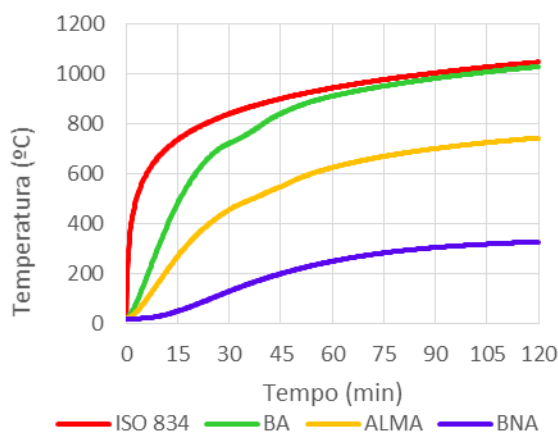


Figura B.1.3: Gráfico HE 160 M

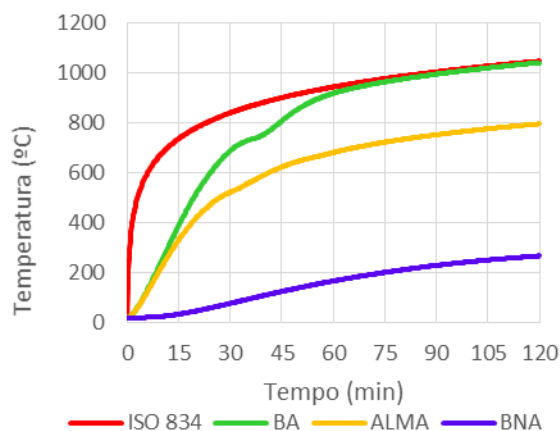


Figura B.1.6: Gráfico HE 450 M

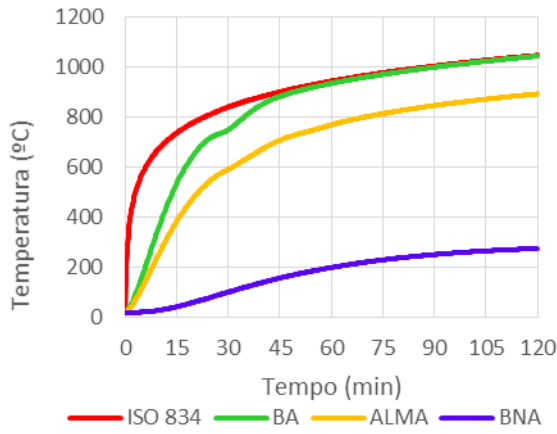


Figura B.1.7: Gráfico HP 360x174

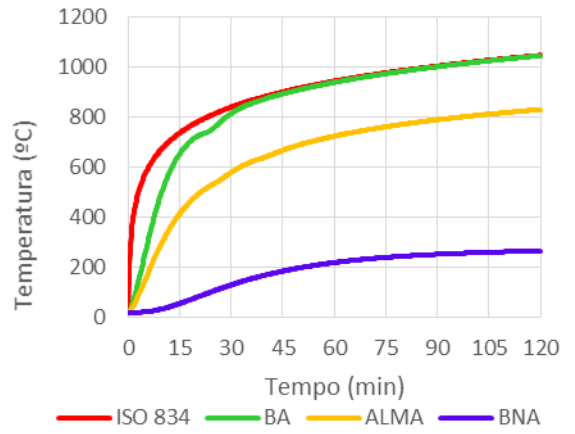


Figura B.1.10: Gráfico HP 250x62

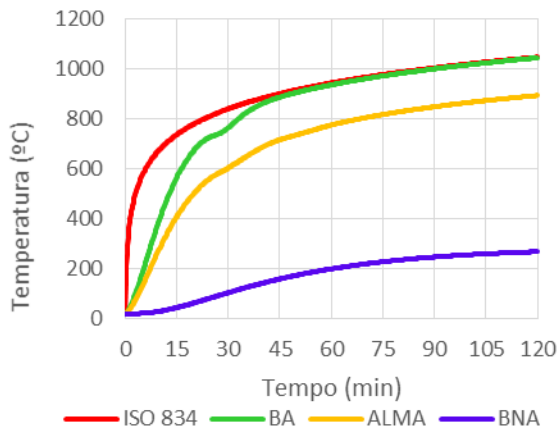


Figura B.1.8: Gráfico HP 360x152

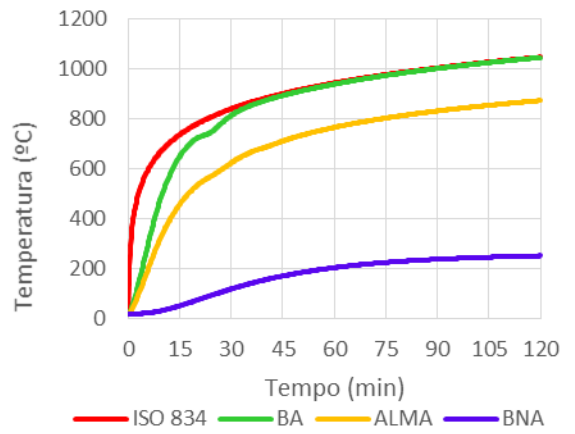


Figura B.1.11: Gráfico HP 305x79

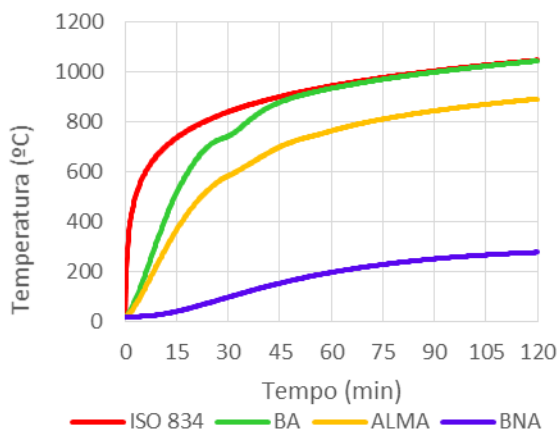


Figura B.1.9: Gráfico HP 400x194

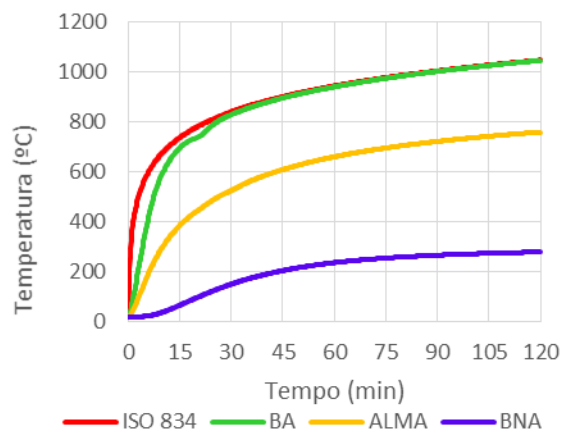


Figura B.1.12: Gráfico IPEO 180

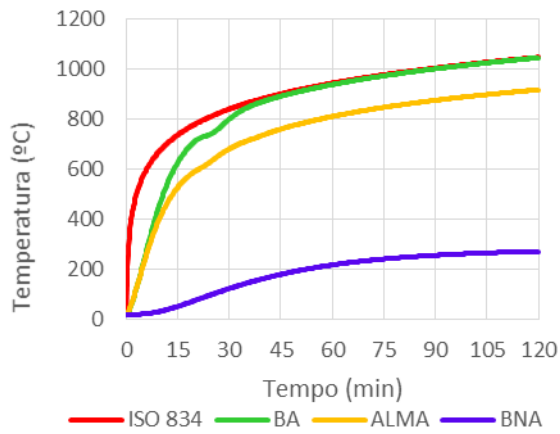


Figura B.1.13: Gráfico IPE 400

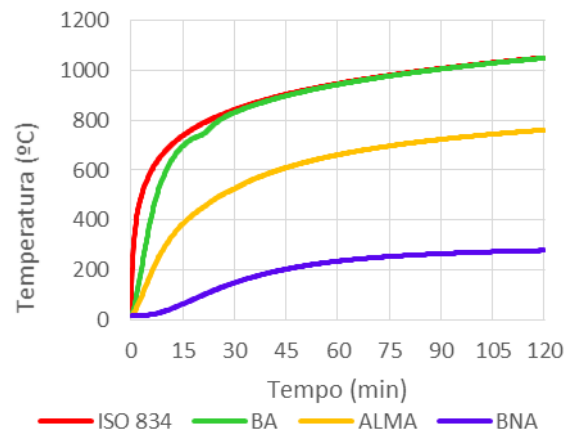


Figura B.1.16: Gráfico IPEA 180

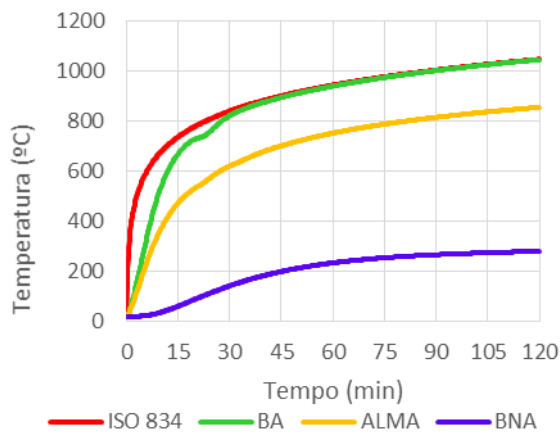


Figura B.1.14: Gráfico IPEO 270

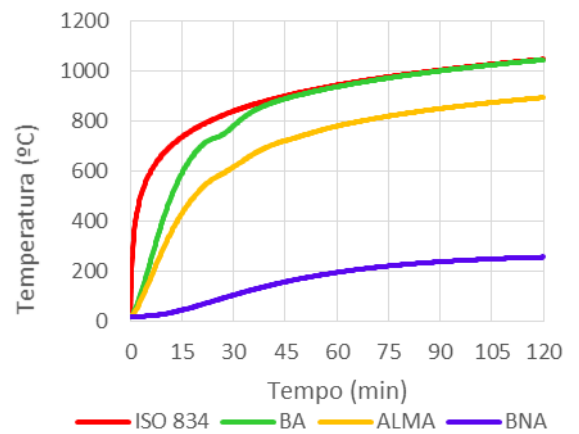


Figura B.1.17: Gráfico UBP 356x368x133

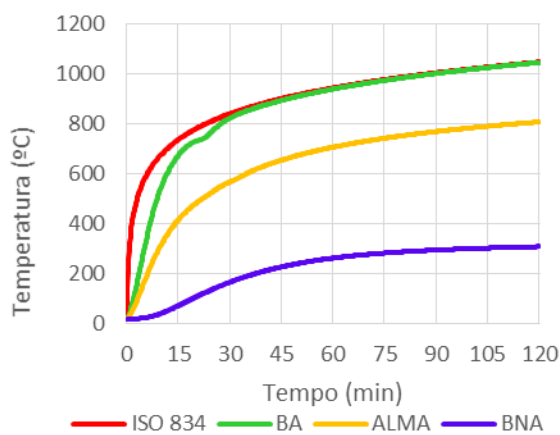


Figura B.1.15: Gráfico UB 254x102x28

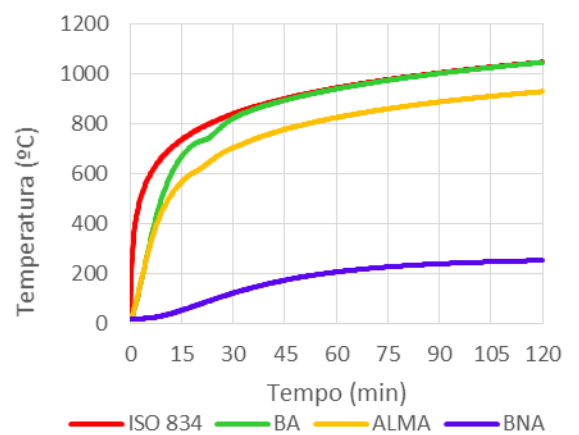


Figura B.1.18: Gráfico UB 406x178x54

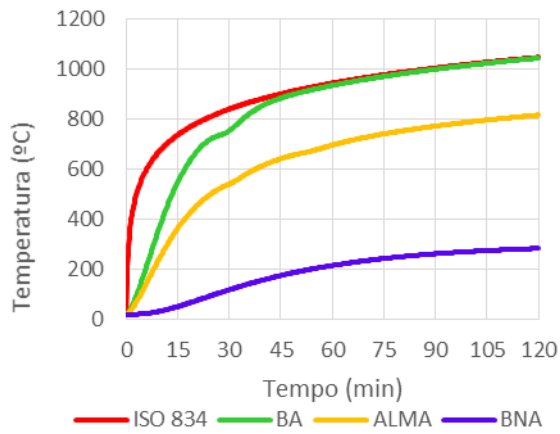


Figura B.1.19: Gráfico UC 254x254x107

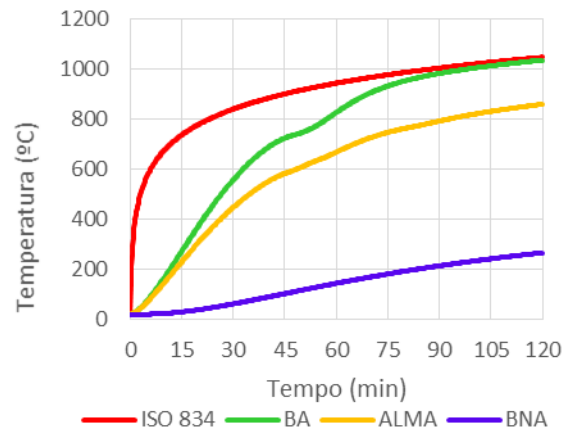


Figura B.1.22: Gráfico UC356x406x551

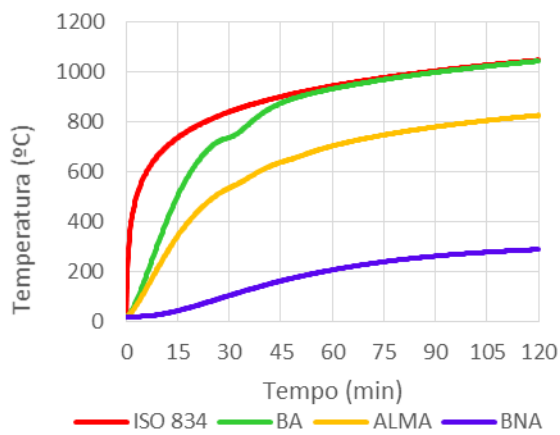


Figura B.1.20: Gráfico W 250x250x131

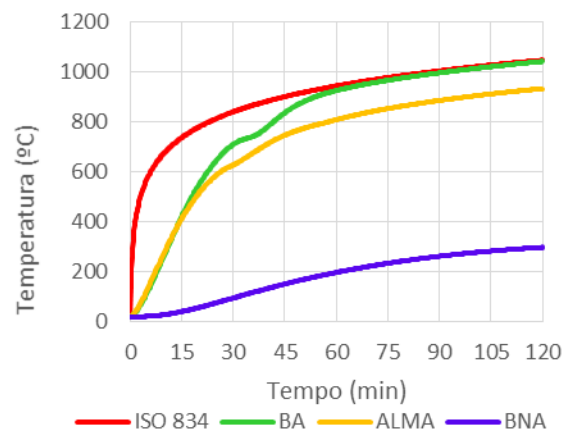


Figura B.1.23: Gráfico W 460x280x235

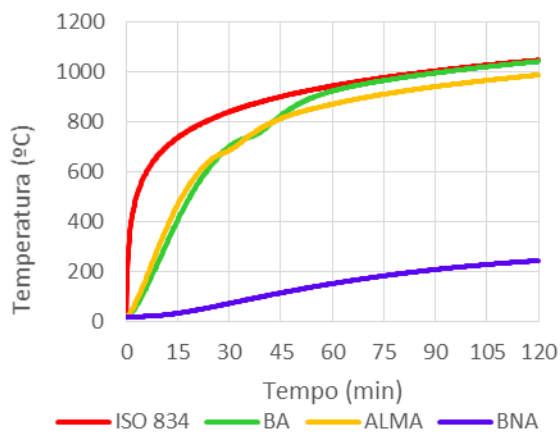
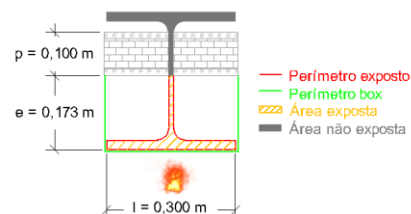


Figura B.1.21: Gráfico W 920x420x390

B.2. Pilares inseridos em parede de 7 cm – Quadros

B.2.1. HD 320 x127



Quadro B.2.1: HD 320x127 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Figura B.2.1: HD 320x127

- Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	592	513.330	469.969	38.520	0.867	0.794	0.065
60	939	933.950	735.722	169.780	0.995	0.784	0.181
120	1047	1044.890	849.421	239.010	0.998	0.811	0.228
MÉDIA					0.953	0.796	0.158

Quadro B.2.2: HD 320x127 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	415	513.330	469.969	38.520	1.237	1.132	0.093
60	924	933.950	735.722	169.780	1.011	0.796	0.184
120	1044	1044.890	849.421	239.010	1.001	0.814	0.229
MÉDIA					1.083	0.914	0.169

Quadro B.2.3: HD 320x127 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	506	513.330	469.969	38.520	1.014	0.929	0.076
60	934	933.950	735.722	169.780	1.000	0.788	0.182
120	1046	1044.890	849.421	239.010	0.999	0.812	0.228
MÉDIA					1.004	0.843	0.162

Quadro B.2.4: HD 320x127 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	328	513.330	469.969	38.520	1.565	1.433	0.117
60	900	933.950	735.722	169.780	1.038	0.817	0.189
120	1042	1044.890	849.421	239.010	1.003	0.815	0.229
MÉDIA					1.202	1.022	0.178

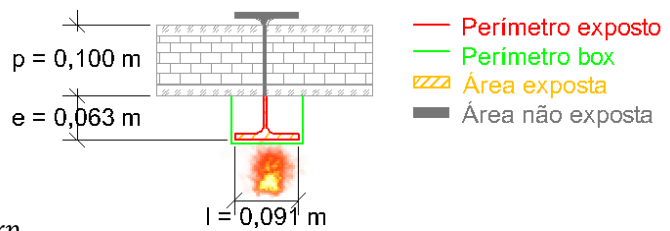
B.2.2. IPE 180

 Quadro B.2.5: IPE 180 – Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Figura B.2.2: IPE 180

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	705	684.520	380.315	71.600	0.971	0.539	0.102
60	943	940.580	666.384	255.540	0.997	0.707	0.271
120	1048	1046.860	765.343	299.050	0.999	0.730	0.285
MÉDIA					0.989	0.659	0.219

 Quadro B.2.6: IPE 180 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	611	684.520	380.315	71.600	1.120	0.622	0.117
60	940	940.580	666.384	255.540	1.001	0.709	0.272
120	1047	1046.860	765.343	299.050	1.000	0.731	0.286
MÉDIA					1.040	0.687	0.225

 Quadro B.2.7: IPE 180 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	681	684.520	380.315	71.600	1.005	0.558	0.105
60	942	940.580	666.384	255.540	0.999	0.707	0.271
120	1048	1046.860	765.343	299.050	0.999	0.730	0.285
MÉDIA					1.001	0.665	0.221

 Quadro B.2.8: IPE 180 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	542	684.520	380.315	71.600	1.263	0.702	0.132
60	937	940.580	666.384	255.540	1.004	0.711	0.273
120	1046	1046.860	765.343	299.050	1.001	0.732	0.286
MÉDIA					1.089	0.715	0.230

B.2.3. HE 160 A

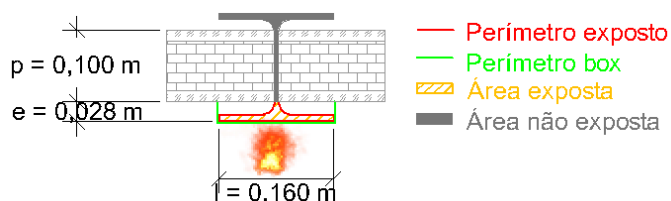


Figura B.2.3: HE 160 A

Quadro B.2.9: HE 160 A- Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{P_{exp}}{A_{exp}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	687	643.490	275.256	54.650	0.937	0.401	0.080
60	942	932.070	547.154	212.630	0.989	0.581	0.226
120	1048	1041.230	641.227	255.980	0.994	0.612	0.244
MÉDIA					0.973	0.531	0.183

Quadro B.2.10: HE 160 A- Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{P_{exp}}{A_{tot.perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	545	643.490	275.256	54.650	1.181	0.505	0.100
60	938	932.070	547.154	212.630	0.994	0.583	0.227
120	1046	1041.230	641.227	255.980	0.995	0.613	0.245
MÉDIA					1.057	0.567	0.191

Quadro B.2.11: HE 160 A- Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{P_{box}}{A_{exp}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	618	643.490	275.256	54.650	1.041	0.445	0.088
60	940	932.070	547.154	212.630	0.992	0.582	0.226
120	1047	1041.230	641.227	255.980	0.994	0.612	0.244
MÉDIA					1.009	0.547	0.186

Quadro B.2.12: HE 160 A- Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{P_{box}}{A_{tot.perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	412	643.490	275.256	54.650	1.562	0.668	0.133
60	923	932.070	547.154	212.630	1.010	0.593	0.230
120	1044	1041.230	641.227	255.980	0.997	0.614	0.245
MÉDIA					1.190	0.625	0.203

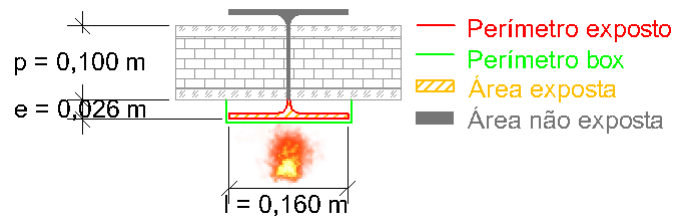
B.2.4. HE 160 AA


Figura B.2.4: HE 160 AA

 Quadro B.2.13: HE 160 AA- Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	705	654.688	231.982	38.884	0.929	0.329	0.055
60	943	931.427	499.564	170.407	0.988	0.530	0.181
120	1048	1040.927	600.073	217.928	0.993	0.573	0.208
MÉDIA					0.970	0.477	0.148

 Quadro B.2.14: HE 160 AA- Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	600	654.688	231.982	38.884	1.091	0.387	0.065
60	939	931.427	499.564	170.407	0.992	0.532	0.181
120	1047	1040.927	600.073	217.928	0.994	0.573	0.208
MÉDIA					1.026	0.497	0.151

 Quadro B.2.15: HE 160 AA- Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	658	654.688	231.982	38.884	0.995	0.353	0.059
60	941	931.427	499.564	170.407	0.990	0.531	0.181
120	1047	1040.927	600.073	217.928	0.994	0.573	0.208
MÉDIA					0.993	0.486	0.149

 Quadro B.2.16: HE 160 AA- Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	472	654.688	231.982	38.884	1.387	0.491	0.082
60	931	931.427	499.564	170.407	1.000	0.537	0.183
120	1045	1040.927	600.073	217.928	0.996	0.574	0.209
MÉDIA					1.128	0.534	0.158

B.2.5. HE 450 M

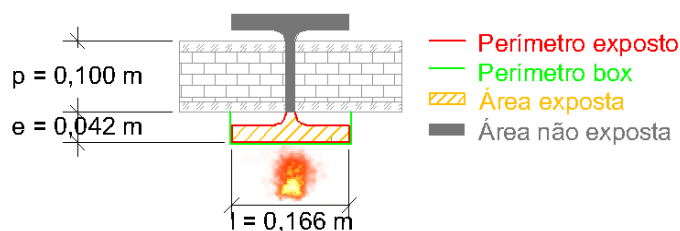


Figura B.2.5: HE 450 M

Quadro B.2.17: HE 450 M- Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	454	391.300	332.971	34.1800	0.862	0.733	0.075
60	929	920.090	682.459	167.180	0.990	0.735	0.180
120	1045	1042.700	797.223	267.660	0.998	0.763	0.256
MÉDIA					0.950	0.744	0.170

Quadro B.2.18: HE 450 M- Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	301	391.300	332.971	34.1800	1.300	1.106	0.114
60	920	920.090	682.459	167.180	1.000	0.742	0.182
120	1041	1042.700	797.223	267.660	1.002	0.766	0.257
MÉDIA					1.101	0.871	0.184

Quadro B.2.19: HE 450 M- Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	388	391.30	332.971	34.180	1.009	0.858	0.088
60	919	920.09	682.459	167.18	0.001	0.743	0.182
120	1044	1042.70	797.223	267.66	0.999	0.764	0.256
MÉDIA					1.003	0.788	0.175

Quadro B.2.20: HE 450 M- Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	249	391.300	332.971	34.1800	1.571	1.337	0.137
60	867	920.090	682.459	167.180	1.061	0.787	0.193
120	1039	1042.700	797.223	267.660	1.004	0.767	0.258
MÉDIA					1.212	0.964	0.196

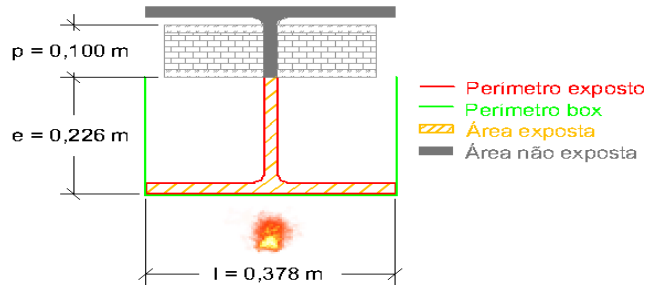
B.2.6. HP 360x174


Figura B.2.6: HP 360x174

 Quadro B.2.21: HP 360x174- Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	560	537.620	385.502	42.570	0.960	0.688	0.076
60	938	936.380	770.351	199.660	0.998	0.821	0.213
120	1046	1045.690	894.289	275.780	1.000	0.855	0.264
MÉDIA					0.986	0.788	0.184

 Quadro B.2.22: HP 360x174- Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	398	537.620	385.502	42.570	1.351	0.969	0.107
60	921	936.380	770.351	199.660	1.017	0.836	0.217
120	1044	1045.690	894.289	275.780	1.002	0.857	0.264
MÉDIA					1.123	0.887	0.196

 Quadro B.2.23: HP 360x174- Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	470	537.620	385.502	42.570	1.144	0.820	0.091
60	931	936.380	770.351	199.660	1.006	0.827	0.214
120	1045	1045.690	894.289	275.780	1.001	0.856	0.264
MÉDIA					1.050	0.834	0.190

 Quadro B.2.24: HP 360x174- Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	312	537.620	385.502	42.570	1.723	1.236	0.136
60	884	936.380	770.351	199.660	1.059	0.871	0.226
120	1042	1045.690	894.289	275.780	1.004	0.858	0.265
MÉDIA					1.262	0.988	0.209

B.2.7. HP 250x62

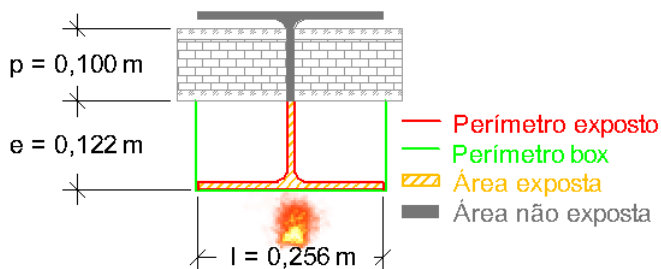


Figura B.2.7: HP 250x62

Quadro B.2.25: HP 250x62- Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	673	655.500	415.907	55.890	0.974	0.618	0.083
60	942	940.490	725.310	219.440	0.998	0.770	0.233
120	1048	1047.120	831.700	265.960	0.999	0.794	0.254
MÉDIA					0.991	0.727	0.190

Quadro B.2.26: HP 250x62- Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	545	655.500	415.907	55.890	1.203	0.763	0.103
60	938	940.490	725.310	219.440	1.003	0.773	0.234
120	1046	1047.120	831.700	265.960	1.001	0.795	0.254
MÉDIA					1.069	0.777	0.197

Quadro B.2.27: HP 250x62- Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	614	655.500	415.907	55.890	1.068	0.677	0.091
60	940	940.490	725.310	219.440	1.001	0.772	0.233
120	1047	1047.120	831.700	265.960	1.000	0.794	0.254
MÉDIA					1.023	0.748	0.193

Quadro B.2.28: HP 250x62- Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	443	655.500	415.907	55.890	1.480	0.939	0.126
60	928	940.490	725.310	219.440	1.013	0.782	0.236
120	1045	1047.120	831.700	265.960	1.002	0.796	0.255
MÉDIA					1.165	0.839	0.206

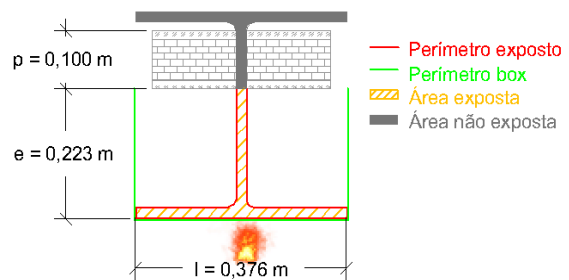
B.2.8. HP 360x152


Figura B.2.8: HP 360x152

 Quadro B.2.29: HP 360x152- Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	590	567.480	410.087	44.3700	0.962	0.695	0.075
60	939	937.640	776.496	199.760	0.999	0.827	0.213
120	1047	1046.110	894.960	268.540	0.999	0.855	0.256
MÉDIA					0.987	0.792	0.181

 Quadro B.2.30: HP 360x152- Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	433	567.480	410.087	44.370	1.311	0.947	0.102
60	926	937.640	776.496	199.760	1.013	0.839	0.216
120	1045	1046.110	894.960	268.540	1.001	0.856	0.257
MÉDIA					1.108	0.881	0.192

 Quadro B.2.31: HP 360x152- Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	505	567.480	410.087	44.3700	1.124	0.812	0.088
60	934	937.640	776.496	199.760	1.004	0.831	0.214
120	1047	1046.110	894.960	268.540	1.000	0.856	0.257
MÉDIA					1.043	0.833	0.186

 Quadro B.2.32: HP 360x152- Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	342	567.480	410.087	44.370	1.659	1.199	0.130
60	906	937.640	776.496	199.760	1.035	0.857	0.220
120	1043	1046.110	894.960	268.540	1.003	0.858	0.257
MÉDIA					1.232	0.971	0.203

B.2.9. HP 305x79

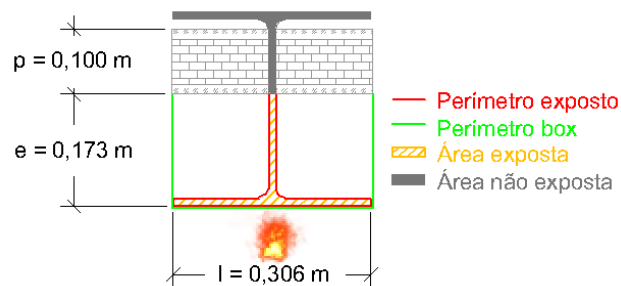


Figura B.2.9: HP 305x79

Quadro B.2.33: HP 305x79- Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	668	651.760	459.858	51.940	0.976	0.688	0.078
60	941	940.580	767.362	204.640	1.000	0.815	0.217
120	1048	1047.19	874.595	252.050	0.999	0.835	0.241
MÉDIA					0.991	0.779	0.179

Quadro B.2.34: HP 305x79- Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	546	651.760	459.858	51.940	1.194	0.842	0.095
60	938	940.580	767.362	204.640	1.003	0.818	0.218
120	1046	1047.190	874.595	252.050	1.001	0.836	0.241
MÉDIA					1.066	0.832	0.185

Quadro B.2.35: HP 305x79- Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	610	651.760	459.858	51.940	1.068	0.754	0.085
60	940	940.580	767.362	204.640	1.001	0.816	0.218
120	1047	1047.190	874.595	252.050	1.000	0.835	0.241
MÉDIA					1.023	0.802	0.181

Quadro B.2.36: HP 305x79- Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	453	651.760	459.858	51.940	1.442	1.017	0.115
60	929	940.580	767.362	204.640	1.012	0.826	0.220
120	1045	1047.190	874.595	252.050	1.002	0.837	0.241
MÉDIA					1.152	0.893	0.192

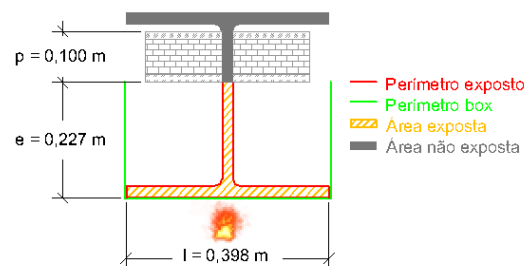
B.2.10. HP 400x194


Figura B.2.10: HP 400x194

 Quadro B.2.37: HP 400x194- Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	541	519.340	370.590	41.430	0.96	0.685	0.077
60	937	935.520	765.236	197.590	0.998	0.817	0.211
120	1046	1045.420	892.934	278.120	0.999	0.854	0.266
MÉDIA					0.986	0.785	0.184

 Quadro B.2.38: HP 400x194- Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	378	519.340	370.590	41.430	1.374	0.980	0.110
60	916	935.520	765.236	197.590	1.021	0.835	0.216
120	1044	1045.420	892.934	278.120	1.001	0.855	0.266
MÉDIA					1.132	0.890	0.197

 Quadro B.2.39: HP 400x194- Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	447	519.340	370.590	41.430	1.162	0.829	0.093
60	928	935.520	765.236	197.590	1.008	0.825	0.213
120	1045	1045.420	892.934	278.120	1.000	0.854	0.266
MÉDIA					1.057	0.836	0.191

 Quadro B.2.40: HP 400x194- Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	293	519.340	370.590	41.430	1.771	1.265	0.141
60	886	935.520	765.236	197.590	1.056	0.864	0.223
120	1041	1045.420	892.934	278.120	1.004	0.858	0.267
MÉDIA					1.278	0.995	0.211

B.2.11. IPEO 180

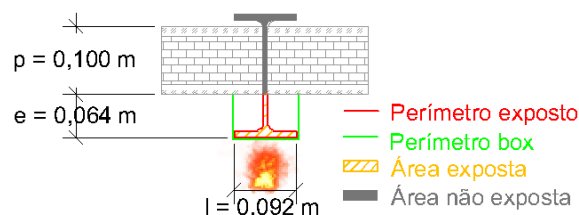


Figura B.2.11: IPEO 180

Quadro B.2.41: IPEO 180- Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	714	697.670	386.402	66.190	0.977	0.541	0.093
60	943	941.610	661.258	236.610	0.999	0.701	0.251
120	1048	1047.360	760.401	279.330	0.999	0.726	0.267
MÉDIA					0.992	0.656	0.203

Quadro B.2.42: IPEO 180- Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	645	697.670	386.402	66.190	1.082	0.599	0.103
60	941	941.610	661.258	236.610	1.001	0.703	0.251
120	1047	1047.360	760.401	279.330	1.000	0.726	0.267
MÉDIA					1.028	0.676	0.207

Quadro B.2.43: IPEO 180- Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	698	697.670	386.402	66.190	1.000	0.554	0.095
60	943	941.610	661.258	236.610	0.999	0.701	0.251
120	1048	1047.360	760.401	279.330	0.999	0.726	0.267
MÉDIA					0.999	0.660	0.204

Quadro B.2.44: IPEO 180- Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	585	697.670	386.402	66.190	1.193	0.661	0.113
60	939	941.610	661.258	236.610	1.003	0.704	0.252
120	1047	1047.360	760.401	279.330	1.000	0.726	0.267
MÉDIA					1.065	0.697	0.211

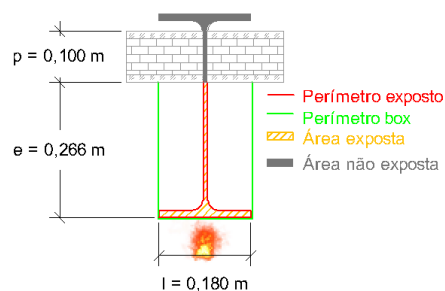
B.2.12. IPE 400


Figura B.2.12: IPE 400

 Quadro B.2.45: IPE 400- Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	671	628.440	528.952	52.140	0.937	0.788	0.078
60	942	939.590	812.124	217.930	0.997	0.862	0.231
120	1048	1046.790	918.774	272.380	0.999	0.877	0.260
MÉDIA					0.978	0.842	0.190

 Quadro B.2.46: IPE 400- Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	570	628.440	528.952	52.140	1.103	0.928	0.091
60	938	939.590	812.124	217.930	1.002	0.866	0.232
120	1047	1046.790	918.774	272.380	1.000	0.878	0.260
MÉDIA					1.035	0.890	0.195

 Quadro B.2.47: IPE 400- Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	643	628.440	528.952	52.140	0.977	0.823	0.081
60	941	939.590	812.124	217.930	0.999	0.863	0.232
120	1047	1046.790	918.774	272.380	1.000	0.878	0.260
MÉDIA					0.992	0.854	0.191

 Quadro B.2.48: IPE 400- Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	522	628.440	528.952	52.140	1.204	1.013	0.100
60	937	939.590	812.124	217.930	1.003	0.867	0.233
120	1046	1046.790	918.774	272.380	1.001	0.878	0.260
MÉDIA					1.069	0.919	0.198

B.2.13. IPEA 180

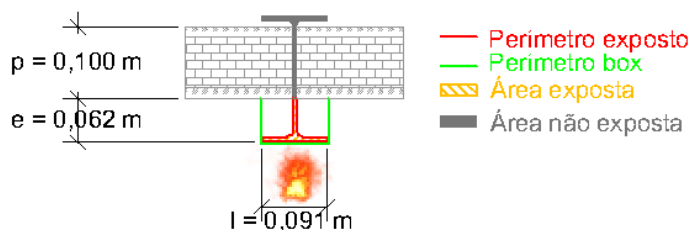


Figura B.2.13: IPEA 180

Quadro B.2.49: IPEA 180- Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{P_{exp}}{A_{exp}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	714	697.670	386.402	66.190	0.977	0.541	0.093
60	943	941.610	661.258	236.610	0.999	0.701	0.251
120	1048	1046.370	760.409	279.330	0.998	0.726	0.267
MÉDIA					0.991	0.656	0.203

Quadro B.2.50: IPEA 180- Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{P_{exp}}{A_{tot.perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	645	697.670	386.402	66.190	1.082	0.599	0.103
60	941	941.610	661.258	236.610	1.001	0.703	0.251
120	1047	1046.370	760.409	279.330	0.999	0.726	0.267
MÉDIA					1.027	0.676	0.207

Quadro B.2.51: IPEA 180- Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{P_{box}}{A_{exp}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	698	697.670	386.402	66.190	1.000	0.554	0.095
60	943	941.610	661.258	236.610	0.999	0.701	0.251
120	1048	1046.370	760.409	279.330	0.998	0.726	0.267
MÉDIA					0.999	0.660	0.204

Quadro B.2.52: IPEA 180- Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{P_{box}}{A_{tot.perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	585	697.670	386.402	66.190	1.193	0.661	0.113
60	939	941.610	661.258	236.610	1.003	0.704	0.252
120	1047	1046.370	760.409	279.330	0.999	0.726	0.267
MÉDIA					1.065	0.697	0.211

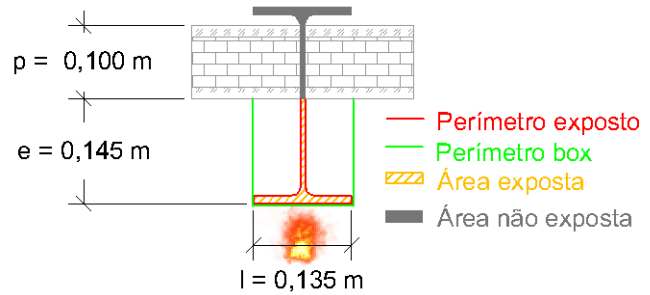
B.2.14. IPEO 270


Figura B.2.14: IPEO 270

 Quadro B.2.53: IPEO 270- Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	681	670.930	473.927	61.180	0.985	0.696	0.090
60	942	941.130	753.506	234.160	0.999	0.800	0.249
120	1048	1047.370	856.634	280.280	0.999	0.817	0.267
MÉDIA					0.995	0.771	0.202

 Quadro B.2.54: IPEO 270- Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	566	670.930	473.927	61.180	1.185	0.837	0.108
60	938	941.130	753.506	234.160	1.003	0.803	0.250
120	1046	1047.370	856.634	280.280	1.001	0.819	0.268
MÉDIA					1.063	0.820	0.209

 Quadro B.2.55: IPEO 270- Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	650	670.930	473.927	61.180	1.032	0.729	0.094
60	941	941.130	753.506	234.160	1.000	0.801	0.249
120	1047	1047.370	856.634	280.280	1.000	0.818	0.268
MÉDIA					1.011	0.783	0.204

 Quadro B.2.56: IPEO 270- Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	505	670.930	473.927	61.180	1.329	0.938	0.121
60	934	941.130	753.506	234.160	1.008	0.807	0.251
120	1046	1047.370	856.634	280.280	1.001	0.819	0.268
MÉDIA					1.113	0.855	0.213

B.2.15. UBP 356x368x133

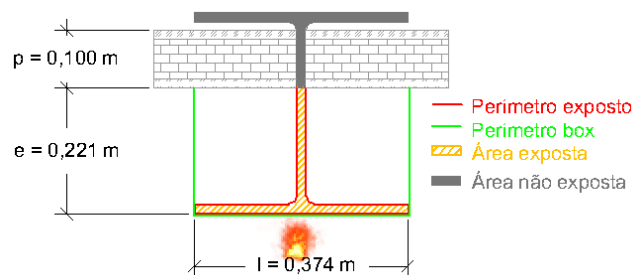


Figura B.2.15: UBP 356x368x133

Quadro B.2.57: UBP 356x368x133- Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	616	595.080	434.348	45.380	0.966	0.705	0.074
60	940	938.660	781.455	195.950	0.999	0.831	0.208
120	1047	1046.480	895.619	257.250	1.000	0.855	0.246
MÉDIA					0.988	0.797	0.176

Quadro B.2.58: UBP 356x368x133- Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	468	595.080	434.348	45.380	1.272	0.928	0.097
60	931	938.660	781.455	195.950	1.008	0.839	0.210
120	1045	1046.480	895.619	257.250	1.001	0.857	0.246
MÉDIA					1.094	0.875	0.185

Quadro B.2.59: UBP 356x368x133- Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	536	595.080	434.348	45.380	1.110	0.810	0.085
60	937	938.660	781.455	195.950	1.002	0.834	0.209
120	1046	1046.480	895.619	257.250	1.000	0.856	0.246
MÉDIA					1.037	0.834	0.180

Quadro B.2.60: UBP 356x368x133- Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	373	595.080	434.348	45.380	1.595	1.164	0.122
60	915	938.660	781.455	195.950	1.026	0.854	0.214
120	1044	1046.480	895.619	257.250	1.002	0.858	0.246
MÉDIA					1.208	0.959	0.194

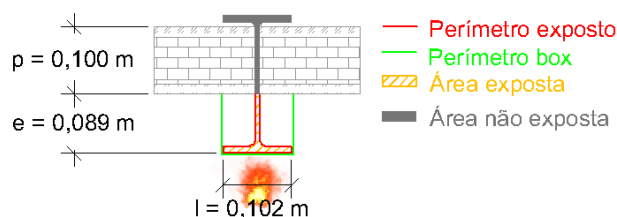
B.2.16. UB 254x102x28


Figura B.2.16: UB 254x102x28

 Quadro B.2.61: UB 254x102x28- Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	688	675.860	417.525	72.690	0.982	0.607	0.106
60	942	940.700	707.786	262.920	0.999	0.751	0.279
120	1048	1047.040	808.943	308.700	0.999	0.772	0.295
MÉDIA					0.993	0.710	0.226

 Quadro B.2.62: UB 254x102x28- Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	571	675.860	417.525	72.690	1.184	0.731	0.127
60	938	940.700	707.786	262.920	1.003	0.755	0.280
120	1047	1047.040	808.943	308.700	1.000	0.773	0.295
MÉDIA					1.062	0.753	0.234

 Quadro B.2.63: UB 254x102x28- Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	655	675.860	417.525	72.690	1.032	0.637	0.111
60	941	940.700	707.786	262.920	1.000	0.752	0.279
120	1047	1047.040	808.943	308.700	1.000	0.773	0.295
MÉDIA					1.011	0.721	0.228

 Quadro B.2.64: UB 254x102x28- Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	501	675.860	417.525	72.690	1.349	0.833	0.145
60	934	940.700	707.786	262.920	1.007	0.758	0.281
120	1046	1047.040	808.943	308.700	1.001	0.773	0.295
MÉDIA					1.119	0.788	0.241

B.2.17. UB 406x178x54

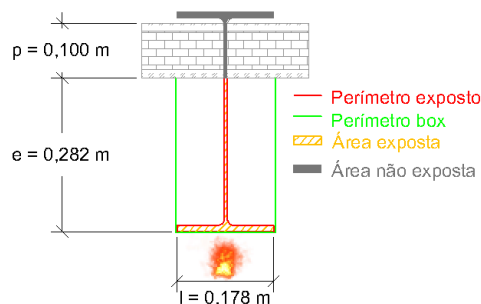


Figura B.2.17: UB 406x178x54

Quadro B.2.65: UB 406x178x54- Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	694	671.330	569.080	54.100	0.967	0.820	0.078
60	942	941.210	826.699	207.360	0.999	0.878	0.220
120	1048	1047.420	930.741	253.500	0.999	0.888	0.242
MÉDIA					0.989	0.862	0.180

Quadro B.2.66: UB 406x178x54- Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	623	671.330	569.080	54.100	1.078	0.913	0.087
60	940	941.210	826.699	207.360	1.001	0.879	0.221
120	1047	1047.420	930.741	253.500	1.000	0.889	0.242
MÉDIA					1.026	0.894	0.183

Quadro B.2.67: UB 406x178x54- Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	676	671.330	569.080	54.100	0.993	0.842	0.080
60	942	941.210	826.699	207.360	0.999	0.878	0.220
120	1048	1047.420	930.741	253.500	0.999	0.888	0.242
MÉDIA					0.997	0.869	0.181

Quadro B.2.68: UB 406x178x54- Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	582	671.330	569.080	54.100	1.153	0.978	0.093
60	939	941.210	826.699	207.360	1.002	0.880	0.221
120	1047	1047.420	930.741	253.500	1.000	0.889	0.242
MÉDIA					1.052	0.916	0.185

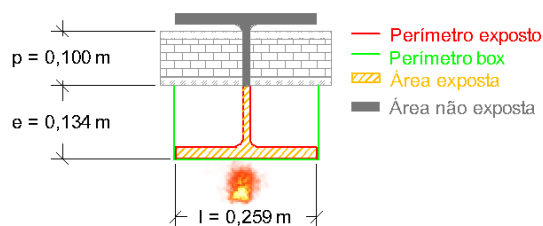
B.2.18. UC 254x254x107


Figura B.2.18: UC 254x254x107

 Quadro B.2.69: UC 254x254x107- Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	591	550.780	365.798	51.530	0.932	0.619	0.087
60	939	936.130	697.671	215.720	0.997	0.743	0.230
120	1047	1045.500	817.389	283.910	0.999	0.781	0.271
MÉDIA					0.976	0.714	0.196

 Quadro B.2.70: UC 254x254x107- Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	411	550.780	365.798	51.530	1.340	0.890	0.125
60	923	936.130	697.671	215.720	1.014	0.756	0.234
120	1044	1045.500	817.389	283.910	1.001	0.783	0.272
MÉDIA					1.119	0.810	0.210

 Quadro B.2.71: UC 254x254x107- Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	500	550.780	365.798	51.530	1.102	0.732	0.103
60	934	936.130	697.671	215.720	1.002	0.747	0.231
120	1046	1045.500	817.389	283.910	1.000	0.781	0.271
MÉDIA					1.034	0.753	0.202

 Quadro B.2.72: UC 254x254x107- Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	318	550.780	365.798	51.530	1.732	1.150	0.162
60	894	936.130	697.671	215.720	1.047	0.780	0.241
120	1042	1045.500	817.389	283.910	1.003	0.784	0.272
MÉDIA					1.261	0.905	0.225

B.2.19. UC 356x406x551

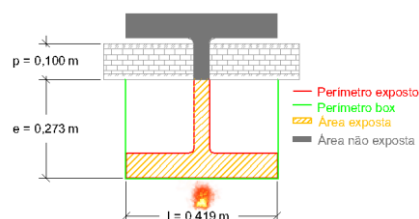


Figura B.2.19: UC 254x254x107

Quadro B.2.73: UC 356x406x551- Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	303	273.360	231.287	29.870	0.902	0.763	0.099
60	855	828.910	669.973	144.510	0.969	0.784	0.169
120	1041	1037.620	860.990	266.600	0.997	0.827	0.256
MÉDIA					0.956	0.791	0.175

Quadro B.2.74: UC 356x406x551- Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	186	273.360	231.287	29.870	1.470	1.243	0.161
60	854	828.910	669.973	144.510	0.971	0.785	0.169
120	1033	1037.620	860.990	266.600	1.004	0.833	0.258
MÉDIA					1.148	0.954	0.196

Quadro B.2.75: UC 356x406x551- Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	238	273.360	231.287	29.870	1.149	0.972	0.126
60	873	828.910	669.973	144.510	0.949	0.767	0.166
120	1038	1037.620	860.990	266.600	1.000	0.829	0.257
MÉDIA					1.033	0.856	0.183

Quadro B.2.76: UC 356x406x551- Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	145	273.360	231.287	29.870	1.885	1.595	0.206
60	724	828.910	669.973	144.510	1.145	0.925	0.200
120	1012	1037.620	860.990	266.600	1.025	0.851	0.263
MÉDIA					1.352	1.124	0.223

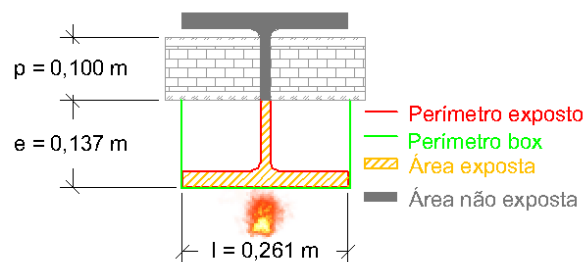
B.2.20. W 250x250x131


Figura B.2.20: W 250x250x131

 Quadro B.2.77: W 250x250x131- Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	544	506.480	345.031	44.020	0.931	0.634	0.081
60	937	933.930	704.687	207.550	0.997	0.752	0.222
120	1046	1044.770	827.355	289.340	0.999	0.791	0.277
MÉDIA					0.976	0.726	0.193

 Quadro B.2.78: W 250x250x131- Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	362	506.480	345.031	44.020	1.399	0.953	0.122
60	912	933.930	704.687	207.550	1.024	0.773	0.228
120	1043	1044.770	827.355	289.340	1.002	0.793	0.277
MÉDIA					1.142	0.840	0.209

 Quadro B.2.79: W 250x250x131- Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	448	506.480	345.031	44.020	1.131	0.770	0.098
60	928	933.930	704.687	207.550	1.006	0.759	0.224
120	1045	1044.770	827.355	289.340	1.000	0.792	0.277
MÉDIA					1.046	0.774	0.200

 Quadro B.2.80: W 250x250x131- Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	278	506.480	345.031	44.020	1.822	1.241	0.158
60	919	933.930	704.687	207.550	1.016	0.767	0.226
120	1040	1044.770	827.355	289.340	1.005	0.796	0.278
MÉDIA					1.281	0.934	0.221

B.2.21. W 460x280x235

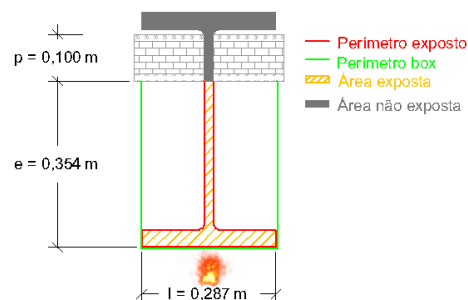


Figura B.2.21: W 460x280x235

Quadro B.2.81: W 460x280x235- Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	486	738.561	414.477	40.500	1.520	0.853	0.083
60	933	945.340	810.327	197.530	1.013	0.869	0.212
120	1046	1049.040	934.885	298.240	1.003	0.894	0.285
MÉDIA					1.179	0.872	0.193

Quadro B.2.82: W 460x280x235- Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	339	738.561	414.477	40.500	2.179	1.223	0.119
60	905	945.340	810.327	197.530	1.045	0.895	0.218
120	1043	1049.040	934.885	298.240	1.006	0.896	0.286
MÉDIA					1.410	1.005	0.208

Quadro B.2.83: W 460x280x235- Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	424	738.561	414.477	40.500	1.742	0.978	0.096
60	925	945.340	810.327	197.530	1.022	0.876	0.214
120	1045	1049.040	934.885	298.240	1.004	0.895	0.285
MÉDIA					1.256	0.916	0.198

Quadro B.2.84: W 460x280x235- Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	287	738.561	414.477	40.500	2.573	1.444	0.141
60	868	945.340	810.327	197.530	1.089	0.934	0.228
120	1041	1049.040	934.885	298.240	1.008	0.898	0.286
MÉDIA					1.557	1.092	0.218

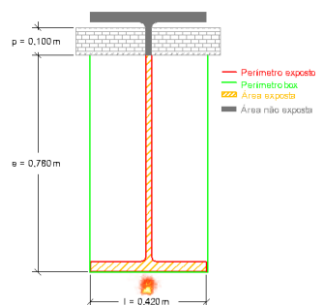
B.2.22. W 920x420x390


Figura B.2.22: W920x420x390

 Quadro B.2.85: W 920x420x390- Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	493	408.720	470.698	33.830	0.829	0.955	0.069
60	933	924.900	872.138	152.680	0.991	0.935	0.164
120	1046	1043.310	988.939	244.440	0.997	0.945	0.234
MÉDIA					0.939	0.945	0.155

 Quadro B.2.86: W 920x420x390- Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	372	408.720	470.698	33.830	1.099	1.265	0.091
60	915	924.900	872.138	152.680	1.011	0.953	0.167
120	1043	1043.310	988.939	244.440	1.000	0.948	0.234
MÉDIA					1.037	1.056	0.164

 Quadro B.2.87: W 920x420x390- Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	446	408.720	470.698	33.830	0.916	1.055	0.076
60	928	924.900	872.138	152.680	0.997	0.940	0.165
120	1045	1043.310	988.939	244.440	0.998	0.946	0.234
MÉDIA					0.970	0.981	0.158

 Quadro B.2.88: W 920x420x390- Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	328	408.720	470.698	33.830	1.246	1.435	0.103
60	901	924.900	872.138	152.680	1.027	0.968	0.169
120	1042	1043.310	988.939	244.440	1.001	0.949	0.235
MÉDIA					1.091	1.117	0.169

B.3. Pilares inseridos em parede de 15 cm - Gráficos

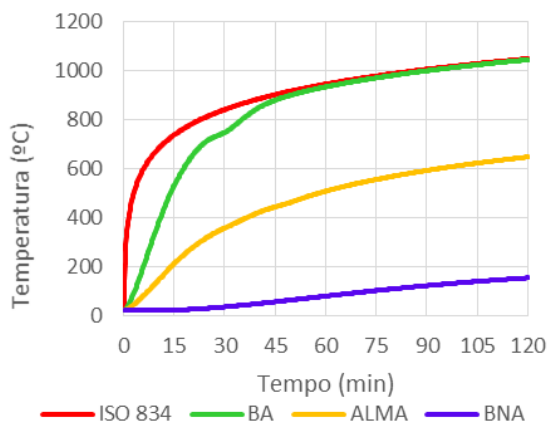


Figura B.3.1: Gráfico HD 320x127

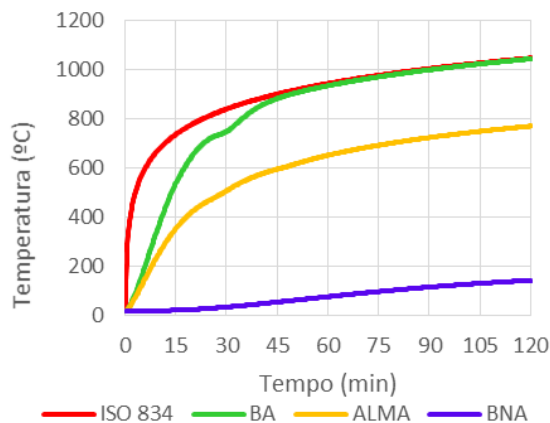


Figura B.3.4: Gráfico HE 450 A

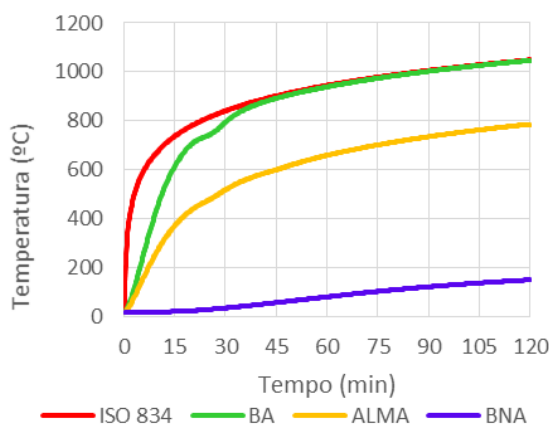


Figura B.3.2: Gráfico HE 450 AA

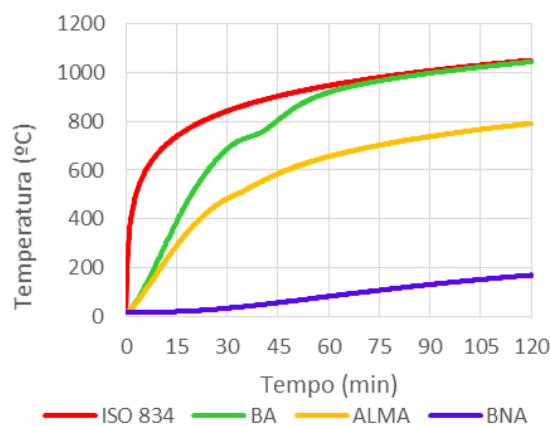


Figura B.3.5: Gráfico HE 450 M

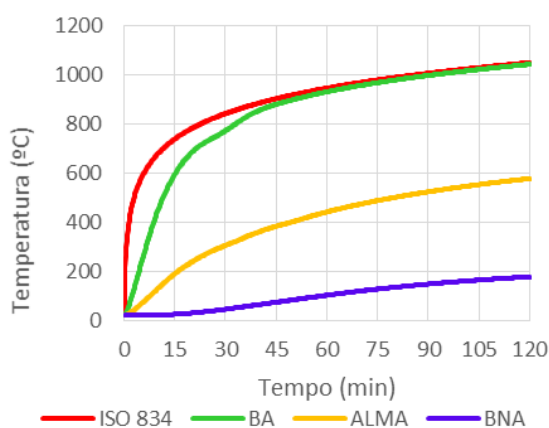


Figura B.3.3: Gráfico HP 250x62

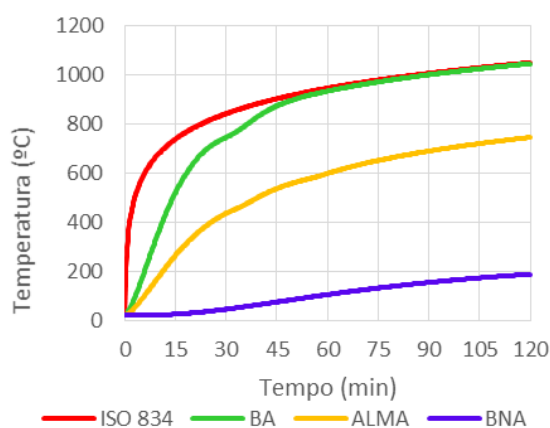


Figura B.3.6: Gráfico HP 260x152

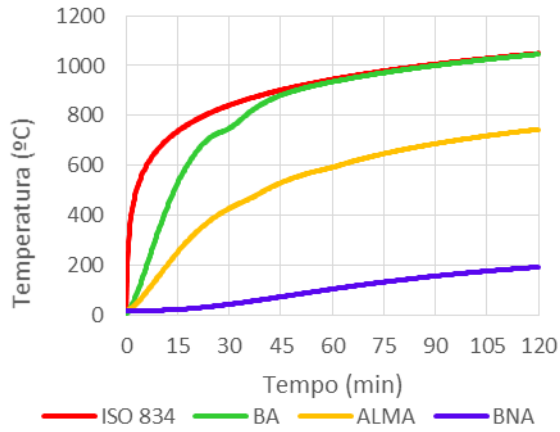


Figura B.3.7: Gráfico HP 360x174

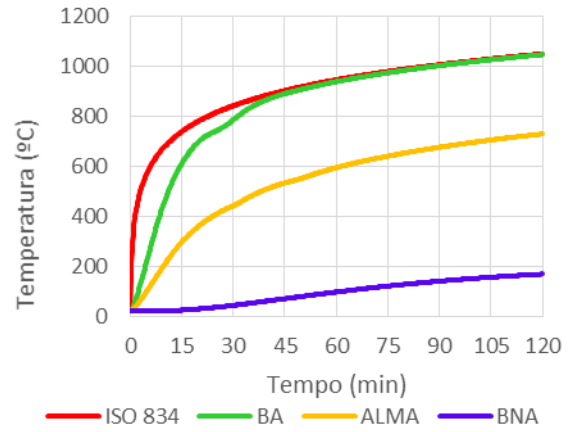


Figura B.3.10: Gráfico HP 305x79

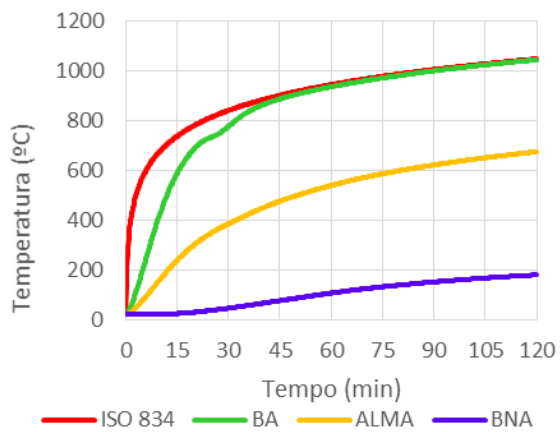


Figura B.3.8: Gráfico HP 305x110

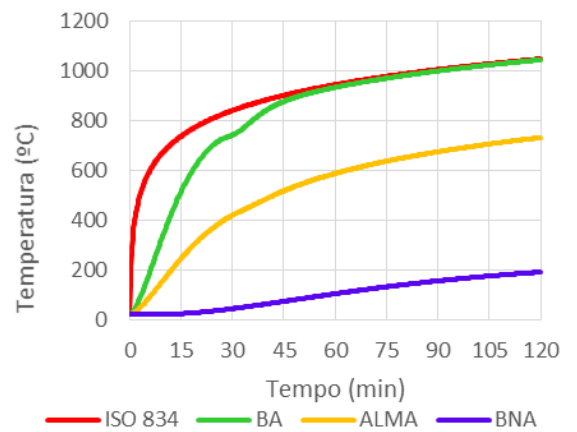


Figura B.3.11: Gráfico HP 400x194

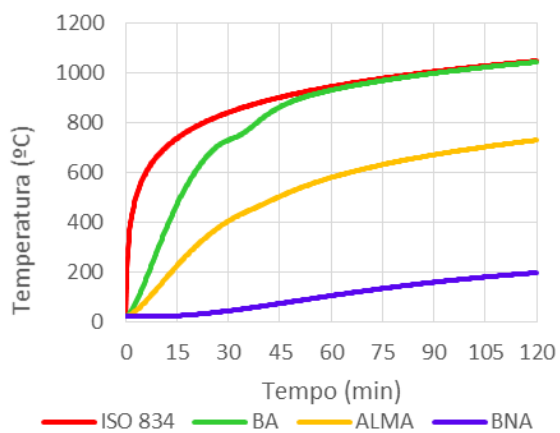


Figura B.3.9: Gráfico HP 400x231

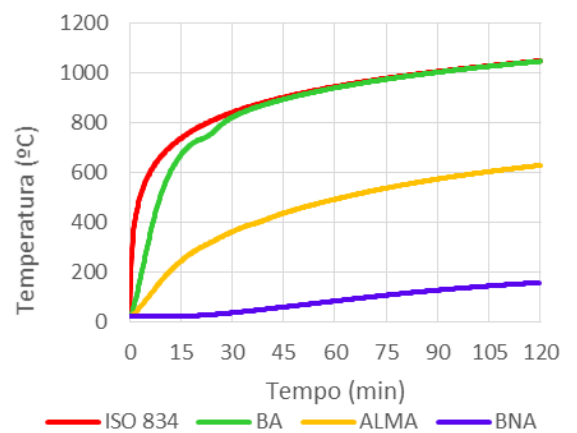


Figura B.3.12: Gráfico IPEA 270

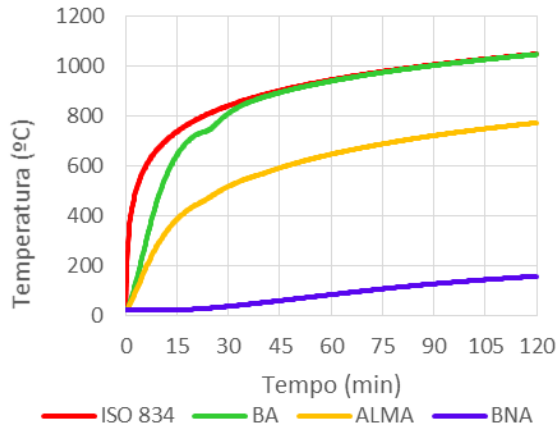


Figura B.3.13: Gráfico IPEA 400

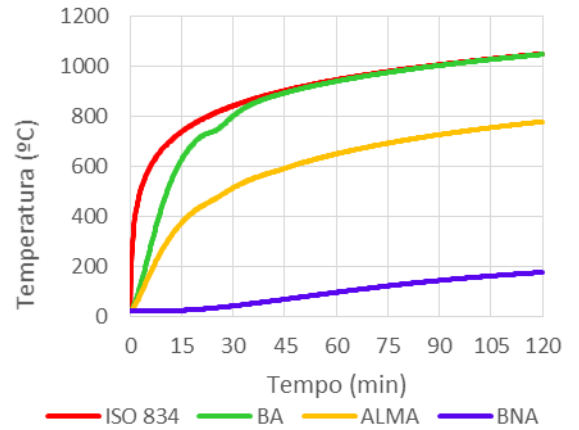


Figura B.3.16: Gráfico IPE 400

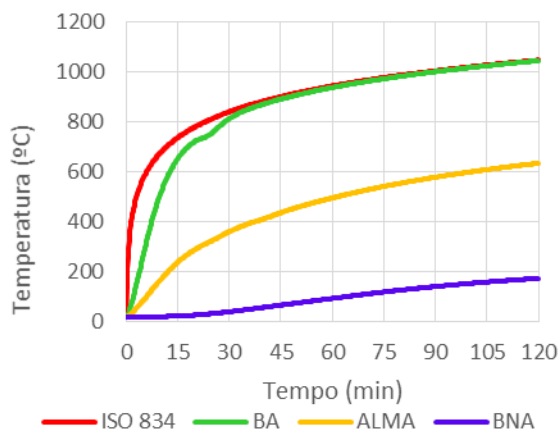


Figura B.3.14 Gráfico IPEO 270

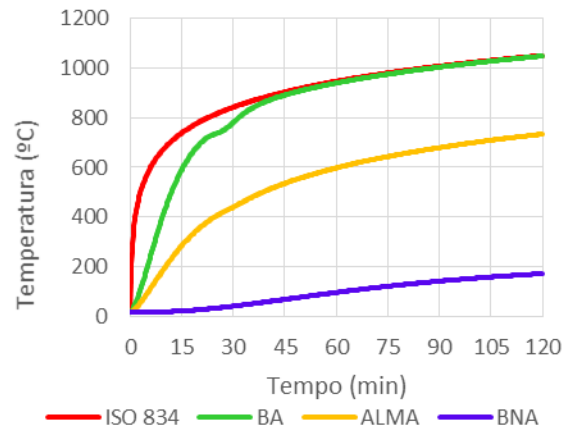


Figura B.3.17: Gráfico UBP 356x368x133

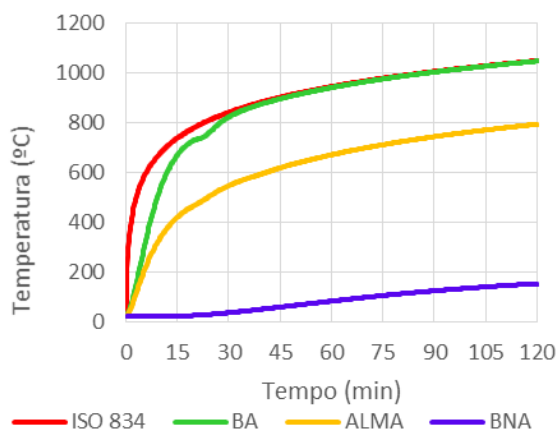


Figura B.3.15: Gráfico UB 406x178x54

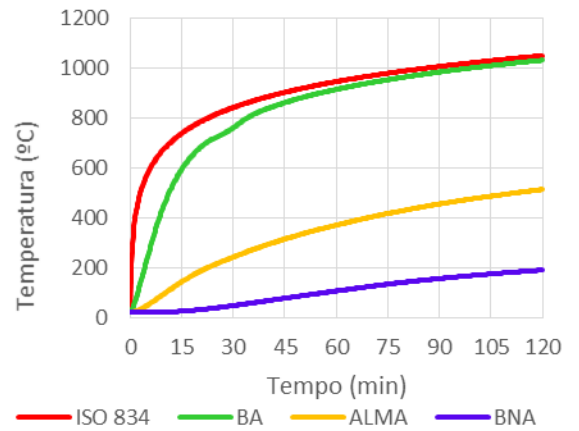


Figura B.3.18: Gráfico UB 254x102x28

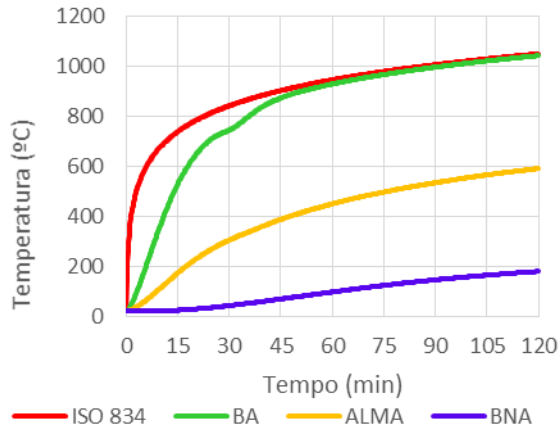


Figura B.3.19: Gráfico UC 254X254X107

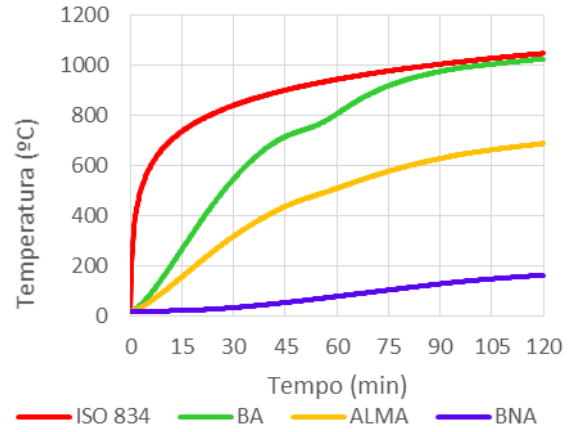


Figura B.3.22: Gráfico UC 356x406x551

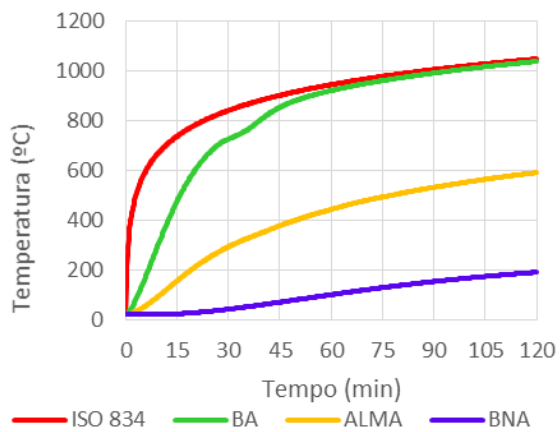


Figura B.3.20: Gráfico W 250x250x131

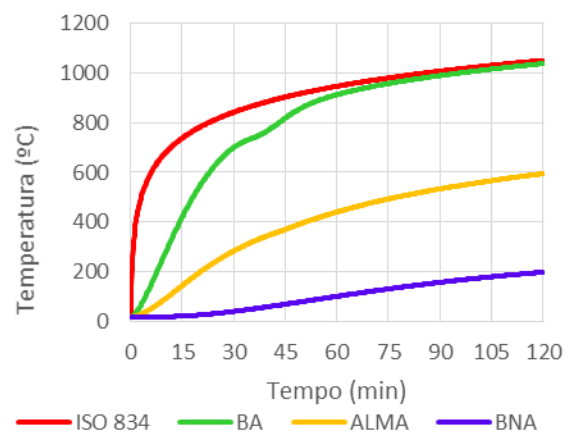


Figura B.3.23: Gráfico W 250x250x167

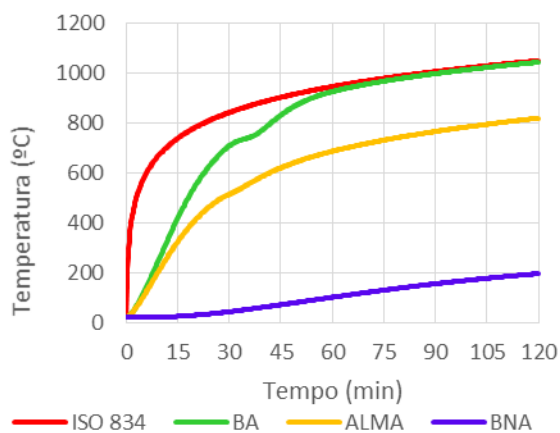


Figura B.3.21: Gráfico W 460x280x235

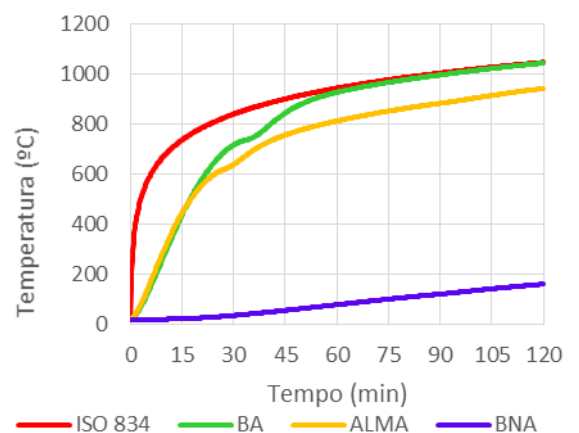


Figura B.3.24: Gráfico W 920x420x344

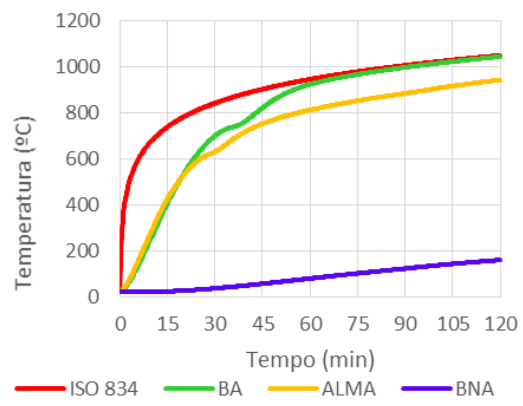
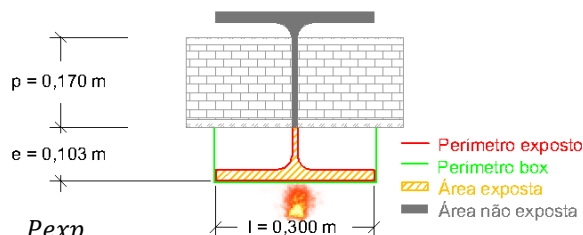


Figura B.3.25: Gráfico W 920x420x390

B.4. Pilares inseridos em parede de 15 cm - Quadros

B.4.1. HD 320 x127



Quadro B.4.1: HD 320 x127- Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Figura B.4.1: HD 320x127

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	575	532.549	213.176	22.018	0.926	0.371	0.038
60	939	934.181	508.378	79.075	0.995	0.541	0.084
120	1047	1044.738	647.678	153.452	0.998	0.619	0.147
MÉDIA					0.973	0.510	0.090

Quadro B.4.2: HD 320 x127- Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	372	532.549	213.176	22.018	1.432	0.573	0.059
60	915	934.181	508.378	79.075	1.021	0.556	0.086
120	1043	1044.738	647.678	153.452	1.002	0.621	0.147
MÉDIA					1.151	0.583	0.098

Quadro B.4.3: HD 320 x127- Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	467	532.549	213.176	22.018	1.140	0.456	0.047
60	931	934.181	508.378	79.075	1.003	0.546	0.085
120	1045	1044.738	647.678	153.452	1.000	0.620	0.147
MÉDIA					1.048	0.541	0.093

Quadro B.4.4: HD 320 x127- Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	274	532.549	213.176	22.018	1.944	0.778	0.080
60	621	934.181	508.378	79.075	1.504	0.819	0.127
120	1040	1044.738	647.678	153.452	1.005	0.623	0.148
MÉDIA					1.484	0.740	0.118

B.4.2. HE 450 AA

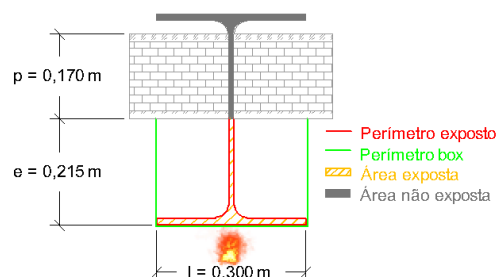


Figura B.4.2: HE 450 AA

Quadro B.4.5: HE 450 AA - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	651	617.714	374.195	21.697	0.949	0.575	0.033
60	941	939.290	659.670	81.676	0.998	0.701	0.087
120	1047	1046.692	786.409	150.959	1.000	0.751	0.144
MÉDIA					0.982	0.676	0.088

Quadro B.4.6: HE 450 AA - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	504	617.714	374.195	21.697	1.226	0.742	0.043
60	934	939.290	659.670	81.676	1.006	0.706	0.087
120	1046	1046.692	786.409	150.959	1.001	0.752	0.144
MÉDIA					1.077	0.734	0.092

Quadro B.4.7: HE 450 AA - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	594	617.714	374.195	21.697	1.040	0.630	0.037
60	939	939.290	659.670	81.676	1.000	0.703	0.087
120	1047	1046.692	786.409	150.959	1.000	0.751	0.144
MÉDIA					1.013	0.695	0.089

Quadro B.4.8: HE 450 AA - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	420	617.714	374.195	21.697	1.471	0.891	0.052
60	924	939.290	659.670	81.676	1.017	0.714	0.088
120	1044	1046.692	786.409	150.959	1.003	0.753	0.145
MÉDIA					1.163	0.786	0.095

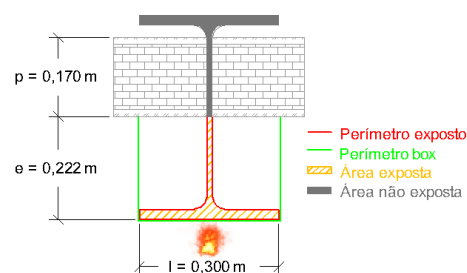
B.4.3. HE 450 A


Figura B.4.3: HE 450 A

 Quadro B.4.9: HE 450 A - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	594	539.823	355.694	21.442	0.909	0.599	0.036
60	939	936.276	653.117	76.722	0.997	0.696	0.082
120	1047	1045.613	771.377	143.138	0.999	0.737	0.137
MÉDIA					0.968	0.677	0.085

 Quadro B.4.10: HE 450 A - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{A_{tot.perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	417	539.823	355.694	21.442	1.295	0.853	0.051
60	924	936.276	653.117	76.722	1.013	0.707	0.083
120	1044	1045.613	771.377	143.138	1.002	0.739	0.137
MÉDIA					1.103	0.766	0.091

 Quadro B.4.11: HE 450 A - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	527	539.823	355.694	21.442	1.024	0.675	0.041
60	937	936.276	653.117	76.722	0.999	0.697	0.082
120	1046	1045.613	771.377	143.138	1.000	0.737	0.137
MÉDIA					1.008	0.703	0.086

 Quadro B.4.12: HE 450 A - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{A_{tot.perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	338	539.823	355.694	21.442	1.597	1.052	0.063
60	905	936.276	653.117	76.722	1.035	0.722	0.085
120	1043	1045.613	771.377	143.138	1.003	0.740	0.137
MÉDIA					1.211	0.838	0.095

B.4.4. HE 450 M

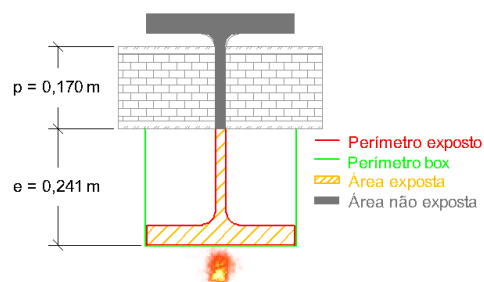


Figura B.4.4: HE 450 M

Quadro B.4.13: HE 450 M - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	443	390.082	292.977	22.277	0.881	0.661	0.050
60	928	917.922	655.801	84.333	0.989	0,707	0.091
120	1045	1042.310	790.924	171.182	0.997	0.757	0.164
MÉDIA					0.956	0.708	0.102

Quadro B.4.14: HE 450 M - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	275	390.082	292.977	22.277	1.418	1.065	0.081
60	862	917.922	655.801	84.333	1.065	0.761	0.098
120	1040	1042.310	790.924	171.182	1.002	0.761	0.165
MÉDIA					1.162	0.862	0.114

Quadro B.4.15: HE 450 M - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	368	390.082	292.977	22.277	1.060	0.796	0.061
60	914	917.922	655.801	84.333	1.004	0.718	0.092
120	1043	1042.310	790.924	171.182	0.999	0.758	0.164
MÉDIA					1.021	0.757	0.106

Quadro B.4.16: HE 450 M - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	221	390.082	292.977	22.277	1.765	1.326	0.101
60	902	917.922	655.801	84.333	1.018	0.727	0.093
120	1037	1042.310	790.924	171.182	1.005	0.763	0.165
MÉDIA					1.263	0.938	0.120

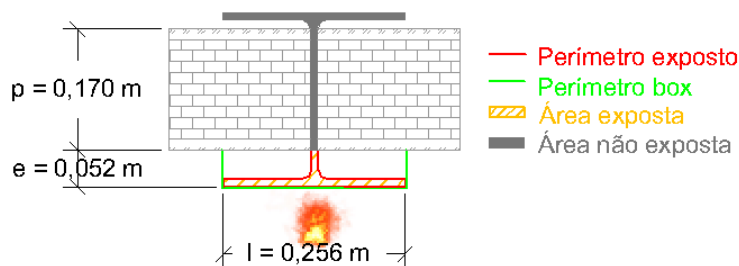
H.5. HP 250x62


Figura B.4.5: HP 250x62

 Quadro B.4.17: HP 250x62 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	671	594.605	189.420	23.658	0.886	0.282	0.035
60	942	930.415	441.152	101.341	0.988	0.468	0.108
120	1048	1042.276	576.603	176.370	0.995	0.550	0.168
MÉDIA					0.956	0.434	0.104

 Quadro B.4.18: HE 450 M - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	490	594.605	189.420	23.658	1.213	0.387	0.048
60	933	930.415	441.152	101.341	0.997	0.473	0.109
120	1046	1042.276	576.603	176.370	0.996	0.551	0.169
MÉDIA					1.069	0.470	0.109

 Quadro B.4.19: HE 450 M - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	585	594.605	189.420	23.658	1.016	0.324	0.040
60	939	930.415	441.152	101.341	0.991	0.470	0.108
120	1047	1042.276	576.603	176.370	0.995	0.551	0.168
MÉDIA					1.001	0.448	0.106

 Quadro B.4.20: HE 450 M - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	357	594.605	189.420	23.658	1.666	0.531	0.066
60	911	930.415	441.152	101.341	1.021	0.484	0.111
120	1043	1042.276	576.603	176.370	0.999	0.553	0.169
MÉDIA					1.229	0.523	0.116

B.4.6. HP 360x152

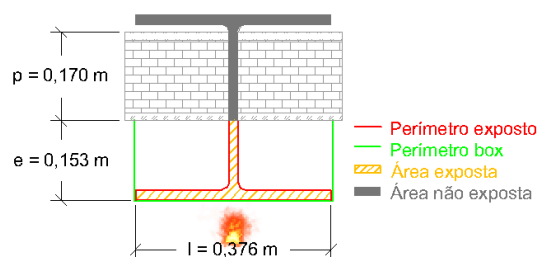


Figura B.4.6: HP 360x152

Quadro B.4.21:HP 360x152 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	589	521.352	265.018	24.117	0.885	0.450	0.041
60	939	933.330	598.031	104.074	0.994	0.637	0.111
120	1047	1044.726	744.715	186.971	0.998	0.711	0.179
MÉDIA					0.959	0.599	0.110

Quadro B.4.22:HP 360x152 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	398	521.352	265.018	24.117	1.310	0.666	0.061
60	921	933.330	598.031	104.074	1.013	0.649	0.113
120	1044	1044.726	744.715	186.971	1.001	0.713	0.179
MÉDIA					1.108	0.676	0.118

Quadro B.4.23:HP 360x152 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	487	521.352	265.018	24.117	1.071	0.544	0.050
60	933	933.330	598.031	104.074	1.000	0.641	0.112
120	1046	1044.726	744.715	186.971	0.999	0.712	0.179
MÉDIA					1.023	0.632	0.113

Quadro B.4.24:HP 360x152 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	298	521.352	265.018	24.117	1.750	0.889	0.081
60	920	933.330	598.031	104.074	1.014	0.650	0.113
120	1041	1044.726	744.715	186.971	1.004	0.715	0.180
MÉDIA					1.256	0.752	0.125

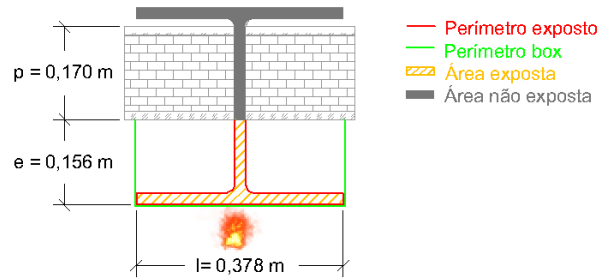
B.4.7. HP 360x174


Figura B.4.7: HP 360x174

 Quadro B.4.25:HP 360x174 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	559	532.306	255.237	24.131	0.952	0.457	0.043
60	938	935.338	593.367	106.213	0.997	0.633	0.113
120	1046	1045.355	744.935	193.653	0.999	0.712	0.185
MÉDIA					0.983	0.600	0.114

 Quadro B.4.26:HP 360x174 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	365	532.306	255.237	24.131	1.458	0.699	0.066
60	913	935.338	593.367	106.213	1.024	0.650	0.116
120	1043	1045.355	744.935	193.653	1.002	0.714	0.186
MÉDIA					1.162	0.688	0.123

 Quadro B.4.27:HP 360x174 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	453	532.306	255.237	24.131	1.175	0.563	0.053
60	929	935.338	593.367	106.213	1.007	0.639	0.114
120	1045	1045.355	744.935	193.653	1.000	0.713	0.185
MÉDIA					1.061	0.638	0.118

 Quadro B.4.28:HP 360x174 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	272	532.306	255.237	24.131	1.957	0.938	0.089
60	897	935.338	593.367	106.213	1.043	0.662	0.118
120	1040	1045.355	744.935	193.653	1.005	0.716	0.186
MÉDIA					1.335	0.772	0.131

B.4.8. HP 305x110

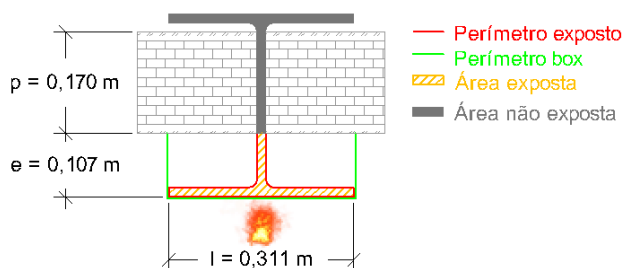


Figura B.4.8: HP 305x110

Quadro B.4.29:HP 305x110 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	620	589.395	239.234	24.398	0.951	0.386	0.039
60	940	936.910	539.995	107.056	0.997	0.574	0.114
120	1047	1045.200	675.483	179.964	0.998	0.645	0.172
MÉDIA					0.982	0.535	0.108

Quadro B.4.30:HP 305x110 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	421	589.395	239.234	24.398	1.400	0.568	0.058
60	925	936.910	539.995	107.056	1.013	0.584	0.116
120	1044	1045.200	675.483	179.964	1.001	0.647	0.172
MÉDIA					1.138	0.600	0.115

Quadro B.4.31:HP 305x110 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	522	589.395	239.234	24.398	1.129	0.458	0.047
60	937	936.910	539.995	107.056	1.000	0.576	0.114
120	1046	1045.200	675.483	179.964	0.999	0.646	0.172
MÉDIA					1.043	0.560	0.111

Quadro B.4.32:HP 305x110 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	313	589.395	239.234	24.398	1.883	0.764	0.078
60	887	936.910	539.995	107.056	1.056	0.609	0.121
120	1042	1045.200	675.483	179.964	1.003	0.648	0.173
MÉDIA					1.314	0.674	0.124

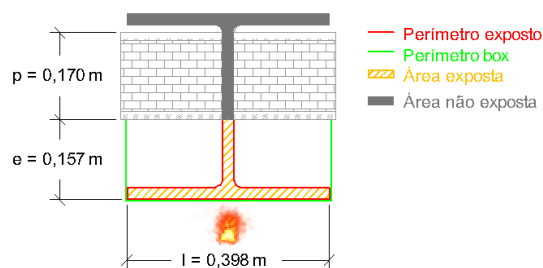
B.4.9. HP 400x194


Figura B.4.9: HP 400x194

 Quadro B.4.33:HP 400x194 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	537	516.430	247.156	24.000	0.962	0.460	0.045
60	937	934.562	588.400	104.355	0.997	0.628	0.111
120	1046	1045.128	732.130	191.365	0.999	0.700	0.183
MÉDIA					0.986	0.596	0.113

 Quadro B.4.34:HP 400x194 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	344	516.430	247.156	24.000	1.501	0.718	0.070
60	907	934.562	588.400	104.355	1.030	0.649	0.115
120	1043	1045.128	732.130	191.365	1.002	0.702	0.183
MÉDIA					1.178	0.690	0.123

 Quadro B.4.35:HP 400x194 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	431	516.430	247.156	24.000	1.198	0.573	0.056
60	926	934.562	588.400	104.355	1.009	0.635	0.113
120	1045	1045.128	732.130	191.365	1.000	0.701	0.183
MÉDIA					1.069	0.636	0.117

 Quadro B.4.36:HP 400x194 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	256	516.430	247.156	24.000	1.198	0.573	0.056
60	864	934.562	588.400	104.355	1.009	0.635	0.113
120	1039	1045.128	732.130	191.365	1.000	0.701	0.183
MÉDIA					1.069	0.636	0.117

B.4.10. HP 400x231

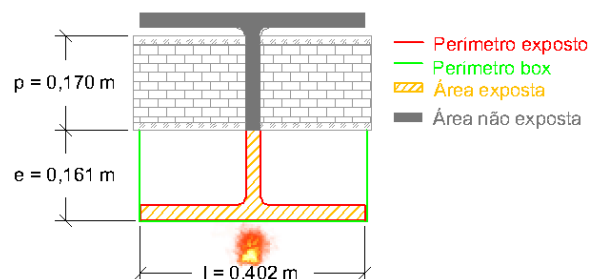


Figura B.4.10: HP 400x231

Quadro B.4.37:HP 400x231 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	500	474.724	226.605	23.798	0.949	0.453	0.048
60	934	931.331	580.055	104.446	0.997	0.621	0.112
120	1046	1044.274	729.947	196.760	0.998	0.698	0.188
MÉDIA					0.982	0.591	0.116

Quadro B.4.38:HP 400x231 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	310	474.724	226.605	23.798	1.531	0.731	0.077
60	873	931.331	580.055	104.446	1.067	0.664	0.120
120	1042	1044.274	729.947	196.760	1.002	0.701	0.189
MÉDIA					1.200	0.699	0.128

Quadro B.4.39:HP 400x231 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	391	474.724	226.605	23.798	1.214	0.580	0.061
60	919	931.331	580.055	104.446	1.013	0.631	0.114
120	1044	1044.274	729.947	196.760	1.000	0.699	0.188
MÉDIA					1.076	0.637	0.121

Quadro B.4.40:HP 400x231 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	228	474.724	226.605	23.798	2.082	0.994	0.104
60	881	931.331	580.055	104.446	1.057	0.658	0.119
120	1037	1044.274	729.947	196.760	1.007	0.704	0.190
MÉDIA					1.382	0.785	0.138

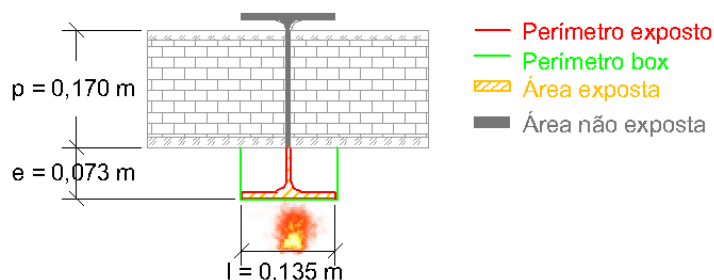
B.4.11. IPEA 270


Figura B.4.11: IPEA 270

 Quadro B.4.41: IPEA 270 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	697	671.931	244.578	21.391	0.964	0.351	0.031
60	943	940.230	492.578	82.983	0.997	0.522	0.088
120	1048	1046.933	628.838	157.408	0.999	0.600	0.150
MÉDIA					0.987	0.491	0.090

 Quadro B.4.42: IPEA 270 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	569	671.931	244.578	21.391	1.181	0.430	0.038
60	938	940.230	492.578	82.983	1.002	0.525	0.088
120	1047	1046.933	628.838	157.408	1.000	0.601	0.150
MÉDIA					1.061	0.519	0.092

 Quadro B.4.43: IPEA 270 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	663	671.931	244.578	21.391	1.013	0.369	0.032
60	941	940.230	492.578	82.983	0.999	0.523	0.088
120	1048	1046.933	628.838	157.408	0.999	0.600	0.150
MÉDIA					1.004	0.497	0.090

 Quadro B.4.44: IPEA 270 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	480	671.931	244.578	21.391	1.400	0.510	0.045
60	932	940.230	492.578	82.983	1.009	0.529	0.089
120	1045	1046.933	628.838	157.408	1.002	0.602	0.151
MÉDIA					1.137	0.547	0.095

B.4.12. IPEA 400

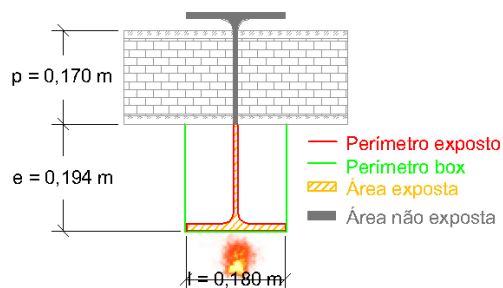


Figura B.4.12: IPEA 400

Quadro B.4.45: IPEA 400 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	681	645.285	386.826	21.805	0.948	0.568	0.032
60	942	940.180	646.683	83.298	0.998	0.687	0.088
120	1048	1047.016	772.686	156.881	0.999	0.737	0.150
MÉDIA					0.982	0.664	0.090

Quadro B.4.46: IPEA 400 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	562	645.285	386.826	21.805	1.148	0.688	0.039
60	938	940.180	646.683	83.298	1.002	0.689	0.089
120	1046	1047.016	772.686	156.881	1.001	0.739	0.150
MÉDIA					1.050	0.705	0.093

Quadro B.4.47: IPEA 400 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	651	645.285	386.826	21.805	0.991	0.594	0.033
60	941	940.180	646.683	83.298	0.999	0.687	0.089
120	1047	1047.016	772.686	156.881	1.000	0.738	0.150
MÉDIA					0.997	0.673	0.091

Quadro B.4.48: IPEA 400 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	501	645.285	386.826	21.805	1.288	0.772	0.044
60	934	940.180	646.683	83.298	1.007	0.692	0.089
120	1046	1047.016	772.686	156.881	1.001	0.739	0.150
MÉDIA					1.099	0.734	0.094

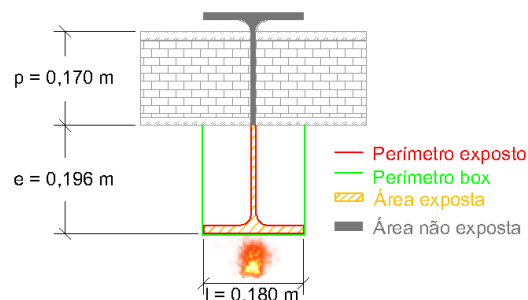
B.4.13. IPE 400


Figura B.4.13: IPE 400

 Quadro B.4.49: IPE 400 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{P_{exp}}{A_{exp}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	665	627.421	374.666	22.661	0.943	0.563	0.034
60	941	939.536	649.024	94.672	0.998	0.690	0.101
120	1048	1046.774	777.530	174.914	0.999	0.742	0.167
MÉDIA					0.980	0.665	0.101

 Quadro B.4.50: IPE 400 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{P_{exp}}{A_{tot.perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	527	627.421	374.666	22.661	1.191	0.711	0.043
60	937	939.536	649.024	94.672	1.003	0.693	0.101
120	1046	1046.774	777.530	174.914	1.001	0.743	0.167
MÉDIA					1.065	0.716	0.104

 Quadro B.4.51: IPE 400 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{P_{box}}{A_{exp}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	628	627.421	374.666	22.661	0.999	0.597	0.036
60	940	939.536	649.024	94.672	1.000	0.690	0.101
120	1047	1046.774	777.530	174.914	1.000	0.743	0.167
MÉDIA					0.999	0.677	0.101

 Quadro B.4.52: IPE 400 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{P_{box}}{A_{tot.perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	464	627.421	374.666	22.661	1.352	0.807	0.049
60	930	939.536	649.024	94.672	1.010	0.698	0.102
120	1045	1046.774	777.530	174.914	1.002	0.744	0.167
MÉDIA					1.121	0.750	0.106

B.4.14. IPEO 270

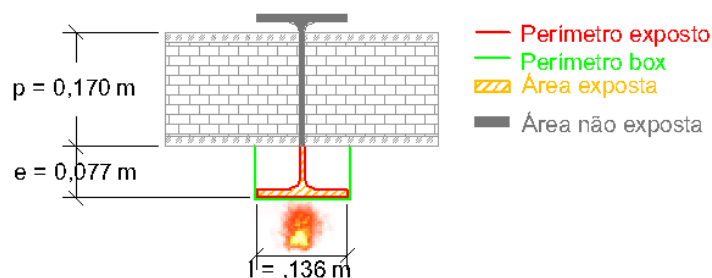


Figura B.4.14: IPEO 270

Quadro B.4.53: IPEO 270 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{P_{exp}}{A_{exp}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	671	654.334	238.890	22.191	0.975	0.356	0.033
60	941	939.109	496.671	93.222	0.998	0.528	0.099
120	1048	1046.461	635.362	173.584	0.999	0.606	0.166
MÉDIA					0.991	0.497	0.099

Quadro B.4.54: IPEO 270 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{P_{exp}}{A_{tot. perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	493	654.334	238.890	22.191	1.327	0.485	0.045
60	933	939.109	496.671	93.222	1.007	0.532	0.100
120	1046	1046.461	635.362	173.584	1.000	0.607	0.166
MÉDIA					1.111	0.541	0.104

Quadro B.4.55: IPEO 270 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{P_{box}}{A_{exp}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	619	654.334	238.890	22.191	1.057	0.386	0.036
60	940	939.109	496.671	93.222	0.999	0.528	0.099
120	1047	1046.461	635.362	173.584	0.999	0.607	0.166
MÉDIA					1.019	0.507	0.100

Quadro B.4.56: IPEO 270 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{P_{box}}{A_{tot. perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	403	654.334	238.890	22.191	1.624	0.593	0.055
60	921	939.109	496.671	93.222	1.020	0.539	0.101
120	1044	1046.461	635.362	173.584	1.002	0.609	0.166
MÉDIA					1.215	0.580	0.108

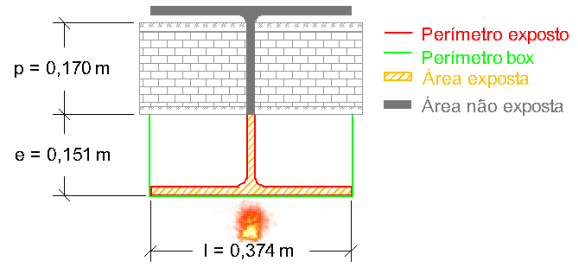
B.4.15. UBP 356x368x133


Figura B.4.15: UBP 356x406x551

 Quadro B.4.57: UBP 356x368x133 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	616	592.114	286.980	23.977	0.961	0.466	0.039
60	940	938.264	597.788	98.414	0.998	0.636	0.105
120	1047	1046.352	733.243	173.616	0.999	0.700	0.166
MÉDIA					0.986	0.601	0.103

 Quadro B.4.58: UBP 356x368x133 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	433	592.114	286.980	23.977	1.367	0.663	0.055
60	927	938.264	597.788	98.414	1.012	0.645	0.106
120	1045	1046.352	733.243	173.616	1.001	0.702	0.166
MÉDIA					1.127	0.670	0.109

 Quadro B.4.59: UBP 356x368x133 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	521	592.114	286.980	23.977	1.136	0.551	0.046
60	937	938.264	597.788	98.414	1.001	0.638	0.105
120	1046	1046.352	733.243	173.616	1.000	0.701	0.166
MÉDIA					1.046	0.630	0.106

 Quadro B.4.60: UBP 356x368x133 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	327	592.114	286.980	23.977	1.811	0.878	0.073
60	900	938.264	597.788	98.414	1.043	0.664	0.109
120	1042	1046.352	733.243	173.616	1.004	0.704	0.167
MÉDIA					1.286	0.749	0.116

B.4.16. UB 406x178x54

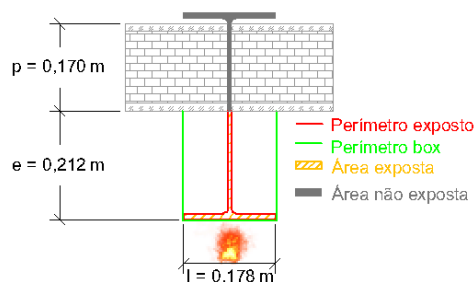


Figura B.4.16: UB 406x178x54

Quadro B.4.61:UB 406x178x54 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	660	670.720	420.714	21.640	1.016	0.637	0.033
60	941	941.180	671.021	82.220	1.000	0.713	0.087
120	1048	1047.400	793.515	152.680	0.999	0.757	0.146
MÉDIA					1.005	0.703	0.089

Quadro B.4.62:UB 406x178x54 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	521	670.720	420.714	21.640	1.287	0.808	0.042
60	937	941.180	671.021	82.220	1.004	0.716	0.088
120	1046	1047.400	793.515	152.680	1.001	0.759	0.146
MÉDIA					1.098	0.761	0.092

Quadro B.4.63:UB 406x178x54 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	666	670.720	420.714	21.640	1.007	0.632	0.032
60	941	941.180	671.021	82.220	1.000	0.713	0.087
120	1048	1047.400	793.515	152.680	0.999	0.757	0.146
MÉDIA					1.002	0.701	0.089

Quadro B.4.64:UB 406x178x54 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	533	670.720	420.714	21.640	1.258	0.789	0.041
60	937	941.180	671.021	82.220	1.004	0.716	0.088
120	1046	1047.400	793.515	152.680	1.001	0.759	0.146
MÉDIA					1.088	0.755	0.091

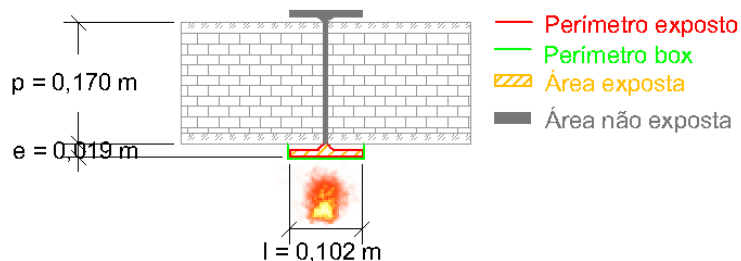
B.4.17. UB 254x102x28


Figura B.4.17: UB 254x102x28

 Quadro B.4.65:UB 254x102x28 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	677	594.58	143.04	24.31	0.878	0.211	0.036
60	942	914.01	369.99	105.53	0.970	0.393	0.112
120	1048	1031.16	512.78	189.33	0.984	0.489	0.181
MÉDIA					0.944	0.364	0.110

 Quadro B.4.66:UB 254x102x28 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	445	594.58	143.04	24.31	1.336	0.321	0.055
60	928	914.01	369.99	105.53	0.985	0.399	0.114
120	1045	1031.16	512.78	189.33	0.987	0.491	0.181
MÉDIA					1.103	0.404	0.117

 Quadro B.4.67:UB 254x102x28 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	599	594.58	143.04	24.31	0.993	0.239	0.041
60	939	914.01	369.99	105.53	0.973	0.394	0.112
120	1047	1031.16	512.78	189.33	0.985	0.490	0.181
MÉDIA					0.984	0.374	0.111

 Quadro B.4.68:UB 254x102x28 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	320	594.58	143.04	24.31	1.858	0.447	0.076
60	896	914.01	369.99	105.53	1.020	0.413	0.118
120	1042	1031.16	512.78	189.33	0.990	0.492	0.182
MÉDIA					1.289	0.451	0.125

B.4.18. UC 254x254x107

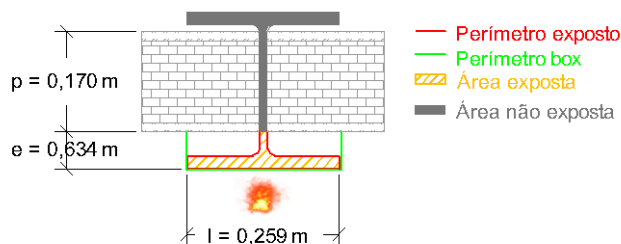


Figura B.4.18: UC 254x254x107

Quadro B.4.69: UC 254x254x107 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	559	529.181	172.965	23.332	0.947	0.309	0.042
60	938	928.643	449.204	96.319	0.990	0.479	0.103
120	1046	1041.762	590.247	178.443	0.996	0.564	0.171
MÉDIA					0.978	0.451	0.105

Quadro B.4.70: UC 254x254x107 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	344	529.181	172.965	23.332	1.538	0.503	0.068
60	907	928.643	449.204	96.319	1.024	0.495	0.106
120	1043	1041.762	590.247	178.443	0.999	0.566	0.171
MÉDIA					1.187	0.521	0.115

Quadro B.4.71: UC 254x254x107 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	452	529.181	172.965	23.332	1.171	0.383	0.052
60	929	928.643	449.204	96.319	1.000	0.484	0.104
120	1045	1041.762	590.247	178.443	0.997	0.565	0.171
MÉDIA					1.056	0.477	0.109

Quadro B.4.72: UC 254x254x107 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	253	529.181	172.965	23.332	2.092	0.684	0.092
60	911	928.643	449.204	96.319	1.019	0.493	0.106
120	1039	1041.762	590.247	178.443	1.003	0.568	0.172
MÉDIA					1.371	0.582	0.123

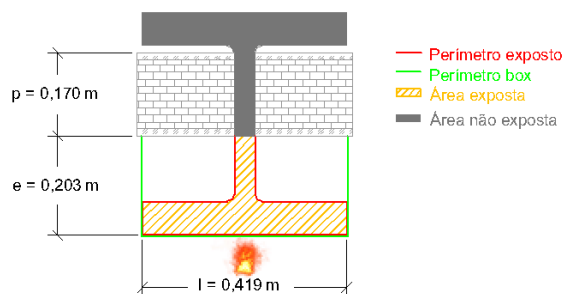
B.4.19. UC 356x406x551


Figura B.4.19: UC 356x406x551

 Quadro B.4.73: UC 356x406x551 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	274	268.630	157.850	22.024	0.980	0.576	0.080
60	990	808.746	510.761	78.771	0.817	0.516	0.080
120	1040	1026.812	689.277	16.603	0.987	0.663	0.157
MÉDIA					0.928	0.585	0.106

 Quadro B.4.74: UC 356x406x551 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	157	268.630	157.850	22.024	1.711	1.005	0.140
60	757	808.746	510.761	78.771	1.068	0.675	0.104
120	1022	1026.812	689.277	16.603	1.005	0.674	0.160
MÉDIA					1.261	0.785	0.135

 Quadro B.4.75: UC 356x406x551 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	225	268.630	157.850	22.024	1.194	0.702	0.098
60	843	808.746	510.761	78.771	0.959	0.606	0.093
120	1037	1026.812	689.277	16.603	0.990	0.665	0.158
MÉDIA					1.048	0.657	0.116

 Quadro B.4.76: UC 356x406x551 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	128	268.630	157.850	22.024	2.099	1.233	0.172
60	683	808.746	510.761	78.771	1.184	0.748	0.115
120	1046	1026.812	689.277	16.603	0.982	0.659	0.156
MÉDIA					1.421	0.880	0.148

B.4.20. W 250x250x131

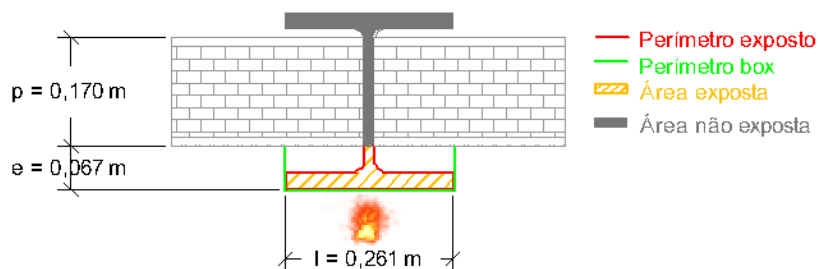


Figura B.4.20: W 250x250x131

Quadro B.4.77: W 250x250x131 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	538	478.013	157.051	23.397	0.889	0.292	0.043
60	937	921.732	443.869	100.624	0.984	0.474	0.107
120	1046	1038.881	591.216	190.682	0.993	0.565	0.182
MÉDIA					0.955	0.444	0.111

Quadro B.4.78: W 250x250x131 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	321	478.013	157.051	23.397	1.489	0.489	0.073
60	896	921.732	443.869	100.624	1.029	0.495	0.112
120	1042	1038.881	591.216	190.682	0.997	0.567	0.183
MÉDIA					1.172	0.517	0.123

Quadro B.4.79: W 250x250x131 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	405	478.013	157.051	23.397	1.180	0.388	0.058
60	922	921.732	443.869	100.624	1.000	0.481	0.109
120	1044	1038.881	591.216	190.682	0.995	0.566	0.183
MÉDIA					1.058	0.478	0.117

Quadro B.4.80: W 250x250x131 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	221	478.013	157.051	23.397	2.163	0.711	0.106
60	802	921.732	443.869	100.624	1.149	0.553	0.125
120	1036	1038.881	591.216	190.682	1.003	0.571	0.184
MÉDIA					1.438	0.612	0.138

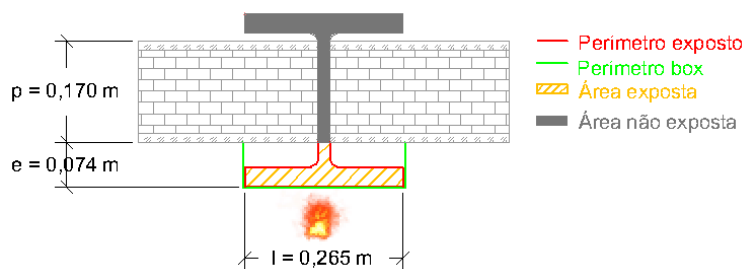
B.4.21. W 250x250x167


Figura B.4.21: W 250x250x167

 Quadro B.4.81: W 250x250x167 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	460	423.166	146.864	23.433	0.920	0.319	0.051
60	930	912.075	441.567	102.835	0.981	0.475	0.111
120	1045	1036.080	594.576	199.660	0.991	0.569	0.191
MÉDIA					0.964	0.454	0.118

 Quadro B.4.82: W 250x250x167 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	258	423.166	146.864	23.433	1.640	0.569	0.091
60	905	912.075	441.567	102.835	1.008	0.488	0.114
120	1039	1036.080	594.576	199.660	0.997	0.572	0.192
MÉDIA					1.215	0.543	0.132

 Quadro B.4.83: W 250x250x167 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	354	423.166	146.864	23.433	1.195	0.415	0.066
60	910	912.075	441.567	102.835	1.002	0.485	0.113
120	1043	1036.080	594.576	199.660	0.993	0.570	0.191
MÉDIA					1.064	0.490	0.124

 Quadro B.4.84: W 250x250x167 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	189	423.166	146.864	23.433	2.239	0.777	0.124
60	815	912.075	441.567	102.835	1.119	0.542	0.126
120	1033	1036.080	594.576	199.660	1.003	0.576	0.193
MÉDIA					1.454	0.631	0.148

B.4.22. W 460x280x235

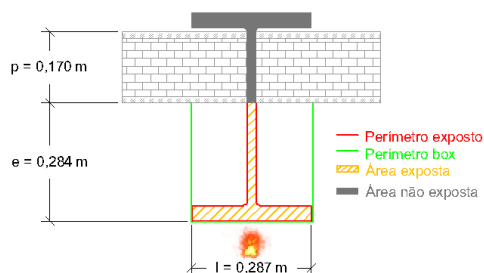


Figura B.4.22: W 460x280x235

Quadro B.4.85: W 460x280x235 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{P_{exp}}{A_{exp}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	412	419.509	324.300	23.656	1.018	0.787	0.057
60	923	925.447	686.008	100.464	1.003	0.743	0.109
120	1044	1043.157	818.755	194.997	0.999	0.784	0.187
MÉDIA					1.007	0.772	0.118

Quadro B.4.86: W 460x280x235 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{P_{exp}}{A_{tot. perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	260	419.509	324.300	23.656	1.613	1.247	0.091
60	893	925.447	686.008	100.464	1.036	0.768	0.113
120	1040	1043.157	818.755	194.997	1.003	0.787	0.187
MÉDIA					1.218	0.934	0.130

Quadro B.4.87: W 460x280x235 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{P_{box}}{A_{exp}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	406	419.509	324.300	23.656	1.033	0.799	0.058
60	922	925.447	686.008	100.464	1.004	0.744	0.109
120	1044	1043.157	818.755	194.997	0.999	0.784	0.187
MÉDIA					1.012	0.776	0.118

Quadro B.4.88: W 460x280x235 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{P_{box}}{A_{tot. perfil}}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	256	419.509	324.300	23.656	1.639	1.267	0.092
60	882	925.447	686.008	100.464	1.049	0.778	0.114
120	1039	1043.157	818.755	194.997	1.004	0.788	0.188
MÉDIA					1.231	0.944	0.131

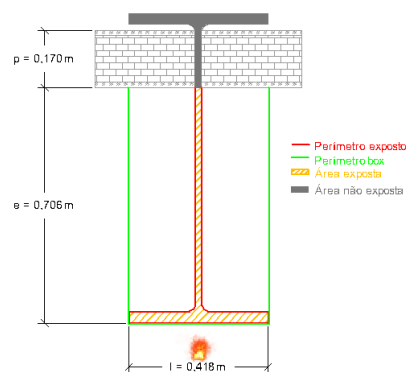
B.4.23. W 920x420x344

 Quadro B.4.89: W 920x420x344 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Figura B.4.23: W 920x420x344

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	425	439.335	447.096	22.403	1.034	1.052	0.053
60	925	928.821	814.379	78.855	1.004	0.880	0.085
120	1045	1045.789	943.939	161.054	1.001	0.903	0.154
MÉDIA					1,013	0,945	0,097

 Quadro B.4.90: W 920x420x344 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	301	439.335	447.096	22.403	1.460	1.485	0.074
60	770	928.821	814.379	78.855	1.206	1.058	0.102
120	1041	1045.789	943.939	161.054	1.005	0.907	0.155
MÉDIA					1.223	1.150	0.111

 Quadro B.4.91: W 920x420x344 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	468	439.335	447.096	22.403	0.939	0.955	0.048
60	931	928.821	814.379	78.855	0.998	0.875	0.085
120	1045	1045.789	943.939	161.054	1.001	0.903	0.154
MÉDIA					0.979	0.911	0.096

 Quadro B.4.92: W 920x420x344 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	339	439.335	447.096	22.403	1.296	1.319	0.066
60	905	928.821	814.379	78.855	1.026	0.900	0.087
120	1043	1045.789	943.939	161.054	1.003	0.905	0.154
MÉDIA					1.108	1.041	0.103

B.4.24. W 920x420x390

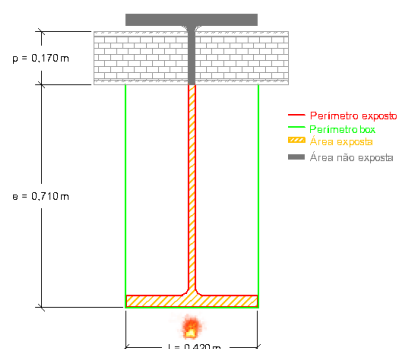
Quadro B.4.93: W 920x420x390 - Caso I $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Aexp}$

Figura B.4.24: W 920x420x390

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	396	406.793	426.641	22.326	1.027	1.077	0.056
60	920	923.138	811.872	78.284	1.003	0.882	0.085
120	1044	1043.727	942.173	158.745	1.000	0.902	0.152
MÉDIA					1,010	0,954	0,098

Quadro B.4.94: W 920x420x390 - Caso II $\frac{Am}{V} = \frac{Pexp}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	276	406.793	426.641	22.326	1.474	1.546	0.081
60	966	923.138	811.872	78.284	0.956	0.840	0.081
120	1040	1043.727	942.173	158.745	1.004	0.906	0.153
MÉDIA					1.144	1.097	0.105

Quadro B.4.95: W 920x420x390 - Caso III $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Aexp}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	439	406.793	426.641	22.326	0.927	0.972	0.051
60	927	923.138	811.872	78.284	0.996	0.876	0.084
120	1045	1043.727	942.173	158.745	0.999	0.902	0.152
MÉDIA					0.974	0.916	0.096

Quadro B.4.96: W 920x420x390 - Caso IV $\frac{Am}{V} = \frac{Pbox}{Atot.perfil}$

Tempo (min)	Eurocódigo	Abaqus			Abaqus/Eurocódigo		
		BA	ALMA	BNA	BA	ALMA	BNA
15	311	406.793	426.641	22.326	1.308	1.372	0.072
60	882	923.138	811.872	78.284	1.047	0.920	0.089
120	1042	1043.727	942.173	158.745	1.002	0.904	0.152
MÉDIA					1.119	1.066	0.104

