

Resistência ao fogo de elementos parcialmente embebidos com betão

David José Rodrigues Almeida

Relatório Final de Projeto apresentado à
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança

Para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia da Construção

Novembro de 2014

Resistência ao fogo de elementos parcialmente embebidos com betão

David José Rodrigues Almeida

Relatório Final de Projeto apresentado à
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança

Para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia da Construção

Orientador:

Paulo Alexandre Gonçalves Piloto

Novembro de 2014

AGRADECIMENTOS

Os meus agradecimentos são dirigidos sobretudo para os meus pais António dos Santos Almeida e Ilda da Conceição Rodrigues que me apoiaram desde o princípio. Agradeço também ao orientador da Tese, o Doutor Paulo Alexandre Gonçalves Piloto, professor coordenador do Departamento de Mecânica Aplicada, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão, do Instituto Politécnico de Bragança, pela sua coordenação, e disponibilidade.

Agradeço à Escola Superior de Tecnologia e Gestão do IPB pelo uso das instalações e equipamento, em particular ao prof. Doutor Rufino Amaro e aos técnicos Dr. José Luís e Dr.^a Cristina Barreto. Por último, agradecer o apoio de familiares, amigos, colegas e docentes dos cursos de Mestrado de Engenharia da Construção e da Licenciatura de Engenharia Civil.

RESUMO

Esta tese tem como objetivo ampliar o conhecimento sobre o comportamento de elementos parcialmente embebidas em betão a temperaturas elevadas. A resistência ao fogo de secções HEB e IPE parcialmente embebidas em betão depende da evolução da temperatura durante o processo de aquecimento. O Eurocódigo 4, parte 1.2 [1], propõe a análise da secção transversal utilizando o método das quatro componentes (banzos, alma, aço de reforço e betão) para obter a temperatura média e a redução de geometria após a resistência ao fogo padrão (R30, R60, R90, R120). O estudo pretende validar: o coeficiente empírico apresentado na tabela G.1 anexo G da EN 1994-1-2 [1]; a área residual de betão; a temperatura média no betão e o parâmetro de redução da altura da alma. Será utilizado um método de cálculo térmico avançado (não linear) para obter e validar uma nova proposta de cálculo. Pretende-se ainda determinar a resistência a encurvadura lateral de vigas parcialmente embebidas constituídas por perfis IPE100; IPE200 e IPE300. As vigas serão compostas por estribos soldados à alma ou soldados aos banzos, denominadas PEBA e PEBB respetivamente. Cada secção será avaliada com vãos entre apoios de 2.4, 3.9 e 5.4 metros. As vigas em estudo serão ainda simuladas a temperaturas de 20, 200, 400 e 600°C. A simulação será incremental e iterativa, utilizando o programa ANSYS.

Palavras - chave:

Vigas parcialmente embebidas em betão; Métodos de cálculo simplificado e avançado; Resistência ao fogo; Simulação numérica.

ABSTRACT

This thesis has the objective of increase the knowledge about the behaviour of partially encased beams exposed to elevated temperatures. Fire resistance of partially encased sections depends on the temperature evolution during this event. Eurocode 4, part 1.2 [1], proposes the analysis of this cross section using four components (flanges, web, reinforcement and concrete) to address each average temperature and geometry reduction after standard fire resistance (R30, R60, R90, R120). This work intends to validate: the empirical coefficient presented in table G.1 informative annex G of EN 1994-1-2; the residual area of concrete, the average concrete temperature and the parameter for the height reduction of the web. An advanced thermal calculation method (non-linear) was used to validate the new design proposal, verifying the effect of the reduced characteristics strength, reduced modulus of elasticity and reduced cross-section on partially encased section made of HEB and IPE profiles. This study intents to determine the buckling resistance of partially encased beams, made of steel profiles IPE100; IPE200 e IPE300; each one will be studied with a span between restrain supports of 2.4, 3.9, e 5.4 meters. The beams will also be studied at the following temperatures 20, 200, 400 e 600°C. The simulation was incremental and iterative, using ANSYS.

Keywords:

Partially encased beams; Fire resistance; Simplified and advanced calculation methods; Numerical simulation.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	Vigas parcialmente embebidas em betão	1
1.2.	Objetivos do estudo	2
1.3.	Motivação para o estudo	2
1.4.	Organização da tese	3
1.5.	ESTADO DA ARTE	3
2.	PROPRIEDADE DOS MATERIAIS	7
2.1.	Propriedades mecânicas	7
2.1.1.	Aço dos perfis metálicos	7
2.1.2.	Aço de reforço	8
2.1.3.	Betão	9
2.1.	Propriedades térmicas	10
2.1.1.	Aço	10
2.1.2.	Betão	12
3.	AÇÃO DO FOGO	15
3.1.	Ação térmica	15
3.1.1.	Curva de incêndio natural	16
3.1.2.	Curva de incêndio padrão	17
3.2.	Ação mecânica	17
4.	COMPORTAMENTO DA SECÇÃO TRANSVERSAL AO FOGO	19
4.1.	Introdução	19
4.1.	Secções parcialmente embebidas	19
4.2.	Método simplificado de cálculo	21
4.2.1.	Temperatura nos banzos	22
4.2.2.	Redução da altura da alma	22
4.2.3.	Secção resistente e temperatura média no betão	23
4.2.4.	Redução das características de rigidez e resistência do aço de reforço	24
4.3.	Método avançado de cálculo	25
4.4.	Comparação dos resultados e novas propostas	28
4.4.1.	Temperatura nos banzos	28
4.4.2.	Redução da altura da alma	30
4.4.3.	Secção resistente e temperatura média no betão	33
4.4.4.	Redução das características de rigidez e resistência do aço de reforço	36
4.4.5.	Método de soma pesada para determinação de resistência ao fogo	38
4.5.	Conclusões do capítulo	40
5.	RESISTÊNCIA DE VIGAS À FLEXÃO A TEMPERATURAS ELEVADAS ..	41
5.1.	Introdução	41
5.2.	Método analítico de cálculo do momento plástico	41
5.3.	Método analítico de cálculo do momento crítico	44
5.4.	Método analítico de cálculo do momento resistente de encurvadura lateral torsional	46
5.5.	Resultados à flexão em 3 pontos	48
5.6.	Resultados à flexão por carga distribuída	58
6.	SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA RESISTÊNCIA DE VIGAS À FLEXÃO A TEMPERATURAS ELEVADAS	69
6.1.	Introdução	69
6.2.	Características geométricas das vigas	69

6.3.	Comportamento do material	71
6.4.	Teste da malha (convergência)	74
6.5.	Modelo utilizado para o estudo dos elementos viga	75
6.6.	Teste do método de Integração para o estudo dos elementos viga	75
7.	SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA ESTABILIDADE LINEAR ELÁSTICA	77
7.1.	Modos de deformação	77
7.2.	Momento crítico	77
7.3.	Imperfeição geométrica	78
7.4.	Simulação numérica da resistência à flexão a temperatura elevadas.....	79
7.4.1.	Método numérico	79
7.4.2.	Resultados numéricos para vigas PEBA100.....	80
7.5.	Resultados numéricos para vigas PEBA200.....	82
7.6.	Resultados numéricos para vigas PEBA300.....	83
7.7.	Resultados numéricos para vigas PEBB100.....	84
7.8.	Resultados numéricos para vigas PEBB200.....	86
7.9.	Resultados numéricos para vigas PEBB300.....	87
7.10.	Resumo de resultados numéricos para diferentes níveis de temperatura.....	89
7.11.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	96
8.	REFERENCIAS	99
8.1.	BIBLIOGRAFIA	99

ANEXO I - DEFINIÇÃO DAS PEB

1.	PROPRIEDADES DOS MATERIAIS.....	2
1.1.	Betão.....	2
1.2.	Perfil metálico.....	3
1.3.	Varões de reforço.....	3
2.	CÁLCULO DAS SECCÕES.....	4
2.1.	Classe de betão.....	4
2.2.	Recobrimento.....	5
2.3.	Cálculo do aço de reforço longitudinal.....	6
2.4.	Cálculo da armadura transversal (estribos).....	7
3.	CÁLCULO PARA PEB100.....	9
3.1.	Cálculo da armadura transversal (estribos).....	11
3.2.	Verificações.....	13
4.	CÁLCULO PARA PEB200.....	14
4.1.	Cálculo da armadura transversal (estribos).....	15
4.2.	Verificações.....	17
5.	CÁLCULO PARA PEB300.....	17
5.1.	Cálculo da armadura transversal (estribos).....	19
5.2.	Verificações.....	21
6.	SECCÃO TRANSVERSAL	22
7.	SECCÃO LONGITUDINAL.....	23

ANEXO II - METODO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO.....	2
1.1. Temperatura média no banzo.....	2
1.2. Redução da altura da alma.....	4
1.3. Redução da secção de betão.....	6
1.4. Temperatura média no aço de reforço.....	9
2. MÉTODO AVANÇADO DE CÁLCULO.....	11
2.1. Temperatura média nos banzos.....	11
2.2. Redução da altura da alma.....	14
2.3. Redução da secção de betão.....	17
2.4. Temperatura média no aço de reforço.....	22
2.5. Soma pesada das 4 componente.....	24
3. PROPAGAÇÃO DA TEMPERATURA.....	28
3.1. Campos de temperatura.....	28
3.2. Isotérmica de 500°C.....	41
3.3. Isotérmicas.....	51

ANEXO III - MÉTODO ANALÍTICO

1. TABELAS DE CÁLCULO.....	2
1.1. VIGAS SUBMETIDAS A FLEXÃO EM 3 PONTOS.....	2
1.1.1. PEB100 a temperatura de 20°C.....	2
1.1.2. PEB100 a temperatura de 200°C.....	4
1.1.3. PEB100 a temperatura de 400°C.....	6
1.1.4. PEB100 a temperatura de 600°C.....	8
1.1.5. PEB200 a temperatura de 20°C.....	10
1.1.6. PEB200 a temperatura de 200°C.....	13
1.1.7. PEB200 a temperatura de 400°C.....	16
1.1.8. PEB200 a temperatura de 600°C.....	19
1.1.1. PEB300 a temperatura de 20°C.....	21
1.1.2. PEB300 a temperatura de 200°C.....	24
1.1.3. PEB300 a temperatura de 400°C.....	27
1.1.4. PEB300 a temperatura de 600°C.....	30
1.2. VIGAS SUBMETIDAS A CARGA DISTRIBUIDA.....	33
1.2.1. PEB100 a temperatura de 20°C.....	33
1.2.2. PEB100 a temperatura de 200°C.....	35
1.2.3. PEB100 a temperatura de 400°C.....	37
1.2.4. PEB100 a temperatura de 600°C.....	39
1.2.5. PEB200 a temperatura de 20°C.....	41
1.2.6. PEB200 a temperatura de 200°C.....	44
1.2.7. PEB200 a temperatura de 400°C.....	47
1.2.8. PEB200 a temperatura de 600°C.....	49
1.2.9. PEB300 a temperatura de 20°C.....	51
1.2.10. PEB300 a temperatura de 200°C.....	54
1.2.11. PEB300 a temperatura de 400°C.....	57
1.2.12. PEB300 a temperatura de 600°C.....	60

ANEXO IV - ANÁLISE ELÁSTICA LINEAR

1.	VIGAS À FLEXÃO EM 3 PONTOS COM CARGA UNITÁRIA.....	2
1.1.	PEBA100.....	2
1.1.	PEBA200.....	5
1.2.	PEBA300.....	8
1.1.	PEBB100.....	11
1.1.	PEBB200.....	14
1.1.	PEBB300.....	17
2.	VIGAS SUBMETIDAS A UMA CARGA UNITÁRIA DISTRIBUIDA.....	20
2.1.	PEBA100.....	20
2.1.	PEBA200.....	23
2.1.	PEBA300.....	26
2.1.	PEBB100.....	29
2.1.	PEBB200.....	32
2.1.	PEBB300.....	35

ANEXO V - ANÁLISE INELÁSTICA NÃO LINEAR

TEMPERATURA AMBIENTE

1.	Viga PEBA100_2,4F.....	3
2.	Viga PEBA100_3,9F.....	6
3.	Viga PEBA100_5,4F.....	9
4.	Viga PEBA200_2,4F.....	12
5.	Viga PEBA200_3,9F.....	15
6.	Viga PEBA200_5,4F.....	18
7.	Viga PEBA300_2,4F.....	21
8.	Viga PEBA300_3,9F.....	24
9.	Viga PEBA300_5,4F.....	27
10.	Viga PEBB100_2,4F.....	30
11.	Viga PEBB100_3,9F.....	33
12.	Viga PEBB100_5,4F.....	36
13.	Viga PEBB200_2,4F.....	39
14.	Viga PEBB200_3,9F.....	42
15.	Viga PEBB200_5,4F.....	45
16.	Viga PEBB300_2,4F.....	48
17.	Viga PEBB300_3,9F.....	51
18.	Viga PEBB300_5,4F.....	54

TEMPERATURA DE 200°C

19.	Viga PEBA100_2,4F.....	57
20.	Viga PEBA100_3,9F.....	60
21.	Viga PEBA100_5,4F.....	63
22.	Viga PEBA200_2,4F.....	66
23.	Viga PEBA200_3,9F.....	69
24.	Viga PEBA200_5,4F.....	72
25.	Viga PEBA300_2,4F.....	75
26.	Viga PEBA300_3,9F.....	78
27.	Viga PEBA300_5,4F.....	81

28.	Viga PEBB100_2,4F.....	84
29.	Viga PEBB100_3,9F.....	87
30.	Viga PEBB100_5,4F.....	90
31.	Viga PEBB200_2,4F.....	93
32.	Viga PEBB200_3,9F.....	96
33.	Viga PEBB200_5,4F.....	99
34.	Viga PEBB300_2,4F.....	102
35.	Viga PEBB300_3,9F.....	105
36.	Viga PEBB300_5,4F.....	108
TEMPERATURA DE 400°C		
37.	Viga PEBA100_2,4F.....	111
38.	Viga PEBA100_3,9F.....	114
39.	Viga PEBA100_5,4F.....	117
40.	Viga PEBA200_2,4F.....	120
41.	Viga PEBA200_3,9F.....	123
42.	Viga PEBA200_5,4F.....	126
43.	Viga PEBA300_2,4F.....	129
44.	Viga PEBA300_3,9F.....	132
45.	Viga PEBA300_5,4F.....	135
46.	Viga PEBB100_2,4F.....	138
47.	Viga PEBB100_3,9F.....	141
48.	Viga PEBB100_5,4F.....	144
49.	Viga PEBB200_2,4F.....	147
50.	Viga PEBB200_3,9F.....	150
51.	Viga PEBB200_5,4F.....	153
52.	Viga PEBB300_2,4F.....	156
53.	Viga PEBB300_3,9F.....	159
54.	Viga PEBB300_5,4F.....	162
TEMPERATURA DE 600°C		
55.	Viga PEBA100_2,4F.....	165
56.	Viga PEBA100_3,9F.....	168
57.	Viga PEBA100_5,4F.....	171
58.	Viga PEBA200_2,4F.....	174
59.	Viga PEBA200_3,9F.....	177
60.	Viga PEBA200_5,4F.....	180
61.	Viga PEBA300_2,4F.....	183
62.	Viga PEBA300_3,9F.....	186
63.	Viga PEBA300_5,4F.....	189
64.	Viga PEBB100_2,4F.....	192
65.	Viga PEBB100_3,9F.....	195
66.	Viga PEBB100_5,4F.....	198
67.	Viga PEBB200_2,4F.....	201
68.	Viga PEBB200_3,9F.....	204
69.	Viga PEBB200_5,4F.....	207
70.	Viga PEBB300_2,4F.....	210
71.	Viga PEBB300_3,9F.....	213
72.	Viga PEBB300_5,4F.....	216

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Fatores de redução para a relação tensões-extensões de aço carbono a temperaturas elevadas.....	7
Tabela 3.2 - Características mecânicas do aço S500.....	8
Tabela 3.3 - Coeficientes de redução das propriedades mecânicas do aço laminado a quente para betão armado a temperaturas elevadas.....	8
Tabela 3.4 - Características mecânicas do betão C20/25.....	9
Tabela 3.5 - Coeficientes de redução das propriedades mecânicas do betão a temperaturas elevadas.....	9
Tabela 5.1 - Características das secções em estudo.....	21
Tabela 5.2 - Parâmetros para determinação da temperatura no Banzo.....	22
Tabela 5.3 - Parâmetros para a redução da altura da alma.....	23
Tabela 5.4 - Redução da secção de betão.....	23
Tabela 5.5 - Temperatura média na secção resistente do betão.....	24
Tabela 5.6 - Fator de redução k_{yt} para a tensão de cedência do aço de reforço f_{sy}	25
Tabela 5.7 - Fator de redução k_{Et} para o módulo de elasticidade do aço de reforço E_s	25
Tabela 4.8 - Características das seções em estudo.....	27
Tabela 5.9.- Parâmetros para determinação da temperatura no Banzo (secções HEB)..	29
Tabela 5.10 - Parâmetros para determinação da temperatura no Banzo (secções IPE)..	29
Tabela 5.11 - Limites de aplicação (perfis HEB e IPE).....	32
Tabela 5.12 - Redução da espessura de betão em secções HEB.....	34
Tabela 5.13 - Redução da espessura de betão em secções IPE.....	35
Tabela 5.14 – Condições para o cálculo da temperatura média no betão residual.....	36
Tabela 5.1 – Fatores de comprimento efetivo e fatores dependentes da carga e das condições de restrição.....	45
Tabela 5.2 – Fatores dependentes do centro de corte e aplicação da carga.....	46
Tabela 7.1- Constituição e características numéricas das vigas em estudo.....	70
Tabela 6.2 - Propriedades do aço S275.....	72
Tabela 6.3 - Propriedades do betão C20/25.....	72
Tabela 6.4 – Propriedades do aço S500.....	72
Tabela 7.1 – Resistência de vigas submetidas à flexão em 3 pontos a 20°C.....	89
Tabela 9.2 - Resistência de vigas submetidas à flexão em 3 pontos a 200°C.....	90
Tabela 9.3 - Resistência de vigas submetidas à flexão em 3 pontos a 400°C.....	90
Tabela 9.4 - Resistência de vigas submetidas à flexão em 3 pontos a 600°C.....	91

ANEXO I – DEFINIÇÃO DAS PEB

Tabela AI 1.1 – Características da classe de Betão C20/25.	2
Tabela AI 1.2 – Características do aço do perfil metálico.	3
Tabela AI 1.3 – Propriedades geométricas dos perfis do estudo.	3
Tabela AI 1.4 – Propriedades das secções dos perfis em estudo.	3
Tabela AI 1.5 – Características do aço de reforço.	4
Tabela AI 1.6 – Áreas em função do número de ramos e do varão pretendido.	4
Tabela AI 2.1 – Classe de exposição ambiental escolhida.	4
Tabela AI 2.2 – Classe de betão segundo a classe de exposição ambiental.	5
Tabela AI 3.1 – Propriedades da secção PEB100.	9
Tabela AI 4.1 – Propriedades da secção PEB200.	14
Tabela AI 5.1 – Propriedades da secção PEB300.	17

ANEXO II - MÉTODO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO

Tabela AII 1.1 - Temperatura no Banzo para determinadas secções.	2
Tabela AII 1.2 - Coeficientes de redução.	3
Tabela AII 1.3 - Redução da altura para determinadas secções.	4
Tabela AII 1.4 - Coeficiente de redução e temperatura média da alma residual.	5
Tabela AII 1.5 - Redução de espessura e temperatura média da secção de betão residual.	6
Tabela AII 1.6 - Coeficiente de redução da resistência e resistência a temperaturas elevadas do betão.	7
Tabela AII 1.7 - Extensão e módulo de elasticidade do betão.	8
Tabela AII 1.8 - Coeficientes de redução para o aço de reforço.	9
Tabela AII 1.9 - Temperatura média no aço de reforço.	10
Tabela AII 2.1 - Temperaturas médias no banzo.	11
Tabela AII 2.2 - Coeficiente de redução da resistência do aço nos banzos.	12
Tabela AII 2.3 - Coeficiente de redução da rigidez do aço nos banzos.	13
Tabela AII 2.4 - Parâmetros para a redução da altura para determinadas secções.	14
Tabela AII 2.5 - Temperatura média da alma residual.	15
Tabela AII 2.6 - Coeficientes de redução da resistência na alma.	16
Tabela AII 2.7 - Redução da dimensão efetiva horizontal de betão.	17
Tabela AII 2.8 - Redução da dimensão efetiva vertical de betão.	18
Tabela AII 2.9 - Temperatura média na secção de betão residual.	19
Tabela AII 2.10 - Coeficiente de redução.	20
Tabela AII 2.11 - Resistência a temperaturas elevadas.	20
Tabela AII 2.12 - Extensão do betão.	21
Tabela AII 2.13 - Módulo de elasticidade do betão.	21
Tabela AII 2.14 - Temperatura média do aço de reforço, à distancia u.	22
Tabela AII 2.15 - Fator de redução para a tensão de cedência do aço de reforço.	23
Tabela AII 2.16 - Fator de redução do módulo de elasticidade do aço de reforço.	23
Tabela AII 2.17 - Esforço axial plástico resistente.	24
Tabela AII 2.18 - Esforço axial plástico resistente.	25
Tabela AII 2.19 - Rigidez da secção a 20°C.	25
Tabela AII 2.20 - Rigidez efetiva segundo a EN1994-1-2.	26
Tabela AII 2.21 - Rigidez efetiva.	26
Tabela AII 2.22 - Redução do esforço axial plástico a temperaturas elevadas [%].	27
Tabela AII 2.23 - Percentagem de rigidez efetiva a temperaturas elevadas.	28

Tabela AII 3.1 - Temperatura em PEB160 e PEB180 para R30, R60, R90 e R120.....	29
Tabela AII 3.2 - Temperatura em PEB200 e PEB220 para R30, R60, R90 e R120.....	30
Tabela AII 3.3 - Temperatura em PEB240 e PEB260 para R30, R60, R90 e R120.....	31
Tabela AII 3.4 - Temperatura em PEB280 e PEB300 para R30, R60, R90 e R120.....	32
Tabela AII 3.5 - Temperatura em PEB320 e PEB340 para R30, R60, R90 e R120.....	33
Tabela AII 3.6 - Temperatura em PEB360 e PEB400 para R30, R60, R90 e R120.....	34
Tabela AII 3.7 - Temperatura em PEB450 e PEB500 para R30, R60, R90 e R120.....	35
Tabela AII 3.8 - Temperatura em PEB200I e PEB220I para R30, R60, R90 e R120.....	36
Tabela AII 3.9 - Temperatura em PEB240I e PEB270I para R30, R60, R90 e R120.....	37
Tabela AII 3.10 - Temperatura em PEB300I e PEB330I para R30, R60, R90 e R120.....	38
Tabela AII 3.11 - Temperatura em PEB360I e PEB400I para R30, R60, R90 e R120.....	39
Tabela AII 3.12 - Temperatura em PEB450I e PEB500I para R30, R60, R90 e R120.....	40
Tabela AII 3.13 - Isotérmica de 500 °C em perfis PEB160 e PEB180 para R30.....	41
Tabela AII 3.14 - Isotérmica de 500 °C em perfis PEB200 e PEB220 para R30.....	41
Tabela AII 3.15 - Isotérmica de 500 °C em perfis PEB240 e PEB260 para R30, R60 e R90.....	42
Tabela AII 3.16 - Isotérmica de 500 °C em perfis PEB280 e PEB300 para R30, R60, R90 e R120.....	43
Tabela AII 3.17 - Isotérmica de 500 °C em perfis PEB320 e PEB340 para R30, R60, R90 e R120.....	44
Tabela AII 3.18 - Isotérmica de 500 °C em perfis PEB360 e PEB400 para R30, R60, R90 e R120.....	45
Tabela AII 3.19 - Isotérmica de 500 °C em perfis PEB450 e PEB500 para R30, R60, R90 e R120.....	46
Tabela AII 3.20 - Isotérmica de 500 °C em perfis PEB200I e PEB220I para R30.....	47
Tabela AII 3.21 - Isotérmica de 500 °C em perfis PEB240I e PEB270I para R30 e R60.....	47
Tabela AII 3.22 - Isotérmica de 500 °C em perfis PEB300I e PEB330I para R30 e R60.....	48
Tabela AII 3.23 - Isotérmica de 500 °C em perfis PEB360I e PEB400I para R30, R60 e R90.....	49
Tabela AII 3.24 - Isotérmica de 500 °C em perfis PEB450I e PEB500I para: R30, R60, R90 e R120.....	50
Tabela AII 3.25 - Isotérmicas para PEB500 com Am/V=10,67 para R120.....	51
Tabela AII 3.26 - Isotérmicas para PEB300 com Am/V=13,33 para R120.....	51
Tabela AII 3.27 - Isotérmicas para PEB500I com Am/V=14,00 para R120.....	52
Tabela AII 3.28 - Isotérmicas para PEB400I com Am/V=16,11 para R90.....	52
Tabela AII 3.29 - Isotérmicas para PEB300I com Am/V=20,00 para R60.....	53

ANEXO III - MÉTODO ANALÍTICO

Tabela AIII 1.1 - Folha de cálculo para PEB100 sujeita a flexão em 3 pontos a 20°C.....	2
Tabela AIII 1.2 - Esbelteza e Resistência de vigas a 20°C variando o vão livre.....	3
Tabela AIII 1.3 - Folha de cálculo para PEB100 sujeita a flexão em 3 pontos á 200°C.....	4
Tabela AIII 1.4 - Esbelteza e Resistência de vigas a 200°C variando o vão livre.....	5
Tabela AIII 1.5 - Folha de cálculo para PEB100 sujeita a flexão em 3 pontos á 400°C.....	6
Tabela AIII 1.6 - Esbelteza e Resistência de vigas a 400°C variando o vão livre.....	7
Tabela AIII 1.7 - Folha de cálculo para PEB100 sujeita a flexão em 3 pontos a 600°C.....	8
Tabela AIII 1.8 - Esbelteza e Resistência de vigas a 600°C variando o vão livre.....	9

Tabela AIII 1.9 - Folha de cálculo para PEB200 sujeita a flexão em 3 pontos a 20°C.....	10
Tabela AIII 1.10 - Esbelteza e Resistência de vigas a 20°C variando o vão livre.....	11
Tabela AIII 1.11 - Folha de cálculo para PEB200 sujeita a flexão em 3 pontos a 200°C...13	
Tabela AIII 1.12 - Esbelteza e Resistência de vigas a 200°C variando o vão livre.....	14
Tabela AIII 1.13 - Folha de cálculo para PEB200 sujeita a flexão em 3 pontos a 400°C...16	
Tabela AIII 1.14 - Esbelteza e Resistência de vigas a 400°C variando o vão livre.....	17
Tabela AIII 1.15 - Folha de cálculo para PEB200 sujeita a flexão em 3 pontos a 600°C...19	
Tabela AIII 1.16 - Esbelteza e Resistência de vigas a 400°C variando o vão livre.....	20
Tabela AIII 1.17 - Folha de cálculo para PEB300 sujeita a flexão em 3 pontos a 20°C.....	21
Tabela AIII 1.18 - Esbelteza e Resistência de vigas a 20°C variando o vão livre.....	22
Tabela AIII 1.19 -Folha de cálculo para PEB300 sujeita a flexão em 3 pontos a 200°C....	24
Tabela AIII 1.20 - Esbelteza e Resistência de vigas a 200°C variando o vão livre.....	25
Tabela AIII 1.21 - Folha de cálculo para PEB300 sujeita a flexão em 3 pontos a 400°C...27	
Tabela AIII 1.22 - Esbelteza e Resistência de vigas a 400°C variando o vão livre.....	28
Tabela AIII 1.23 - Folha de cálculo para PEB300 sujeita a flexão em 3 pontos a 600°C...30	
Tabela AIII 1.24 - Esbelteza e Resistência de vigas a 600°C variando o vão livre.....	31
Tabela AIII 1.25 - Folha de cálculo para PEB100 sujeita a carga distribuída a 20°C.....	33
Tabela AIII 1.26 - Esbelteza e Resistência de vigas a 20°C variando o vão livre.....	34
Tabela AIII 1.27 - Folha de cálculo para PEB100 sujeita a carga distribuída a 200°C.....	35
Tabela AIII 1.28 - Esbelteza e Resistência de vigas a 200°C variando o vão livre.....	36
Tabela AIII 1.29 - Folha de cálculo para PEB100 sujeita a carga distribuída a 400°C.....	37
Tabela AIII 1.30 - Esbelteza e Resistência de vigas a 400°C variando o vão livre.....	38
Tabela AIII 1.31 - Folha de cálculo para PEB100 sujeita a carga distribuída a 600°C.....	39
Tabela AIII 1.32 - Esbelteza e Resistência de vigas a 600°C variando o vão livre.....	40
Tabela AIII 1.33 - Folha de cálculo para PEB200 sujeita a carga distribuída a 20°C.....	41
Tabela AIII 1.34 - Esbelteza e Resistência de vigas a 20°C variando o vão livre.....	42
Tabela AIII 1.35 - Folha de cálculo para PEB200 sujeita a carga distribuída a 200°C.....	44
Tabela AIII 1.36 - Esbelteza e Resistência de vigas a 200°C variando o vão livre.....	45
Tabela AIII 1.37 - Folha de cálculo para PEB200 sujeita a carga distribuída a 400°C.....	47
Tabela AIII 1.38 - Esbelteza e Resistência de vigas a 400°C variando o vão livre.....	48
Tabela AIII 1.39 - Folha de cálculo para PEB200 sujeita a carga distribuída a 600°C.....	49
Tabela AIII 1.40 - Esbelteza e Resistência de vigas a 600°C variando o vão livre.....	50
Tabela AIII 1.41 - Folha de cálculo para PEB300 sujeita a carga distribuída a 20°C.....	51
Tabela AIII 1.42 - Esbelteza e Resistência de vigas a 20°C variando o vão livre.....	52
Tabela AIII 1.43 - Folha de cálculo para PEB300 sujeita a carga distribuída a 200°C.....	54
Tabela AIII 1.44 - Esbelteza e Resistência de vigas a 200°C variando o vão livre.....	55
Tabela AIII 1.45 - Folha de cálculo para PEB300 sujeita a carga distribuída a 400°C.....	57
Tabela AIII 1.46 -Esbelteza e Resistência de vigas a 400°C variando o vão livre.....	58
Tabela AIII 1.47 - Folha de cálculo para PEB300 sujeita a carga distribuída a 600°C.....	60
Tabela AIII 1.48 -Esbelteza e Resistência de vigas a 600°C variando o vão livre.....	61

ANEXO IV - ANÁLISE ELÁSTICA LINEAR

Tabela AIV 1.1 - Viga PEBA100 de 2,4 metros.....	2
Tabela AIV 1.2 - Viga PEBA100 de 3,9 metros.....	3
Tabela AIV 1.3 - Viga PEBA100 de 5,4 metros.....	4
Tabela AIV 1.4 - Viga PEBA200 de 2,4 metros.....	5
Tabela AIV 1.5 - Viga PEBA200 de 3,9 metros.....	6

Tabela AIV 1.6 - Viga PEBA200 de 5,4 metros.....	7
Tabela AIV 1.7 - Viga PEBA300 de 2,4 metros.....	8
Tabela AIV 1.8 - Viga PEBA300 de 3,9 metros.....	9
Tabela AIV 1.9 - Viga PEBA300 de 5,4 metros.....	10
Tabela AIV 1.10 - Viga PEBB100 de 2,4 metros.....	11
Tabela AIV 1.11 - Viga PEBB100 de 3,9 metros.....	12
Tabela AIV 1.12 - Viga PEBB100 de 5,4 metros.....	13
Tabela AIV 1.13 - Viga PEBB200 de 2,4 metros.....	14
Tabela AIV 1.14 - Viga PEBB200 de 3,9 metros.....	15
Tabela AIV 1.15 - Viga PEBB200 de 5,4 metros.....	16
Tabela AIV 1.16 - Viga PEBB300 de 2,4 metros.....	17
Tabela AIV 1.17 - Viga PEBB300 de 3,9 metros.....	18
Tabela AIV 1.18 - Viga PEBB300 de 5,4 metros.....	19
Tabela AIV 2.1 - Viga PEBA100 de 2,4 metros.....	20
Tabela AIV 2.2 - Viga PEBA100 de 3,9 metros.....	21
Tabela AIV 2.3 - Viga PEBA100 de 5,4 metros.....	22
Tabela AIV 2.4 - Viga PEBA200 de 2,4 metros.....	23
Tabela AIV 2.5 - Viga PEBA200 de 3,9 metros.....	24
Tabela AIV 2.6 - Viga PEBA200 de 5,4 metros.....	25
Tabela AIV 2.7 - Viga PEBA300 de 2,4 metros.....	26
Tabela AIV 2.8 - Viga PEBA300 de 3,9 metros.....	27
Tabela AIV 2.9 - Viga PEBA300 de 5,4 metros.....	28
Tabela AIV 2.10 - Viga PEBB100 de 2,4 metros.....	29
Tabela AIV 2.11 - Viga PEBB100 de 3,9 metros.....	30
Tabela AIV 2.12 - Viga PEBB100 de 5,4 metros.....	31
Tabela AIV 2.13 - Viga PEBB200 de 2,4 metros.....	32
Tabela AIV 2.14 - Viga PEBB200 de 3,9 metros.....	33
Tabela AIV 2.15 - Viga PEBB200 de 5,4 metros.....	34
Tabela AIV 2.16 - Viga PEBB300 de 2,4 metros.....	35
Tabela AIV 2.17 - Viga PEBB300 de 3,9 metros.....	36
Tabela AIV 2.18 - Viga PEBB300 de 5,4 metros.....	37

ANEXO V - ANALISE INELASTICA NÃO LINEAR TEMPERATURA AMBIENTE

Tabela AV 1.1 - Características da viga.....	2
Tabela AV 1.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	2
Tabela AV 1.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	3
Tabela AV 1.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	3
Tabela AV 1.5 – Principais eventos de carga.....	3
Tabela AV 2.1 - Características da viga.....	5
Tabela AV 2.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	5
Tabela AV 2.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	6
Tabela AV 2.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	6
Tabela AV 2.5 - Principais eventos de carga.....	6
Tabela AV 3.1 - Características da viga.....	8
Tabela AV 3.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	8
Tabela AV 3.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	9

Tabela AV 3.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	9
Tabela AV 3.5 - Principais eventos de carga.....	9
Tabela AV 4.1 - Características da viga.....	11
Tabela AV 4.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	11
Tabela AV 4.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	12
Tabela AV 4.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	12
Tabela AV 4.5 - Principais eventos de carga.....	12
Tabela AV 5.1 - Características da viga.....	14
Tabela AV 5.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	14
Tabela AV 5.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	15
Tabela AV 5.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	15
Tabela AV 5.5 - Principais eventos de carga.....	15
Tabela AV 6.1 - Características da viga.....	17
Tabela AV 6.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	17
Tabela AV 6.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	18
Tabela AV 6.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	18
Tabela AV 6.5 - Principais eventos de carga.....	18
Tabela AV 7.1 - Características da viga.....	20
Tabela AV 7.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	20
Tabela AV 7.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	21
Tabela AV 7.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	21
Tabela AV 7.5 - Principais eventos de carga.....	21
Tabela AV 8.1 - Características da viga.....	23
Tabela AV 8.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	23
Tabela AV 8.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	24
Tabela AV 8.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	24
Tabela AV 8.5 - Principais eventos de carga.....	24
Tabela AV 9.1 - Características da viga.....	26
Tabela AV 9.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	26
Tabela AV 9.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	27
Tabela AV 9.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	27
Tabela AV 9.5 - Principais eventos de carga.....	27
Tabela AV 10.1 - Características da viga.....	29
Tabela AV 10.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	29
Tabela AV 10.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	30
Tabela AV 10.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	30
Tabela AV 10.5 - Principais eventos de carga.....	30
Tabela AV 11.1 - Características da viga.....	32
Tabela AV 11.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	32
Tabela AV 11.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	33
Tabela AV 11.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	33
Tabela AV 11.5 - Principais eventos de carga.....	33
Tabela AV 12.1 - Características da viga.....	35
Tabela AV 12.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	35
Tabela AV 12.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	36
Tabela AV 12.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	36
Tabela AV 12.5 - Principais eventos de carga.....	36
Tabela AV 13.1 - Características da viga.....	38
Tabela AV 13.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	38

Tabela AV 13.3 – Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	39
Tabela AV 13.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	39
Tabela AV 13.5 - Principais eventos de carga.....	39
Tabela AV 14.1 - Características da viga.....	41
Tabela AV 14.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	41
Tabela AV 14.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	42
Tabela AV 14.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	42
Tabela AV 14.5 - Principais eventos de carga.....	42
Tabela AV 15.1 - Características da viga.....	44
Tabela AV 15.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	44
Tabela AV 15.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	45
Tabela AV 15.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	45
Tabela AV 15.5 - Principais eventos de carga.....	45
Tabela AV 16.1 - Características da viga.....	47
Tabela AV 16.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	47
Tabela AV 16.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	48
Tabela AV 16.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	48
Tabela AV 16.5 - Principais eventos de carga.....	48
Tabela AV 17.1 - Características da viga.....	50
Tabela AV 17.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	50
Tabela AV 17.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	51
Tabela AV 17.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	51
Tabela AV 17.5 - Principais eventos de carga.....	51
Tabela AV 18.1 - Características da viga.....	53
Tabela AV 18.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	53
Tabela AV 18.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	54
Tabela AV 18.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	54
Tabela AV 18.5 - Principais eventos de carga.....	54
TEMPERATURA DE 200°C	
Tabela AV 19.1 - Características da viga.....	56
Tabela AV 19.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	56
Tabela AV 19.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	57
Tabela AV 19.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	57
Tabela AV 19.5 - Principais eventos de carga.....	57
Tabela AV 20.1 - Características da viga.....	59
Tabela AV 20.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	59
Tabela AV 20.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	60
Tabela AV 20.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	60
Tabela AV 20.5 - Principais eventos de carga.....	60
Tabela AV 21.1 - Características da viga.....	62
Tabela AV 21.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	62
Tabela AV 21.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	63
Tabela AV 21.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	63
Tabela AV 21.5 - Principais eventos de carga.....	63
Tabela AV 22.1 - Características da viga.....	65
Tabela AV 22.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	65
Tabela AV 22.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	66
Tabela AV 22.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	66
Tabela AV 22.5 - Principais eventos de carga.....	66

Tabela AV 23.1 - Características da viga.....	68
Tabela AV 23.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	68
Tabela AV 23.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	69
Tabela AV 23.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	69
Tabela AV 23.5 - Principais eventos de carga.....	69
Tabela AV 24.1 - Características da viga.....	71
Tabela AV 24.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	71
Tabela AV 24.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	72
Tabela AV 24.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	72
Tabela AV 24.5 - Principais eventos de carga.....	72
Tabela AV 25.1 - Características da viga.....	74
Tabela AV 25.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	74
Tabela AV 25.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	75
Tabela AV 25.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	75
Tabela AV 25.5 - Principais eventos de carga.....	75
Tabela AV 26.1 - Características da viga.....	77
Tabela AV 26.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	77
Tabela AV 26.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	78
Tabela AV 26.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	78
Tabela AV 26.5 - Principais eventos de carga.....	78
Tabela AV 27.1 - Características da viga.....	80
Tabela AV 27.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	80
Tabela AV 27.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	81
Tabela AV 27.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	81
Tabela AV 27.5 - Principais eventos de carga.....	81
Tabela AV 28.1 - Características da viga.....	83
Tabela AV 28.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	83
Tabela AV 28.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	84
Tabela AV 28.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	84
Tabela AV 28.5 - Principais eventos de carga.....	84
Tabela AV 29.1 - Características da viga.....	86
Tabela AV 29.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	86
Tabela AV 29.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	87
Tabela AV 29.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	87
Tabela AV 29.5 - Principais eventos de carga.....	87
Tabela AV 30.1 - Características da viga.....	89
Tabela AV 30.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	89
Tabela AV 30.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	90
Tabela AV 30.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	90
Tabela AV 30.5 - Principais eventos de carga.....	90
Tabela AV 31.1 - Características da viga.....	92
Tabela AV 31.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	92
Tabela AV 31.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	93
Tabela AV 31.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	93
Tabela AV 31.5 - Principais eventos de carga.....	93
Tabela AV 32.1 - Características da viga.....	95
Tabela AV 32.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	95
Tabela AV 32.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	96
Tabela AV 32.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	96

Tabela AV 32.5 - Principais eventos de carga.....	96
Tabela AV 33.1 - Características da viga.....	98
Tabela AV 33.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	98
Tabela AV 33.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	99
Tabela AV 33.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	99
Tabela AV 33.5 - Principais eventos de carga.....	99
Tabela AV 34.1 - Características da viga.....	101
Tabela AV 34.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	101
Tabela AV 34.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	102
Tabela AV 34.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	102
Tabela AV 34.5 - Principais eventos de carga.....	102
Tabela AV 35.1 - Características da viga.....	104
Tabela AV 35.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	104
Tabela AV 35.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	105
Tabela AV 35.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	105
Tabela AV 35.5 - Principais eventos de carga.....	105
Tabela AV 36.1 - Características da viga.....	107
Tabela AV 36.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	107
Tabela AV 36.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	108
Tabela AV 36.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	108
Tabela AV 36.5 - Principais eventos de carga.....	108
TEMPERATURA DE 400°C	
Tabela AV 37.1 - Características da viga.....	110
Tabela AV 37.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	110
Tabela AV 37.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	111
Tabela AV 37.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	111
Tabela AV 37.5 - Principais eventos de carga.....	111
Tabela AV 38.1 - Características da viga.....	113
Tabela AV 38.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	113
Tabela AV 38.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	114
Tabela AV 38.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	114
Tabela AV 38.5 - Principais eventos de carga.....	114
Tabela AV 39.1 - Características da viga.....	116
Tabela AV 39.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	116
Tabela AV 39.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	117
Tabela AV 39.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	117
Tabela AV 39.5 - Principais eventos de carga.....	117
Tabela AV 40.1 - Características da viga.....	119
Tabela AV 40.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	119
Tabela AV 40.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	120
Tabela AV 40.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	120
Tabela AV 40.5 - Principais eventos de carga.....	120
Tabela AV 41.1 - Características da viga.....	122
Tabela AV 41.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	122
Tabela AV 41.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	123
Tabela AV 41.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	123
Tabela AV 41.5 - Principais eventos de carga.....	123
Tabela AV 42.1 - Características da viga.....	125
Tabela AV 42.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	125

Tabela AV 42.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	126
Tabela AV 42.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	126
Tabela AV 42.5 - Principais eventos de carga.....	126
Tabela AV 43.1 - Características da viga.....	128
Tabela AV 43.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	128
Tabela AV 43.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	129
Tabela AV 43.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	129
Tabela AV 43.5 - Principais eventos de carga.....	129
Tabela AV 44.1 - Características da viga.....	131
Tabela AV 44.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	131
Tabela AV 44.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	132
Tabela AV 44.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	132
Tabela AV 44.5 - Principais eventos de carga.....	132
Tabela AV 45.1 - Características da viga.....	134
Tabela AV 45.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	134
Tabela AV 45.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	135
Tabela AV 45.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	135
Tabela AV 45.5 - Principais eventos de carga.....	135
Tabela AV 46.1 - Características da viga.....	137
Tabela AV 46.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	137
Tabela AV 46.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	138
Tabela AV 46.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	138
Tabela AV 46.5 - Principais eventos de carga.....	138
Tabela AV 47.1 - Características da viga.....	140
Tabela AV 47.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	140
Tabela AV 47.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	141
Tabela AV 47.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	141
Tabela AV 47.5 - Principais eventos de carga.....	141
Tabela AV 48.1 - Características da viga.....	143
Tabela AV 48.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	143
Tabela AV 48.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	144
Tabela AV 48.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	144
Tabela AV 48.5 - Principais eventos de carga.....	144
Tabela AV 49.1 - Características da viga.....	146
Tabela AV 49.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	146
Tabela AV 49.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	147
Tabela AV 49.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	147
Tabela AV 49.5 - Principais eventos de carga.....	147
Tabela AV 50.1 - Características da viga.....	149
Tabela AV 50.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	149
Tabela AV 50.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	150
Tabela AV 50.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	150
Tabela AV 50.5 - Principais eventos de carga.....	150
Tabela AV 51.1 - Características da viga.....	152
Tabela AV 51.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	152
Tabela AV 51.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	153
Tabela AV 51.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	153
Tabela AV 51.5 - Principais eventos de carga.....	153
Tabela AV 52.1 - Características da viga.....	155

Tabela AV 52.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	155
Tabela AV 52.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	156
Tabela AV 52.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	156
Tabela AV 52.5 - Principais eventos de carga.....	156
Tabela AV 53.1 - Características da viga.....	158
Tabela AV 53.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	158
Tabela AV 53.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	159
Tabela AV 53.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	159
Tabela AV 53.5 - Principais eventos de carga.....	159
Tabela AV 54.1 - Características da viga.....	161
Tabela AV 54.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	161
Tabela AV 54.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	162
Tabela AV 54.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	162
Tabela AV 54.5 - Principais eventos de carga.....	162
TEMPERATURA DE 600°C	
Tabela AV 55.1 - Características da viga.....	164
Tabela AV 55.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	164
Tabela AV 55.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	165
Tabela AV 55.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	165
Tabela AV 55.5 - Principais eventos de carga.....	165
Tabela AV 56.1 - Características da viga.....	167
Tabela AV 56.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	167
Tabela AV 56.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	168
Tabela AV 56.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	168
Tabela AV 56.5 - Principais eventos de carga.....	168
Tabela AV 57.1 - Características da viga.....	170
Tabela AV 57.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	170
Tabela AV 57.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	171
Tabela AV 57.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	171
Tabela AV 57.5 - Principais eventos de carga.....	171
Tabela AV 58.1 - Características da viga.....	173
Tabela AV 58.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	173
Tabela AV 58.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	174
Tabela AV 58.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	174
Tabela AV 58.5 - Principais eventos de carga.....	174
Tabela AV 59.1 - Características da viga.....	176
Tabela AV 59.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	176
Tabela AV 59.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	177
Tabela AV 59.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	177
Tabela AV 59.5 - Principais eventos de carga.....	177
Tabela AV 60.1 - Características da viga.....	179
Tabela AV 60.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	179
Tabela AV 60.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	180
Tabela AV 60.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	180
Tabela AV 60.5 - Principais eventos de carga.....	180
Tabela AV 61.1 - Características da viga.....	182
Tabela AV 61.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	182
Tabela AV 61.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	183
Tabela AV 61.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	183

Tabela AV 61.5 - Principais eventos de carga.....	183
Tabela AV 62.1 - Características da viga.....	185
Tabela AV 62.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	185
Tabela AV 62.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	186
Tabela AV 62.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	186
Tabela AV 62.5 - Principais eventos de carga.....	186
Tabela AV 63.1 - Características da viga.....	188
Tabela AV 63.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	188
Tabela AV 63.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	189
Tabela AV 63.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	189
Tabela AV 63.5 - Principais eventos de carga.....	189
Tabela AV 64.1 - Características da viga.....	191
Tabela AV 64.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	191
Tabela AV 64.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	192
Tabela AV 64.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	192
Tabela AV 64.5 - Principais eventos de carga.....	192
Tabela AV 65.1 - Características da viga.....	194
Tabela AV 65.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	194
Tabela AV 65.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	195
Tabela AV 65.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	195
Tabela AV 65.5 - Principais eventos de carga.....	195
Tabela AV 66.1 - Características da viga.....	197
Tabela AV 66.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	197
Tabela AV 66.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	198
Tabela AV 66.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	198
Tabela AV 66.5 - Principais eventos de carga.....	198
Tabela AV 67.1 - Características da viga.....	200
Tabela AV 67.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	200
Tabela AV 67.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	201
Tabela AV 67.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	201
Tabela AV 67.5 - Principais eventos de carga.....	201
Tabela AV 68.1 - Características da viga.....	203
Tabela AV 68.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	203
Tabela AV 68.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	204
Tabela AV 68.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	204
Tabela AV 68.5 - Principais eventos de carga.....	204
Tabela AV 69.1 - Características da viga.....	206
Tabela AV 69.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	206
Tabela AV 69.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	207
Tabela AV 69.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	207
Tabela AV 69.5 - Principais eventos de carga.....	207
Tabela AV 70.1 - Características da viga.....	209
Tabela AV 70.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	209
Tabela AV 70.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	210
Tabela AV 70.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	210
Tabela AV 70.5 - Principais eventos de carga.....	210
Tabela AV 71.1 - Características da viga.....	212
Tabela AV 71.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	212
Tabela AV 71.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	213

Tabela AV 71.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	213
Tabela AV 71.5 - Principais eventos de carga.....	213
Tabela AV 72.1 - Características da viga.....	215
Tabela AV 72.2 - Características do aço de perfil, no modelo numérico (ansys).....	215
Tabela AV 72.3 - Características do aço de reforço, no modelo numérico (ansys).....	216
Tabela AV 72.4 - Características do betão C20/25, no modelo numérico (ansys).....	216
Tabela AV 72.5 - Principais eventos de carga.....	216

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Calor específico do aço carbono, em função da temperatura.	11
Figura 2.2 - Condutibilidade do aço carbono, em função da temperatura.....	11
Figura 2.3 - Calor específico do betão, em função da temperatura.	13
Figura 2.4 - Massa volúmica do betão em função da temperatura.	14
Figura 3.1 – Curva de incêndio natural.	16
Figura 3.2 - Curva de incêndio padrão, ISO834[23]	17
Figura 3.3 -Resistência ao fogo considerando os vários domínios de resistência.....	18
Figura 4.1- Secção parcialmente embebida com betão.	20
Figura 4.2. Condições limites e elemento finito “PLANE55”adaptado de [26].....	26
Figura 4.3 - Resultados de simulação numérica da secção HEB 200 para 4 classes de resistência.	27
Figura 4.4.- Resultados da temperatura média nos banzos das secções analisadas.....	29
Figura 4.5 - Resultados da redução da altura da alma das secções.	30
Figura 4.6 - Temperatura média da alma, para diferentes classes de resistência e secções.	32
Figura 4.7 - Resultados da redução da secção resistente do betão	33
Figura 4.8 - Temperatura média do betão residual.....	35
Figura 4.9 - Temperatura média do reforço.....	37
Figura 4.10 – Comparação dos resultados obtidos para o esforço axial plástico resistente através do método da soma pesada.....	39
Figura 4.11 - Comparação dos resultados para a rigidez efetiva através do método da soma pesada	39
Figura 4.12- Comparação entre os resultados da nova proposta e do ansys obtidos pelo método da soma pesada	40
Figura 5.1 - Distribuição de tensões	41
Figura 5.2 - Geometria de secções PEBA e PEBB da viga.....	42
Figura 5.3.- Resistência à encurvadura a 20°C.....	49
Figura 5.4 - Resistência à encurvadura a 200°C.....	49
Figura 5.5 - Resistência à encurvadura a 400°C.....	50
Figura 5.6 - Resistência à encurvadura a 600°C.....	50
Figura 5.7 – Comparação da resistência à encurvadura entre IPE100 e PEBA100.	51
Figura 5.8 - Comparação da resistência à encurvadura entre IPE100 e PEBA100.	51
Figura 5.9 - Resistência à encurvadura a 20°C.....	52
Figura 5.10 - Resistência à encurvadura a 200°C.....	52
Figura 5.11 - Resistência à encurvadura a 400°C.....	53
Figura 5.12 - Resistência à encurvadura a 600°C.....	53
Figura 5.13 - Comparação da resistência à encurvadura entre IPE200 e PEBA200.	54
Figura 5.14 - Comparação da resistência à encurvadura entre IPE200 e PEBA200.	54

Figura 5.15 - Resistência à encurvadura a 20°C.....	55
Figura 5.16 - Resistência à encurvadura a 200°C.....	55
Figura 5.17 - Resistência à encurvadura a 400°C.....	56
Figura 5.18 - Resistência à encurvadura a 600°C.....	56
Figura 5.19 - Comparação da resistência à encurvadura entre IPE300 e PEBA300.	57
Figura 5.20 - Comparação da resistência à encurvadura entre IPE300 e PEBA300.	57
Figura 5.21 – Comparação da resistência à encurvadura a várias temperaturas.	57
Figura 5.22 – Comparação da esbelteza entre IPE100 e PEB100.....	58
Figura 5.23 - Resistência à encurvadura a 20°C.....	58
Figura 5.24 - Resistência à encurvadura a 200°C.....	59
Figura 5.25 - Resistência à encurvadura a 400°C.....	59
Figura 5.26 - Resistência à encurvadura a 600°C.....	60
Figura 5.27 - Comparação da resistência à encurvadura entre IPE100 e PEBB100.	60
Figura 5.28 - Comparação da resistência à encurvadura entre IPE100 e PEBB100.	61
Figura 5.29 - Resistência à encurvadura a 20°C.....	61
Figura 5.30 - Resistência à encurvadura a 200°C.....	62
Figura 5.31 - Resistência à encurvadura a 400°C.....	62
Figura 5.32 - Resistência à encurvadura a 600°C.....	63
Figura 5.33 - Comparação da resistência à encurvadura entre IPE200 e PEBB200.	63
Figura 5.34 - Comparação da resistência à encurvadura entre IPE200 e PEBB200.	64
Figura 5.35 - Resistência à encurvadura a 20°C.....	64
Figura 5.36 - Resistência à encurvadura a 200°C.....	65
Figura 5.37 - Resistência à encurvadura a 400°C.....	65
Figura 5.38 - Resistência à encurvadura a 600°C.....	66
Figura 5.39 - Comparação da resistência à encurvadura entre IPE300 e PEBB300.	66
Figura 5.40 Comparação da resistência à encurvadura entre IPE300 e PEBB300.....	67
Figura 5.41 - Comparação da resistência a encurvadura a várias temperaturas.	67
Figura 5.42 - Comparação da esbelteza entre IPE100 e PEB100.....	67
Figura 6.1 – Parâmetros do modelo para a simulação de flexão em 3 pontos.....	71
Figura 6.2 – Parâmetros do modelo para a simulação de flexão por carga distribuída uniformemente.....	71
Figura 6.3 – Tensão extensão do aço carbono S275 a determinadas temperaturas.....	72
Figura 6.4 – Vista ampliada da figura 7.3.	72
Figura 6.5 – Tensão extensão do betão C20/25 a determinadas temperaturas.....	73
Figura 6.6 - Tensão extensão do aço S500 a determinadas temperaturas.	73
Figura 6.7 – Vista ampliada da figura 7.46	73
Figura 6.8 - Força crítica em função do tempo de análise.....	74
Figura 6.9 - Erro relativo obtido da força crítica em função do tempo de análise.	74
Figura 6.10 - Distribuição da malha na viga PEB, realizada no programa ANSYS	74
Figura 7.1 - Elemento finito “SOLID 185”[26]	75

Figura 6.12 - Elemento finito “SOLID65”, [26].	75
Figura 6.13 – Comparação entre deslocamentos para diferentes métodos de integração.	76
Figura 8.1 – Deslocamento da viga PEBA100_2,4F a 20, 200, 400 e 600°C.	80
Figura 8.2 – Deslocamento da viga PEBA100_3,9F a 20, 200, 400 e 600°C.	81
Figura 8.3 – Deslocamento da viga PEBA100_5,4F a 20, 200, 400 e 600°C.	81
Figura 8.4 – Deslocamento da viga PEBA200_2,4F a 20, 200, 400 e 600°C.	82
Figura 8.5 – Deslocamento da viga PEBA200_3,9F a 20, 200, 400 e 600°C.	82
Figura 8.6 – Deslocamento da viga PEBA200_5,4F a 20, 200, 400 e 600°C.	83
Figura 8.7 - Deslocamento da viga PEBA300_2,4F a 20, 200, 400 e 600°C.	83
Figura 8.8 - Deslocamento da viga PEBA300_3,9F a 20, 200, 400 e 600°C.	84
Figura 8.9 - Deslocamento da viga PEBA300_5,4F a 20, 200, 400 e 600°C.	84
Figura 8.10 - Deslocamento da viga PEBB100_2,4F a 20, 200, 400 e 600°C.	85
Figura 8.11 - Deslocamento da viga PEBB100_3,9F a 20, 200, 400 e 600°C.	85
Figura 8.12 - Deslocamento da viga PEBB100_5,4F a 20, 200, 400 e 600°C.	85
Figura 8.13 - Deslocamento da viga PEBB200_2,4F a 20, 200, 400 e 600°C.	86
Figura 8.14 - Deslocamento da viga PEBB200_3,9F a 20, 200, 400 e 600°C.	86
Figura 8.15 - Deslocamento da viga PEBB200_5,4F a 20, 200, 400 e 600°C.	87
Figura 8.16 - Deslocamento da viga PEBB300_2,4F a 20, 200, 400 e 600°C.	87
Figura 8.17 - Deslocamento da viga PEBB300_3,9F a 20, 200, 400 e 600°C.	88
Figura 8.18 - Deslocamento da viga PEBB300_5,4F a 20, 200, 400 e 600°C.	88
Figura 8.19 – Comparação da força última de resistência à encurvadura lateral entre os resultados numéricos e os resultados analíticos à temperatura ambiente.	91
Figura 8.20 - Comparação da força última de resistência à encurvadura lateral entre os resultados numéricos e os resultados analítico a temperaturas elevadas.	92
Figura 8.21 - Comparação entre a força de cedência obtida pela análise dos resultados numéricos e a resistência à encurvadura obtida pelos resultados analíticos a temperatura ambiente.	92
Figura 8.22 - Comparação entre a força de cedência obtida pelos resultados numéricos e a resistência à encurvadura obtida pelos resultados analíticos a temperatura elevadas.	93
Figura 8.23 - Comparação entre a resistência à encurvadura definida pelo o limite da força correspondente a um deslocamento transversal de $L/20$ e a resistência determinada pelos resultados analíticos, a temperatura ambiente.	93
Figura 8.24 - Comparação entre a resistência à encurvadura definida pelo o limite da força correspondente a um deslocamento transversal de $L/20$ e a resistência determinada pelos resultados analíticos, a temperaturas elevadas.	94
Figura 8.25 - Comparação entre a resistência à encurvadura definida pelo o limite da força correspondente a um deslocamento transversal de $L/30$ e a resistência determinada pelos resultados analíticos, a temperatura ambiente.	94

Figura 8.26 - Comparação entre a resistência à encurvadura definida pelo o limite da força correspondente a um deslocamento transversal de $L/30$ e a resistência determinada pelos resultados analíticos, a temperaturas elevadas.	95
Figura 8.27 - Comparação da resistência definida pelo limite de proporcionalidade do deslocamento transversal e a resistência à encurvadura obtida pelo método analítico, à temperatura ambiente.	95
Figura 8.28 - Comparação da resistência definida pelo limite de proporcionalidade do deslocamento transversal e a resistência à encurvadura obtida pelo método analítico, a temperaturas elevadas.....	96

ANEXO I – DEFINIÇÃO DAS PEB

Figura AI 3.1 – Secção PEB representativa.....	9
Figura AI 6.1 - Secção transversal dos perfis PEBA100 e PEBB100	22
Figura AI 6.2 – Secção transversal dos perfis PEBA200 e PEBB200	22
Figura AI 6.3 - Secção transversal dos perfis PEBA300 e PEBB300	23
Figura AI 7.1 - Secção longitudinal do perfil PEBA100 com 2,4, 3,9 e 5,4 metros	24
Figura AI 7.2 - Secção longitudinal do perfil PEBA200 com 2,4, 3,9 e 5,4 metros	25
Figura AI 7.3 - Secção longitudinal do perfil PEBA300 com 2,4, 3,9 e 5,4 metros	26
Figura AI 7.4 - Secção longitudinal do perfil PEB100 com 2,4, 3,9 e 5,4 metros.....	27
Figura AI 7.5 - Secção longitudinal do perfil PEB200 com 2,4, 3,9 e 5,4 metros	28
Figura AI 7.6 - Secção longitudinal do perfil PEB300 com 2,4, 3,9 e 5,4 metros	29

ANEXO V - ANÁLISE INELÁSTICA NÃO LINEAR TEMPERATURA AMBIENTE

Figura AV 1.1 - Esquema longitudinal.....	2
Figura AV 1.2 – Modelo de secção para viga PEBA100_2,4F.....	2
Figura AV 1.3 - Comportamento dos materiais.....	2
Figura AV 1.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBA100_2,4F.....	3
Figura AV 1.5 - Modo de deformação para a força F_u	3
Figura AV 1.6 - Perfil IPE100 para a força F_u	4
Figura AV 1.7 - Aço de reforço para a força F_u	4
Figura AV 1.8 - Betão C20/25 para a força F_u	4
Figura AV 2.1 - Esquema longitudinal.....	5
Figura AV 2.2 - Modelo de secção para viga PEBA100_3,9F	5
Figura AV 2.3 - Comportamento dos materiais.....	5
Figura AV 2.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBA100_3,9F.....	6
Figura AV 2.5 - Modo de deformação para a força F_u	6
Figura AV 2.6 - Perfil IPE100 para a força F_u	7
Figura AV 2.7 - Aço de reforço para a força F_u	7
Figura AV 2.8 - Betão C20/25 para a força F_u	7
Figura AV 3.1 - Esquema longitudinal.....	8
Figura AV 3.2 - Modelo de secção para viga PEBA100_5,4F	8
Figura AV 3.3 - Comportamento dos materiais.....	8
Figura AV 3.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBA100_5,4F.....	9

Figura AV 3.5 - Modo de deformação para a força Fu.....	9
Figura AV 3.6 - Perfil IPE100 para a força Fu.....	10
Figura AV 3.7 - Aço de reforço para a força Fu.....	10
Figura AV 3.8 - Betão C20/25 para a força Fu.....	10
Figura AV 4.1 - Esquema longitudinal.....	11
Figura AV 4.2 - a) Modelo de secção para viga PEBA200_2,4F.....	11
Figura AV 4.3 - Comportamento dos materiais.....	11
Figura AV 4.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBA200_2,4F.....	12
Figura AV 4.5 - Modo de deformação para a força Fu.....	12
Figura AV 4.6 - Perfil IPE200 para a força Fu.....	13
Figura AV 4.7 - Aço de reforço para a força Fu.....	13
Figura AV 4.8 - Betão C20/25 para a força Fu.....	13
Figura AV 5.1 - Esquema longitudinal.....	14
Figura AV 5.2 - Modelo de secção para viga PEBA200_3,9F.....	14
Figura AV 5.3 - Comportamento dos materiais.....	14
Figura AV 5.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBB200_3,9F.....	15
Figura AV 5.5 - Modo de deformação para a força Fu.....	15
Figura AV 5.6 - Perfil IPE200 para a força Fu.....	16
Figura AV 5.7 - Aço de reforço para a força Fu.....	16
Figura AV 5.8 - Betão C20/25 para a força Fu.....	16
Figura AV 6.1 - Esquema longitudinal.....	17
Figura AV 6.2 - Modelo de secção para viga PEBA200_5,4F.....	17
Figura AV 6.3 - Comportamento dos materiais.....	17
Figura AV 6.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBA200_5,4F.....	18
Figura AV 6.5 - Modo de deformação para a força Fu.....	18
Figura AV 6.6 - Perfil IPE200 para a força Fu.....	19
Figura AV 6.7 - Aço de reforço para a força Fu.....	19
Figura AV 6.8 - Betão C20/25 para a força Fu.....	19
Figura AV 7.1 - Esquema longitudinal.....	20
Figura AV 7.2 - Modelo de secção para viga PEBA300_2,4F.....	20
Figura AV 7.3 - Comportamento dos materiais.....	20
Figura AV 7.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBA300_2,4F.....	21
Figura AV 7.5 - Modo de deformação para a força Fu.....	21
Figura AV 7.6 - Perfil IPE300 para a força Fu.....	22
Figura AV 7.7 - Aço de reforço para a força Fu.....	22
Figura AV 7.8 - Betão C20/25 para a força Fu.....	22
Figura AV 8.1 - Esquema longitudinal.....	23
Figura AV 8.2 - Modelo de secção para viga PEBA300_3,9F.....	23
Figura AV 8.3 - Comportamento dos materiais.....	23
Figura AV 8.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBA300_3,9F.....	24
Figura AV 8.5 - Modo de deformação para a força Fu.....	24
Figura AV 8.6 - Perfil IPE300 para a força Fu.....	25
Figura AV 8.7 - Aço de reforço para a força Fu.....	25
Figura AV 8.8 - Betão C20/25 para a força Fu.....	25
Figura AV 9.1 - Esquema longitudinal.....	26
Figura AV 9.2 - Modelo de secção para viga PEBA300_5,4F.....	26
Figura AV 9.3 - Comportamento dos materiais.....	26
Figura AV 9.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBA300_5,4F.....	27
Figura AV 9.5 - Modo de deformação para a força Fu.....	27

Figura AV 9.6 - Perfil IPE100 para a força F_u	28
Figura AV 9.7 - Aço de reforço para a força F_u	28
Figura AV 9.8 - Betão C20/25 para a força F_u	28
Figura AV 10.1 - Esquema longitudinal.....	29
Figura AV 10.2 Modelo de secção para viga PEBB100_2,4F	29
Figura AV 10.3 - Comportamento dos materiais.....	29
Figura AV 10.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBB100_2,4F.....	30
Figura AV 10.5 - Modo de deformação para a força F_u	30
Figura AV 10.6 - Perfil IPE100 para a força F_u	31
Figura AV 10.7 - Aço de reforço para a força F_u	31
Figura AV 10.8 - Betão C20/25 para a força F_u	31
Figura AV 11.1 - Esquema longitudinal.....	32
Figura AV 11.2 - Modelo de secção para viga PEBB100_3,9F	32
Figura AV 11.3 - Comportamento dos materiais.....	32
Figura AV 11.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBB100_3,9F.....	33
Figura AV 11.5 - Modo de deformação para a força F_u	33
Figura AV 11.6 - Perfil IPE100 para a força F_u	34
Figura AV 11.7 - Aço de reforço para a força F_u	34
Figura AV 11.8 - Betão C20/25 para a força F_u	34
Figura AV 12.1 - Esquema longitudinal.....	35
Figura AV 12.2 - Modelo de secção para viga PEBB100_5,4F	35
Figura AV 12.3 - Comportamento dos materiais.....	35
Figura AV 12.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBB100_5,4F.....	36
Figura AV 12.5 - Modo de deformação para a força F_u	36
Figura AV 12.6 - Perfil IPE100 para a força F_u	37
Figura AV 12.7 - Aço de reforço para a força F_u	37
Figura AV 12.8 - Betão C20/25 para a força F_u	37
Figura AV 13.1 - Esquema longitudinal.....	38
Figura AV 13.2 - Modelo de secção para viga PEBB200_2,4F	38
Figura AV 13.3 - Comportamento dos materiais.....	38
Figura AV 13.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBB200_2,4F.....	39
Figura AV 13.5 - Modo de deformação para a força F_u	39
Figura AV 13.6 - Perfil IPE100 para a força F_u	40
Figura AV 13.7 - Aço de reforço para a força F_u	40
Figura AV 13.8 - Betão C20/25 para a força F_u	40
Figura AV 14.1 - Esquema longitudinal.....	41
Figura AV 14.2 - Modelo de secção para viga PEBB200_3,9F	41
Figura AV 14.3 - Comportamento dos materiais.....	41
Figura AV 14.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBB200_3,9F.....	42
Figura AV 14.5 - Modo de deformação para a força F_u	42
Figura AV 14.6 - Perfil IPE100 para a força F_u	43
Figura AV 14.7 - Aço de reforço para a força F_u	43
Figura AV 14.8 - Betão C20/25 para a força F_u	43
Figura AV 15.1 - Esquema longitudinal.....	44
Figura AV 15.2 - Modelo de secção para viga PEBB200_5,4F	44
Figura AV 15.3 - Comportamento dos materiais.....	44
Figura AV 15.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBB200_5,4F.....	45
Figura AV 15.5 - Modo de deformação para a força F_u	45
Figura AV 15.6 - Perfil IPE100 para a força F_u	46

Figura AV 15.7 - Aço de reforço para a força F_u	46
Figura AV 15.8 - Betão C20/25 para a força F_u	46
Figura AV 16.1 - Esquema longitudinal.....	47
Figura AV 16.2 - Modelo de secção para viga PEBB300_2,4F	47
Figura AV 16.3 - Comportamento dos materiais.....	47
Figura AV 16.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBB300_2,4F.....	48
Figura AV 16.5 - Modo de deformação para a força F_u	48
Figura AV 16.6 - Perfil IPE100 para a força F_u	49
Figura AV 16.7 - Aço de reforço para a força F_u	49
Figura AV 16.8 - Betão C20/25 para a força F_u	49
Figura AV 17.1 - Esquema longitudinal.....	50
Figura AV 17.2 - Modelo de secção para viga PEBB300_3,9F	50
Figura AV 17.3 - Comportamento dos materiais.....	50
Figura AV 17.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBB300_3,9F.....	51
Figura AV 17.5 - Modo de deformação para a força F_u	51
Figura AV 17.6 - Perfil IPE100 para a força F_u	52
Figura AV 17.7 - Aço de reforço para a força F_u	52
Figura AV 17.8 - Betão C20/25 para a força F_u	52
Figura AV 18.1 - Esquema longitudinal.....	53
Figura AV 18.2 - Modelo de secção para viga PEBB300_5,4F	53
Figura AV 18.3 - Comportamento dos materiais.....	53
Figura AV 18.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBB300_5,4F.....	54
Figura AV 18.5 - Modo de deformação para a força F_u	54
Figura AV 18.6 - Perfil IPE100 para a força F_u	55
Figura AV 18.7 - Aço de reforço para a força F_u	55
Figura AV 18.8 - Betão C20/25 para a força F_u	55
TEMPERATURA DE 200°C	
Figura AV 19.1 - Esquema longitudinal.....	56
Figura AV 19.2 - Modelo de secção para viga PEBA100_2,4F	56
Figura AV 19.3 - Comportamento dos materiais.....	56
Figura AV 19.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBA100_2,4F.....	57
Figura AV 19.5 - Modo de deformação para a força F_u	57
Figura AV 19.6 - Perfil IPE100 para a força F_u	58
Figura AV 19.7 - Aço de reforço para a força F_u	58
Figura AV 19.8 - Betão C20/25 para a força F_u	58
Figura AV 20.1 - Esquema longitudinal.....	59
Figura AV 20.2 - Modelo de secção para viga PEBA100_3,9F	59
Figura AV 20.3 - Comportamento dos materiais.....	59
Figura AV 20.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBA100_3,9F.....	60
Figura AV 20.5 - Modo de deformação para a força F_u	60
Figura AV 20.6 - Perfil IPE100 para a força F_u	61
Figura AV 20.7 - Aço de reforço para a força F_u	61
Figura AV 20.8 - Betão C20/25 para a força F_u	61
Figura AV 21.1 - Esquema longitudinal.....	62
Figura AV 21.2 - Modelo de secção para viga PEBA100_5,4F	62
Figura AV 21.3 - Comportamento dos materiais.....	62
Figura AV 21.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBA100_5,4F.....	63
Figura AV 21.5 - Modo de deformação para a força F_u	63
Figura AV 21.6 - Perfil IPE100 para a força F_u	64

Figura AV 21.7 - Aço de reforço para a força F_u	64
Figura AV 21.8 - Betão C20/25 para a força F_u	64
Figura AV 22.1 - Esquema longitudinal.....	65
Figura AV 22.2 - Modelo de secção para viga PEBA200_2,4F.....	65
Figura AV 22.3 - Comportamento dos materiais.....	65
Figura AV 22.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBA200_2,4F.....	66
Figura AV 22.5 - Modo de deformação para a força F_u	66
Figura AV 22.6 - Perfil IPE100 para a força F_u	67
Figura AV 22.7 - Aço de reforço para a força F_u	67
Figura AV 22.8 - Betão C20/25 para a força F_u	67
Figura AV 23.1 - Esquema longitudinal.....	68
Figura AV 23.2 - Modelo de secção para viga PEBA200_3,9F.....	68
Figura AV 23.3 - Comportamento dos materiais.....	68
Figura AV 23.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBA200_3,9F.....	69
Figura AV 23.5 - Modo de deformação para a força F_u	69
Figura AV 23.6 - Perfil IPE100 para a força F_u	70
Figura AV 23.7 - Aço de reforço para a força F_u	70
Figura AV 23.8 - Betão C20/25 para a força F_u	70
Figura AV 24.1 - Esquema longitudinal.....	71
Figura AV 24.2 - Modelo de secção para viga PEBA200_5,4F.....	71
Figura AV 24.3 - Comportamento dos materiais.....	71
Figura AV 24.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBA200_5,4F.....	72
Figura AV 24.5 - Modo de deformação para a força F_u	72
Figura AV 24.6 - Perfil IPE100 para a força F_u	73
Figura AV 24.7 - Aço de reforço para a força F_u	73
Figura AV 24.8 - Betão C20/25 para a força F_u	73
Figura AV 25.1 - Esquema longitudinal.....	74
Figura AV 25.2 - Modelo de secção para viga PEBA300_2,4F.....	74
Figura AV 25.3 - Comportamento dos materiais.....	74
Figura AV 25.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBA300_2,4F.....	75
Figura AV 25.5 - Modo de deformação para a força F_u	75
Figura AV 25.6 - Perfil IPE100 para a força F_u	76
Figura AV 25.7 - Aço de reforço para a força F_u	76
Figura AV 25.8 - Betão C20/25 para a força F_u	76
Figura AV 26.1 - Esquema longitudinal.....	77
Figura AV 26.2 - Modelo de secção para viga PEBA300_3,9F.....	77
Figura AV 26.3 - Comportamento dos materiais.....	77
Figura AV 26.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBA300_3,9F.....	78
Figura AV 26.5 - Modo de deformação para a força F_u	78
Figura AV 26.6 - Perfil IPE100 para a força F_u	79
Figura AV 26.7 - Aço de reforço para a força F_u	79
Figura AV 26.8 - Betão C20/25 para a força F_u	79
Figura AV 27.1 - Esquema longitudinal.....	80
Figura AV 27.2 - Modelo de secção para viga PEBA300_5,4F.....	80
Figura AV 27.3 - Comportamento dos materiais.....	80
Figura AV 27.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBA300_5,4F.....	81
Figura AV 27.5 - Modo de deformação para a força F_u	81
Figura AV 27.6 - Perfil IPE300 para a força F_u	82
Figura AV 27.7 - Aço de reforço para a força F_u	82

Figura AV 27.8 - Betão C20/25 para a força F_u	82
Figura AV 28.1 - Esquema longitudinal.....	83
Figura AV 28.2 - Modelo de secção para viga PEBB100_2,4F	83
Figura AV 28.3 - Comportamento dos materiais.....	83
Figura AV 28.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBB100_2,4F.....	84
Figura AV 28.5 - Modo de deformação para a força F_u	84
Figura AV 28.6 - Perfil IPE100 para a força F_u	85
Figura AV 28.7 - Aço de reforço para a força F_u	85
Figura AV 28.8 - Betão C20/25 para a força F_u	85
Figura AV 29.1 - Esquema longitudinal.....	86
Figura AV 29.2 - Modelo de secção para viga PEBB100_3,9F	86
Figura AV 29.3 - Comportamento dos materiais.....	86
Figura AV 29.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBB100_3,9F.....	87
Figura AV 29.5 - Modo de deformação para a força F_u	87
Figura AV 29.6 - Perfil IPE100 para a força F_u	88
Figura AV 29.7 - Aço de reforço para a força F_u	88
Figura AV 29.8 - Betão C20/25 para a força F_u	88
Figura AV 30.1 - Esquema longitudinal.....	89
Figura AV 30.2 - Modelo de secção para viga PEBB100_5,4F	89
Figura AV 30.3 - Comportamento dos materiais.....	89
Figura AV 30.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBB100_5,4F.....	90
Figura AV 30.5 - Modo de deformação para a força F_u	90
Figura AV 30.6 - Perfil IPE100 para a força F_u	91
Figura AV 30.7 - Aço de reforço para a força F_u	91
Figura AV 30.8 - Betão C20/25 para a força F_u	91
Figura AV 31.1 - Esquema longitudinal.....	92
Figura AV 31.2 - Modelo de secção para viga PEBB200_2,4F	92
Figura AV 31.3 - Comportamento dos materiais.....	92
Figura AV 31.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBB200_2,4F.....	93
Figura AV 31.5 - Modo de deformação para a força F_u	93
Figura AV 31.6 - Perfil IPE200 para a força F_u	94
Figura AV 31.7 - Aço de reforço para a força F_u	94
Figura AV 31.8 - Betão C20/25 para a força F_u	94
Figura AV 32.1 - Esquema longitudinal.....	95
Figura AV 32.2 - Modelo de secção para viga PEBB200_3,9F	95
Figura AV 32.3 - Comportamento dos materiais.....	95
Figura AV 32.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBB200_3,9F.....	96
Figura AV 32.5 - Modo de deformação para a força	96
Figura AV 32.6 - Perfil IPE200 para a força F_u	97
Figura AV 32.7 - Aço de reforço para a força F_u	97
Figura AV 32.8 - Betão C20/25 para a força F_u	97
Figura AV 33.1 - Esquema longitudinal.....	98
Figura AV 33.2 - Modelo de secção para viga PEBB200_5,4F	98
Figura AV 33.3 - Comportamento dos materiais.....	98
Figura AV 33.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBB200_5,4F.....	99
Figura AV 33.5 - Modo de deformação para a força F_u	99
Figura AV 33.6 - Perfil IPE200 para a força F_u	100
Figura AV 33.7 - Aço de reforço para a força F_u	100
Figura AV 33.8 - Betão C20/25 para a força F_u	100

Figura AV 34.1 - Esquema longitudinal.....	101
Figura AV 34.2 - Modelo de secção para viga PEBB300_2,4F	101
Figura AV 34.3 - Comportamento dos materiais.....	101
Figura AV 34.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBB300_2,4F.....	102
Figura AV 34.5 - Modo de deformação para a força Fu.....	102
Figura AV 34.6 - Perfil IPE300 para a força Fu.....	103
Figura AV 34.7 - Aço de reforço para a força Fu.....	103
Figura AV 34.8 - Betão C20/25 para a força Fu.....	103
Figura AV 35.1 - Esquema longitudinal.....	104
Figura AV 35.2 - Modelo de secção para viga PEBB300_3,9F	104
Figura AV 35.3 - Comportamento dos materiais.....	104
Figura AV 35.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBB300_3,9F.....	105
Figura AV 35.5 - Modo de deformação para a força Fu.....	105
Figura AV 35.6 - Perfil IPE300 para a força Fu.....	106
Figura AV 35.7 - Aço de reforço para a força Fu.....	106
Figura AV 35.8 - Betão C20/25 para a força Fu.....	106
Figura AV 36.1 - Esquema longitudinal.....	107
Figura AV 36.2 - Modelo de secção para viga PEBB300_5,4F	107
Figura AV 36.3 - Comportamento dos materiais.....	107
Figura AV 36.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBB300_5,4F.....	108
Figura AV 36.5 - Modo de deformação para a força Fu.....	108
Figura AV 36.6 - Perfil IPE300 para a força Fu.....	109
Figura AV 36.7 - Aço de reforço para a força Fu.....	109
Figura AV 36.8 - Betão C20/25 para a força Fu.....	109
TEMPERATURA DE 400°C	
Figura AV 37.1 - Esquema longitudinal.....	110
Figura AV 37.2 - Modelo de secção para viga PEBA100_2,4F	110
Figura AV 37.3 - Comportamento dos materiais.....	110
Figura AV 37.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBA100_2,4F.....	111
Figura AV 37.5 - Modo de deformação para a força Fu.....	111
Figura AV 37.6 - Perfil IPE100 para a força Fu.....	112
Figura AV 37.7 - Aço de reforço para a força Fu.....	112
Figura AV 37.8 - Betão C20/25 para a força Fu.....	112
Figura AV 38.1 - Esquema longitudinal.....	113
Figura AV 38.2 - Modelo de secção para viga PEBA100_3,9F	113
Figura AV 38.3 - Comportamento dos materiais.....	113
Figura AV 38.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBA100_3,9F.....	114
Figura AV 38.5 - Modo de deformação para a força Fu.....	114
Figura AV 38.6 - Perfil IPE100 para a força Fu.....	115
Figura AV 38.7 - Aço de reforço para a força Fu.....	115
Figura AV 38.8 - Betão C20/25 para a força Fu.....	115
Figura AV 39.1 - Esquema longitudinal.....	116
Figura AV 39.2 - Modelo de secção para viga PEBA100_5,4F	116
Figura AV 39.3 - Comportamento dos materiais.....	116
Figura AV 39.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBA100_5,4F.....	117
Figura AV 39.5 - Modo de deformação para a força Fu.....	117
Figura AV 39.6 - Perfil IPE100 para a força Fu.....	118
Figura AV 39.7 - Aço de reforço para a força Fu.....	118
Figura AV 39.8 - Betão C20/25 para a força Fu.....	118

Figura AV 40.1 - Esquema longitudinal.....	119
Figura AV 40.2 - Modelo de secção para viga PEBA200_2,4F	119
Figura AV 40.3 - Comportamento dos materiais.....	119
Figura AV 40.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBA200_2,4F.....	120
Figura AV 40.5 - Modo de deformação para a força Fu.....	120
Figura AV 40.6 - Perfil IPE200 para a força Fu.....	121
Figura AV 40.7 - Aço de reforço para a força Fu.....	121
Figura AV 40.8 - Betão C20/25 para a força Fu.....	121
Figura AV 41.1 - Esquema longitudinal.....	122
Figura AV 41.2 - Modelo de secção para viga PEBA200_3,9F	122
Figura AV 41.3 - Comportamento dos materiais.....	122
Figura AV 41.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBA200_3,9F.....	123
Figura AV 41.5 - Modo de deformação para a força Fu.....	123
Figura AV 41.6 - Perfil IPE200 para a força Fu.....	124
Figura AV 41.7 - Aço de reforço para a força Fu.....	124
Figura AV 41.8 - Betão C20/25 para a força Fu.....	124
Figura AV 42.1 - Esquema longitudinal.....	125
Figura AV 42.2 - Modelo de secção para viga PEBA200_5,4F	125
Figura AV 42.3 - Comportamento dos materiais.....	125
Figura AV 42.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBA200_5,4F.....	126
Figura AV 42.5 - Modo de deformação para a força Fu.....	126
Figura AV 42.6 - Perfil IPE200 para a força Fu.....	127
Figura AV 42.7 - Aço de reforço para a força Fu.....	127
Figura AV 42.8 - Betão C20/25 para a força Fu.....	127
Figura AV 43.1 - Esquema longitudinal.....	128
Figura AV 43.2 - Modelo de secção para viga PEBA300_2,4F	128
Figura AV 43.3 - Comportamento dos materiais.....	128
Figura AV 43.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBA300_2,4F.....	129
Figura AV 43.5 - Modo de deformação para a força Fu.....	129
Figura AV 43.6 - Perfil IPE300 para a força Fu.....	130
Figura AV 43.7 - Aço de reforço para a força Fu.....	130
Figura AV 43.8 - Betão C20/25 para a força Fu.....	130
Figura AV 44.1 - Esquema longitudinal.....	131
Figura AV 44.2 - Modelo de secção para viga PEBA300_3,9F	131
Figura AV 44.3 - Comportamento dos materiais.....	131
Figura AV 44.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBA300_3,9F.....	132
Figura AV 44.5 - Modo de deformação para a força Fu.....	132
Figura AV 44.6 - Perfil IPE300 para a força Fu.....	133
Figura AV 44.7 - Aço de reforço para a força Fu.....	133
Figura AV 44.8 - Betão C20/25 para a força Fu.....	133
Figura AV 45.1 - Esquema longitudinal.....	134
Figura AV 45.2 - Modelo de secção para viga PEBA300_5,4F	134
Figura AV 45.3 - Comportamento dos materiais.....	134
Figura AV 45.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBA300_5,4F.....	135
Figura AV 45.5 - Modo de deformação para a força Fu.....	135
Figura AV 45.6 - Perfil IPE300 para a força Fu.....	136
Figura AV 45.7 - Aço de reforço para a força Fu.....	136
Figura AV 45.8 - Betão C20/25 para a força Fu.....	136
Figura AV 46.1 - Esquema longitudinal.....	137

Figura AV 46.2 - Modelo de secção para viga PEBB100_2,4F	137
Figura AV 46.3 - Comportamento dos materiais.....	137
Figura AV 46.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBB100_2,4F.....	138
Figura AV 46.5 - Modo de deformação para a força Fu.....	138
Figura AV 46.6 - Perfil IPE100 para a força Fu.....	139
Figura AV 46.7 - Aço de reforço para a força Fu.....	139
Figura AV 46.8 - Betão C20/25 para a força Fu.....	139
Figura AV 47.1 - Esquema longitudinal.....	140
Figura AV 47.2 - Modelo de secção para viga PEBB100_3,9F	140
Figura AV 47.3 - Comportamento dos materiais.....	140
Figura AV 47.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBB100_3,9F.....	141
Figura AV 47.5 - Modo de deformação para a força Fu.....	141
Figura AV 47.6 - Perfil IPE100 para a força Fu.....	142
Figura AV 47.7 - Aço de reforço para a força Fu.....	142
Figura AV 47.8 - Betão C20/25 para a força Fu.....	142
Figura AV 48.1 - Esquema longitudinal.....	143
Figura AV 48.2 - Modelo de secção para viga PEBB100_5,4F	143
Figura AV 48.3 - Comportamento dos materiais.....	143
Figura AV 48.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBB100_5,4F.....	144
Figura AV 48.5 - Modo de deformação para a força Fu.....	144
Figura AV 48.6 - Perfil IPE100 para a força Fu.....	145
Figura AV 48.7 - Aço de reforço para a força Fu.....	145
Figura AV 48.8 - Betão C20/25 para a força Fu.....	145
Figura AV 49.1 - Esquema longitudinal.....	146
Figura AV 49.2 - Modelo de secção para viga PEBB200_2,4F	146
Figura AV 49.3 - Comportamento dos materiais.....	146
Figura AV 49.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBB200_2,4F.....	147
Figura AV 49.5 - Modo de deformação para a força Fu.....	147
Figura AV 49.6 - Perfil IPE200 para a força Fu.....	148
Figura AV 49.7 - Aço de reforço para a força Fu.....	148
Figura AV 49.8 - Betão C20/25 para a força Fu.....	148
Figura AV 50.1 - Esquema longitudinal.....	149
Figura AV 50.2 - Modelo de secção para viga PEBB200_3,9F	149
Figura AV 50.3 - Comportamento dos materiais.....	149
Figura AV 50.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBB200_3,9F.....	150
Figura AV 50.5 - Modo de deformação para a força Fu.....	150
Figura AV 50.6 - Perfil IPE200 para a força Fu.....	151
Figura AV 50.7 - Aço de reforço para a força Fu.....	151
Figura AV 50.8 - Betão C20/25 para a força Fu.....	151
Figura AV 51.1 - Esquema longitudinal.....	152
Figura AV 51.2 - Modelo de secção para viga PEBB200_5,4F	152
Figura AV 51.3 - Comportamento dos materiais.....	152
Figura AV 51.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBB200_5,4F.....	153
Figura AV 51.5 - Modo de deformação para a força Fu.....	153
Figura AV 51.6 - Perfil IPE200 para a força Fu.....	154
Figura AV 51.7 - Aço de reforço para a força Fu.....	154
Figura AV 51.8 - Betão C20/25 para a força Fu.....	154
Figura AV 52.1 - Esquema longitudinal.....	155
Figura AV 52.2 - Modelo de secção para viga PEBB300_2,4F	155

Figura AV 52.3 - Comportamento dos materiais.....	155
Figura AV 52.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBB300_2,4F.....	156
Figura AV 52.5 - Modo de deformação para a força Fu.....	156
Figura AV 52.6 - Perfil IPE300 para a força Fu.....	157
Figura AV 52.7 - Aço de reforço para a força Fu.....	157
Figura AV 52.8 - Betão C20/25 para a força Fu.....	157
Figura AV 53.1 - Esquema longitudinal.....	158
Figura AV 53.2 - Modelo de secção para viga PEBB300_3,9F.....	158
Figura AV 53.3 - Comportamento dos materiais.....	158
Figura AV 53.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBB300_3,9F.....	159
Figura AV 53.5 - Modo de deformação para a força Fu.....	159
Figura AV 53.6 - Perfil IPE300 para a força Fu.....	160
Figura AV 53.7 - Aço de reforço para a força Fu.....	160
Figura AV 53.8 - Betão C20/25 para a força Fu.....	160
Figura AV 54.1 - Esquema longitudinal.....	161
Figura AV 54.2 - Modelo de secção para viga PEBB300_5,4F.....	161
Figura AV 54.3 - Comportamento dos materiais.....	161
Figura AV 54.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBB300_5,4F.....	162
Figura AV 54.5 - Modo de deformação para a força Fu.....	162
Figura AV 54.6 - Perfil IPE300 para a força Fu.....	163
Figura AV 54.7 - Aço de reforço para a força Fu.....	163
Figura AV 54.8 - Betão C20/25 para a força Fu.....	163
TEMPERATURA DE 600°C	
Figura AV 55.1 - Esquema longitudinal.....	164
Figura AV 55.2 - Modelo de secção para viga PEBA100_2,4F.....	164
Figura AV 55.3 - Comportamento dos materiais.....	164
Figura AV 55.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBA100_2,4F.....	165
Figura AV 55.5 - Modo de deformada para a força Fu.....	165
Figura AV 55.6 - Perfil IPE100 para a força Fu.....	166
Figura AV 55.7 - Aço de reforço para a força Fu.....	166
Figura AV 55.8 - Betão C20/25 para a força Fu.....	166
Figura AV 56.1 - Esquema longitudinal.....	167
Figura AV 56.2 - Modelo de secção para viga PEBA100_3,9F.....	167
Figura AV 56.3 - Comportamento dos materiais.....	167
Figura AV 56.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBA100_3,9F.....	168
Figura AV 56.5 - Modo de deformada para a força Fu.....	168
Figura AV 56.6 - Perfil IPE100 para a força Fu.....	169
Figura AV 56.7 - Aço de reforço para a força Fu.....	169
Figura AV 56.8 - Betão C20/25 para a força Fu.....	169
Figura AV 57.1 - Esquema longitudinal.....	170
Figura AV 57.2 - Modelo de secção para viga PEBA100_5,4F.....	170
Figura AV 57.3 - Comportamento dos materiais.....	170
Figura AV 57.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBA100_5,4F.....	171
Figura AV 57.5 - Modo de deformada para a força Fu.....	171
Figura AV 57.6 - Perfil IPE100 para a força Fu.....	172
Figura AV 57.7 - Aço de reforço para a força Fu.....	172
Figura AV 57.8 - Betão C20/25 para a força Fu.....	172
Figura AV 58.1 - Esquema longitudinal.....	173
Figura AV 58.2 - Modelo de secção para viga PEBA200_2,4F.....	173

Figura AV 58.3 - Comportamento dos materiais.....	173
Figura AV 58.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBA200_2,4F.....	174
Figura AV 58.5 - Modo de deformada para a força Fu.....	174
Figura AV 58.6 - Perfil IPE200 para a força Fu.....	175
Figura AV 58.7 - Aço de reforço para a força Fu.....	175
Figura AV 58.8 - Betão C20/25 para a força Fu.....	175
Figura AV 59.1 - Esquema longitudinal.....	176
Figura AV 59.2 - Modelo de secção para viga PEBA200_3,9F.....	176
Figura AV 59.3 - Comportamento dos materiais.....	176
Figura AV 59.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBA200_3,9F.....	177
Figura AV 59.5 - Modo de deformada para a força Fu.....	177
Figura AV 59.6 - Perfil IPE200 para a força Fu.....	178
Figura AV 59.7 - Aço de reforço para a força Fu.....	178
Figura AV 59.8 - Betão C20/25 para a força Fu.....	178
Figura AV 60.1 - Esquema longitudinal.....	179
Figura AV 60.2 - Modelo de secção para viga PEBA200_5,4F.....	179
Figura AV 60.3 - Comportamento dos materiais.....	179
Figura AV 60.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBA200_5,4F.....	180
Figura AV 60.5 - Modo de deformada para a força Fu.....	180
Figura AV 60.6 - Perfil IPE200 para a força Fu.....	181
Figura AV 60.7 - Aço de reforço para a força Fu.....	181
Figura AV 60.8 - Betão C20/25 para a força Fu.....	181
Figura AV 61.1 - Esquema longitudinal.....	182
Figura AV 61.2 - Modelo de secção para viga PEBA300_2,4F.....	182
Figura AV 61.3 - Comportamento dos materiais.....	182
Figura AV 61.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBA300_2,4F.....	183
Figura AV 61.5 - Modo de deformada para a força Fu.....	183
Figura AV 61.6 - Perfil IPE300 para a força Fu.....	184
Figura AV 61.7 - Aço de reforço para a força Fu.....	184
Figura AV 61.8 - Betão C20/25 para a força Fu.....	184
Figura AV 62.1 - Esquema longitudinal.....	185
Figura AV 62.2 - Modelo de secção para viga PEBA300_3,9F.....	185
Figura AV 62.3 - Comportamento dos materiais.....	185
Figura AV 62.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBA300_3,9F.....	186
Figura AV 62.5 - Modo de deformada para a força Fu.....	186
Figura AV 62.6 - Perfil IPE300 para a força Fu.....	187
Figura AV 62.7 - Aço de reforço para a força Fu.....	187
Figura AV 62.8 - Betão C20/25 para a força Fu.....	187
Figura AV 63.1 - Esquema longitudinal.....	188
Figura AV 63.2 - Modelo de secção para viga PEBA300_5,4F.....	188
Figura AV 63.3 - Comportamento dos materiais.....	188
Figura AV 63.4 Comportamento força-deslocamento da viga PEBA300_5,4F.....	189
Figura AV 63.5 - Modo de deformada para a força Fu.....	189
Figura AV 63.6 - Perfil IPE300 para a força Fu.....	190
Figura AV 63.7 - Aço de reforço para a força Fu.....	190
Figura AV 63.8 - Betão C20/25 para a força Fu.....	190
Figura AV 64.1 - Esquema longitudinal.....	191
Figura AV 64.2 - Modelo de secção para viga PEBB100_2,4F.....	191
Figura AV 64.3 - Comportamento dos materiais.....	191

Figura AV 64.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBB100_2,4F.....	192
Figura AV 64.5 - Modo de deformada para a força F_u	192
Figura AV 64.6 - Perfil IPE100 para a força F_u	193
Figura AV 64.7 - Aço de reforço para a força F_u	193
Figura AV 64.8 - Betão C20/25 para a força F_u	193
Figura AV 65.1 - Esquema longitudinal.....	194
Figura AV 65.2 - Modelo de secção para viga PEBB100_3,9F.....	194
Figura AV 65.3 - Comportamento dos materiais.....	194
Figura AV 65.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBB100_3,9F.....	195
Figura AV 65.5 - Modo de deformada para a força F_u	195
Figura AV 65.6 - Perfil IPE100 para a força F_u	196
Figura AV 65.7 - Aço de reforço para a força F_u	196
Figura AV 65.8 - Betão C20/25 para a força F_u	196
Figura AV 66.1 - Esquema longitudinal.....	197
Figura AV 66.2 - Modelo de secção para viga PEBB100_5,4F.....	197
Figura AV 66.3 - Comportamento dos materiais.....	197
Figura AV 66.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBB100_5,4F.....	198
Figura AV 66.5 - Modo de deformada para a força F_u	198
Figura AV 66.6 - Perfil IPE100 para a força F_u	199
Figura AV 66.7 - Aço de reforço para a força F_u	199
Figura AV 66.8 - Betão C20/25 para a força F_u	199
Figura AV 67.1 - Esquema longitudinal.....	200
Figura AV 67.2 - Modelo de secção para viga PEBB200_2,4F.....	200
Figura AV 67.3 - Comportamento dos materiais.....	200
Figura AV 67.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBB200_2,4F.....	201
Figura AV 67.5 - Modo de deformada para a força F_u	201
Figura AV 67.6 - Perfil IPE200 para a força F_u	202
Figura AV 67.7 - Aço de reforço para a força F_u	202
Figura AV 67.8 - Betão C20/25 para a força F_u	202
Figura AV 68.1 - Esquema longitudinal.....	203
Figura AV 68.2 - Modelo de secção para viga PEBB200_3,9F.....	203
Figura AV 68.3 - Comportamento dos materiais.....	203
Figura AV 68.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBB200_3,9F.....	204
Figura AV 68.5 - Modo de deformada para a força F_u	204
Figura AV 68.6 - Perfil IPE200 para a força F_u	205
Figura AV 68.7 - Aço de reforço para a força F_u	205
Figura AV 68.8 - Betão C20/25 para a força F_u	205
Figura AV 69.1 - Esquema longitudinal.....	206
Figura AV 69.2 - Modelo de secção para viga PEBB200_5,4F.....	206
Figura AV 69.3 - Comportamento dos materiais.....	206
Figura AV 69.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBB200_5,4F.....	207
Figura AV 69.5 - Modo de deformada para a força F_u	207
Figura AV 69.6 - Perfil IPE200 para a força F_u	208
Figura AV 69.7 - Aço de reforço para a força F_u	208
Figura AV 69.8 - Betão C20/25 para a força F_u	208
Figura AV 70.1 - Esquema longitudinal.....	209
Figura AV 70.2 - Modelo de secção para viga PEBB300_2,4F.....	209
Figura AV 70.3 - Comportamento dos materiais.....	209
Figura AV 70.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBB300_2,4F.....	210

Figura AV 70.5 - Modo de deformada para a força F_u	210
Figura AV 70.6 - Perfil IPE300 para a força F_u	211
Figura AV 70.7 - Aço de reforço para a força F_u	211
Figura AV 70.8 - Betão C20/25 para a força F_u	211
Figura AV 71.1 - Esquema longitudinal.....	212
Figura AV 71.2 - Modelo de secção para viga PEBB300_3,9F.....	212
Figura AV 71.3 - Comportamento dos materiais.....	212
Figura AV 71.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBB300_3,9F.....	213
Figura AV 71.5 - Modo de deformada para a força F_u	213
Figura AV 71.6 - Perfil IPE300 para a força F_u	214
Figura AV 71.7 - Aço de reforço para a força F_u	214
Figura AV 71.8 - Betão C20/25 para a força F_u	214
Figura AV 72.1 - Esquema longitudinal.....	215
Figura AV 72.2 - Modelo de secção para viga PEBB300_5,4F.....	215
Figura AV 72.3 - Comportamento dos materiais.....	215
Figura AV 72.4 - Comportamento força-deslocamento da viga PEBB300_5,4F.....	216
Figura AV 72.5 - Modo de deformada para a força F_u	216
Figura AV 72.6 - Perfil IPE300 para a força F_u	217
Figura AV 72.7 - Aço de reforço para a força F_u	217
Figura AV 72.8 - Betão C20/25 para a força F_u	217

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

Letras maiúsculas latinas

A_c	Área da secção transversal de betão à compressão.
A_m/V	Fator de secção.
A_{sw}	Área das armaduras de esforço transversal existente no comprimento s
A_s	Área da secção das armaduras.
$A_{s,min}$	Área da secção mínima das armaduras.
$A_{s,máx}$	Área da secção máxima das armaduras.
$A_{sw,máx}$	Área efetiva máxima da secção das armaduras de esforço transversal.
C_1 e C_2	Fatores que dependem do tipo de carregamento e das restrições nas extremidades.
E	Valor característico do módulo de elasticidade.
E_a	Valor característico do módulo de elasticidade de aço estrutural a 20°C.
E_{cm}	Módulo de elasticidade secante do betão.
$E_{c,sec\theta}$	Valor característico para a secante do módulo de elasticidade de betão ao fogo dado por $f_{c,\theta}/\varepsilon_{cu,\theta}$.
$(EI)_{fi,c,z}$	Esbelteza da secção do betão em torno do eixo z exposto ao fogo.
$(EI)_{fi,eff,z}$	Esbelteza efetiva da secção em torno do eixo z exposta ao fogo.
$(EI)_{fi,f,z}$	Esbelteza dos banzos do perfil metálico em torno do eixo z exposto ao fogo.
$(EI)_{fi,w,z}$	Esbelteza da alma do perfil metálico em torno do eixo z exposto ao fogo.
$(EI)_{fi,s,z}$	Esbelteza da secção das armaduras em torno do eixo z exposto ao fogo.
E_s	Valor de cálculo do módulo de elasticidade de aço de uma armadura para betão armado a 20°C.
$E_{s,\theta}$	Valor de cálculo do módulo de elasticidade de aço de uma armadura para betão armado à temperatura θ_s .
$F_{l/20}$	Representa o limite da força correspondente a um deslocamento transversal igual e $L/20$.
$F_{l/30}$	Representa o limite da força correspondente a um deslocamento transversal igual e $L/30$.
F_p	Representa o limite da relação linear entre a força e o deslocamento transversal.
F_y	Representa o limite que resulta do método de intersecção entre duas tangentes desenhadas pela parte linear e não linear do deslocamento transversal.
F_u	Representa o limite da força última, correspondente ao valor máximo da capacidade resistente para uma assintota vertical do deslocamento lateral.

G_a	Módulo de distorção.
H_t	Fator.
I_y	Momento de inercia relativo ao eixo y-y.
I_t	Constante de torção.
I_{ta}	Constante de torção de perfis metálicos.
I_{tc}	Constante de torção da secção de betão.
$(I_{tc,red})$	O valor equivalente em aço da constante de torção.
I_w	Constante de empenamento.
I_z	Momento de inercia relativo ao eixo z-z.
I_{za}	Momento de inercia de perfis metálicos relativo ao eixo z-z.
I_{zc}	Momento de 2ª ordem do betão.
$(I_{zc,red})$	Momento de 2ª ordem equivalente em aço do betão.
L	Comprimento de referência.
LTB	Encurvadura lateral torsional.
$[M]$	Matriz da massa do elemento.
$M_{b,Rd}$	Valor de cálculo do momento fletor resistente à encurvadura lateral torsional.
$M_{b,fi,t,Rd}$	Valor de cálculo do momento fletor resistente à encurvadura lateral torsional, no tempo t de exposição ao fogo.
M_{cr}	Momento crítico elástico de encurvadura lateral.
$M_{cr,\theta}$	Momento crítico elástico de encurvadura lateral, a temperaturas elevadas.
$M_{fi,t,Rd}$	Momento fletor resistente de cálculo no tempo t de exposição ao fogo.
M_{pl}	Momento plástico.
$N_{fi,pl,Rd}$	Valor de cálculo do esforço normal resistente plástico da secção exposta ao fogo.
PEB	Vigas parcialmente embebidas com betão.
PEBA	Vigas parcialmente embebidas com betão, com estribos soldados à alma.
PEBB	Vigas parcialmente embebidas com betão, com estribos soldados aos banzos.
PEBA100	Vigas parcialmente embebidas com betão constituídas por perfis IPE100, com estribos soldados à alma.
PEBA200	Vigas parcialmente embebidas com betão constituídas por perfis IPE200, com estribos soldados à alma.
PEBA300	Vigas parcialmente embebidas com betão constituídas por perfis IPE300, com estribos soldados à alma.
PEBB100	Vigas parcialmente embebidas com betão constituídas por perfis IPE100, com estribos soldados aos banzos.
PEBB200	Vigas parcialmente embebidas com betão constituídas por perfis IPE200, com estribos soldados aos banzos.
PEBB300	Vigas parcialmente embebidas com betão constituídas por perfis IPE300, com estribos soldados aos banzos.

$[K]$	Matriz de rigidez do elemento.
$[S]$	Matriz de rigidez geométrica do elemento.
$S_{1,máx}$	Espaçamento longitudinal máximo entre armaduras de esforço transversal.
$S_{t,máx}$	Espaçamento transversal máximo entre ramos de estribos.
$W_{el,y}$	Módulo de flexão elástico da secção transversal relativo ao eixo y-y.
$W_{el,z}$	Módulo de flexão elástico da secção transversal relativo ao eixo z-z.
W_{pl}	Módulo de flexão plástico da secção transversal.
$W_{pl,y}$	Módulo de flexão plástico da secção transversal relativo ao eixo y-y.
$W_{pl,z}$	Módulo de flexão plástico da secção transversal relativo ao eixo z-z.
X_g	Distancia ao centro geométrico da secção referente ao eixo x-x.
Y_g	Distancia ao centro geométrico da secção referente ao eixo y-y.

Letras minúsculas latinas

b	Largura total de uma da secção transversal.
b_t	Largura média da zona tracionada.
b_w	Largura da alma do elemento.
$b_{c,fi}$	Parâmetro de redução de espessura de betão em uma secção transversal de elementos parcialmente embebidos em betão exposto ao fogo.
$b_{c,fi,horizontal}$	Distâncias entre os nós pertencentes à isotérmica de 500°C e o exterior da secção.
$b_{c,fi,vertical}$	Distâncias entre os nós pertencentes à isotérmica de 500°C e a extremidade interior dos banzos.
c_a	Calor específico.
c_{min}	Recobrimento mínimo.
$c_{min,b}$	Recobrimento mínimo para os requisitos de aderência.
$c_{min,dur}$	Recobrimento mínimo relativo as condições ambientais.
$c_p(\theta)$	Calor específico do betão a temperatura θ .
e_{pl}	Posição do eixo neutro plástico.
e_r	Representa a excentricidade do varão de reforço em relação ao centro geométrico da secção.
f	Fator de correção de χ_{LT} .
f_{cd}	Valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão.
f_{cm}	Valor médio da tensão de rotura do betão à compressão.
f_{sk}	Valor característico da tensão de rotura do aço das armaduras para betão armado para uma extensão específica.
f_{ck}	Valor característico da tensão de rotura à compressão do betão aos 28 dias de idade.
f_{ctm}	Valor médio da tensão de rotura do betão à tração simples.

$f_{ck, cube}$	Valor característico da tensão de rotura à compressão do betão aos 28 dias de idade, para provetes cúbicos.
$f_{ck, t(\theta)}$	Valor característico da tensão de rotura do betão à tração à temperatura θ para uma extensão específica.
$f_{c\theta}$	Valor da tensão de rotura do betão à tração à temperatura θ para uma extensão específica.
f_y	Valor da tensão de cedência à tração do aço das armaduras para betão armado.
f_{yk}	Valor característico da tensão de cedência à tração do aço das armaduras para betão armado.
f_{ywd}	Valor de cálculo da tensão de cedência das armaduras de esforço transversal.
$f_{sp, \theta}$	Tensão limite de proporcionalidade do aço de reforço à temperatura θ .
$f_{sy, \theta}$	Tensão de cedência do aço de reforço à temperatura θ .
f_{sk}	Tensão de cedência característica do aço do reforço.
f_u	Tensão última.
h	Altura total de uma secção transversal.
h_1	Altura entre banzos.
\dot{h}_{net}	Valor de cálculo do fluxo de calor por unidade de área.
$\dot{h}_{net, c}$	Valor de cálculo do fluxo de calor por unidade de área, por convecção.
$\dot{h}_{net, d}$	Valor de cálculo do fluxo de calor por unidade de área, por convecção e radiação.
$\dot{h}_{net, r}$	Valor de cálculo do fluxo de calor por unidade de área, por radiação.
$h_{w, fi}$	Redução de altura da alma do perfil metálico de elementos parcialmente embebidos em betão expostos ao fogo.
i_y	Raio de giração relativo ao eixo y, determinado com base nas propriedades da secção transversal bruta.
i_z	Raio de giração relativo ao eixo z, determinado com base nas propriedades da secção transversal bruta.
k	Coefficiente, fator.
k_t	Coefficiente empírico.
$k_{E, \theta}$	Fator de redução para a inclinação da reta que representa o domínio elástico à temperatura do aço θ_a atingida no instante t.
$k_{Es, \theta}$	Fator de redução para módulo de elasticidade do aço de reforço à temperatura θ_s .
$k_{c\theta}$	Fator de redução das propriedades mecânicas do betão.
$k_{c, t(\theta)}$	Fator de redução da resistência à tração do betão, à temperatura θ_c atingida no instante t.
$k_{p, \theta}$	Fator de redução para a tensão limite de proporcionalidade, à temperatura θ .
$k_{y, \theta}$	Fator de redução para a tensão de cedência do aço à temperatura θ_a atingida no instante t.

$k_{y,\theta,parcial}$	Fator de redução para a tensão de cedência do aço residual à temperatura θ_a atingida no instante t.
$k_{sy,\theta}$	Fator de redução para a tensão de cedência efetiva do aço de reforço à temperatura θ_s .
k_w	Fator para o empenamento das extremidades.
k_z	Fator para a rotação no plano análoga a fração L_{cr}/L .
l	Comprimento da viga entre apoios com restrição lateral.
r	Raio.
s	Espaçamento das armaduras de esforço transversal, medido ao longo do eixo longitudinal do elemento.
t	Tempo de exposição ao fogo.
t_f	Espessura do banzo.
$t_{fi,d}$	Valor de cálculo da resistência ao fogo.
$t_{fi,requ}$	Resistência ao fogo requerida regularmente.
t_w	Espessura da alma.
u	Média geométrica entre as distâncias u_1 e u_2 .
u_1 u_2	Distância mais curta entre o centro do aço de reforço e face interior do banzo ou a extremidade mais próxima de betão.
z	Braço da área infinitesimal relativamente ao CG da secção.
z_a	Coordenada do ponto de aplicação da carga em relação ao eixo geométrico da secção.
z_g	$z_g = z_a - z_s $, z_g é negativo para carregamento aplicado acima do centro de corte e positivo caso contrário.
z_s	Coordenada do centro de corte em relação ao eixo geométrico da secção.

Letras maiúsculas gregas

$\nabla \theta$	$\nabla \theta = \begin{Bmatrix} d_\theta/d_x \\ d_\theta/d_y \\ d_\theta/d_z \end{Bmatrix}$
Δc_{dev}	Margem de cálculo para as tolerâncias de execução.
$\Delta c_{dur,y}$	Margem de segurança.
$\Delta c_{dur,st}$	Redução do recobrimento mínimo no caso de utilização de aço inoxidável.
$\Delta c_{dur,add}$	Redução do recobrimento mínimo no caso de proteção adicional.
ϕ	Fator de forma.
ϕ_{LT}	Valor para determinar o coeficiente de redução χ_{LT} .
$\phi_{LT,\theta,com}$	Valor para determinar o coeficiente de redução χ_{LT} à temperatura θ .
Ψ_i	Vetor próprio dos deslocamentos.

Letras minúsculas gregas

α	Fator da constante de torção.
α_c	Coefficiente de transferência de calor por convecção.
α_{cw}	Coefficiente que tem em consideração o estado de tensão de compressão.
β	Parâmetro para tomar em consideração o efeito de flexão desviada.
ε_y	Extensão de cedência.
ε_u	Extensão última do betão à compressão.
ε_{cl}	Extensão do betão à compressão correspondente à tensão máxima.
$\varepsilon_{cu1,\theta}$	Extensão última do betão à compressão à temperatura θ_c .
$\varepsilon_{cl,\theta}$	Valor da deformação correspondente ao valor máximo da resistência à temperatura.
$\varepsilon_{cu1,\theta}$	Valor da deformação máxima à compressão à temperatura θ_c .
ε_f	Emissividade do fogo.
ε_m	Emissividade da superfície do elemento.
ε_{uk}	Deformação unitária característica.
$\eta_{fi,t}$	Amplitude de carregamento para o cálculo de resistência ao fogo.
θ_a	Temperatura do aço estrutural [°C].
θ_c	Temperatura do betão [°C].
θ_s	Temperatura do aço de reforço [°C].
θ_g	Temperatura do gás na vizinhança do elemento exposto ao fogo.
θ_r	Temperatura de radiação efetiva do ambiente de incêndio.
θ_d	Valor de cálculo da temperatura do elemento.
$\theta_{cr,d}$	Valor de cálculo da temperatura crítica do elemento.
θ_m	Temperatura da superfície do elemento exposto ao fogo.
$\theta_{c,t}$	Temperatura média no betão ao tempo t.
$\theta_{f,c}$	Temperatura média nos banzos.
$\theta_{0,t}$	Valor de referência da temperatura para um determinado período de exposição à ação do fogo.
λ_a	Condutividade térmica do aço.
λ_i	Valor próprio.
λ_c	Condutividade térmica do betão em função da temperatura.
$\lambda_{(\theta)}$	Condutividade térmica.
$\bar{\lambda}_{LT}$	Esbelteza relativa para a encurvadura lateral torsional.
$\lambda_{LT,0}$	Comprimento do patamar das curvas de dimensionamento à encurvadura lateral de vigas constituídas por perfis laminados e soldados equivalentes.
$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	Esbelteza relativa para a encurvadura lateral torsional à temperatura θ .
ν	Coefficiente de Poisson em regime elástico.

ν_1	Coefficiente de redução da resistência do betão fendilhado por esforço transversal.
$\rho(\theta)$	Massa volúmica a massa específica.
ρ_w	Taxa de armadura de esforço transversal.
$\rho_{w,min}$	Taxa de armadura mínima de esforço transversal.
σ	Constante de Stephan Boltzmann.
σ_x	Tensão principal na direção x.
$\{\varphi_i\}$	Vetor próprio.
χ_{LT}	Fator de redução para a encurvadura lateral torsional.
$\chi_{LT,mod}$	Coefficiente de redução modificado para a encurvadura lateral.
$\chi_{LT,fi}$	Fator de redução para a encurvadura lateral torsional de secções expostas ao fogo.
$\chi_{LT,fi,mod}$	Coefficiente de redução modificado para a encurvadura lateral de secções expostas ao fogo.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Vigas parcialmente embebidas em betão

As vigas parcialmente embebidas com betão, são elementos que podem ser constituídos por perfis metálicos de secção I e H ou por elementos em chapa soldada, revestidos com betão entre os banzos. As secções podem ser reforçadas com estribos e varões de aço ou pernos de ligação. A aplicação dos estribos pode ser pela ligação ou por soldadura à alma ou ao banzo.

A secção mista deve funcionar em conjunto, de forma a tirar o máximo partido da capacidade resistente dos materiais. Os estribos posicionados ao longo da viga têm como finalidade aumentar a resistência ao corte, servindo também para confinar o betão. A solução mista permite o aumento da rigidez à flexão e torção, sem aumento da dimensão da secção. O betão reforçado é responsável pelo aumento da resistência ao fogo das secções parcialmente embebidas em betão (PEB), em comparação com a secção metálica isolada.

Neste estudo foram realizados 24 simulações bidimensionais a secções parcialmente embebidas em betão, sendo que 14 foram elaboradas com perfis HEB e 10 com perfis IPE. Foram ainda realizadas 101 simulações tridimensionais: 27 simulações lineares elásticas, de 3 horas de duração média, para definir a malha de elementos finitos a utilizar, o momento crítico e a imperfeição geométrica das vigas; 74 simulações inelásticas não lineares, cada uma com duração média de 2,5 dias gerando 80 GB de dados em média, para determinação da resistência à encurvadura lateral torsional. No total foram gerados 8,2 TB de dados considerados adequados para análise. O processamento foi realizado em quatro máquinas virtuais de 16 Gb de memória RAM, com a capacidade de processamento e armazenamento de 1 TB cada, com extensão de 10 TB em um espaço virtual. No estudo foram consideradas duas alternativas de colocação dos estribos: em forma de “C” soldados à alma e em forma de “I” soldadas nos banzos. Consideraram-se ainda 3 secções retas de perfis: PEB100, PEB200 e PEB300; assim como 3 comprimentos diferentes: 2,4, 3,9 e 5,4 metros.

1.2. Objetivos do estudo

O objetivo do estudo é realizar simulações para avaliar o comportamento de elementos parcialmente embebidos em betão (PEB) à flexão em condições de incêndio.

O estudo foi efetuado com grande variedade de secções (diferentes valores de massividade) e teve como objetivo a utilização do método das 4 componentes das secções e posterior comparação com o método simplificado de cálculo proposto na norma EN1994-1-2 [1].

Propõem-se ainda estudar vigas parcialmente embebidas com betão (PEB); com secções baseadas em perfis IPE100, IPE200 e IPE300, com estribos soldados à alma PEBA e ao banzo PEBB. Propõem-se realizar a verificação da resistência a flexão para os comprimentos de viga de 2.4, 3,9 e 5.4 metros e para os níveis de temperatura de 20°C, 200°C, 400°C e 600°C. Foram considerados dois tipos de carregamento: cargas uniformemente distribuídas e carga concentrada a meio vão.

Para a primeira parte do estudo foi utilizado um modelo de elementos finitos bidimensional para a solução de equações de energia com um método de solução incremental (tempo) e iterativo.

Para a segunda parte do estudo, foi utilizado um modelo de elementos finitos tridimensional para a solução de equações de equilíbrio estático, utilizando um método de solução incremental (carga) e iterativo.

A determinação da resistência à encurvadura lateral será realizada refinando a malha do modelo numérico.

1.3. Motivação para o estudo

Os elementos de viga parcialmente embebidos com betão (PEB) são elementos dos quais se desconhecem algumas características resistentes. Estes elementos são consideravelmente mais resistentes que as vigas metálicas simples e com secções mais reduzidas do que vigas em betão armado. Um dos pontos fracos tem a ver com o comportamento ao fogo, pelo que existe uma necessidade e interesse em definir o seu comportamento nestas condições. Os resultados de este estudo visam a formulação de

novas propostas de modelos de cálculo simplificados e a validação dos modelos numéricos.

1.4. Organização da tese

No capítulo 2 são apresentadas as propriedades mecânicas e térmicas dos materiais que compõem os elementos parcialmente embebidos em betão. No capítulo 3 é caracterizada a ação do fogo em elementos de estruturas. No capítulo 4 é efetuado um estudo do comportamento de secções transversais de elementos parcialmente embebidos com betão, sujeitos à ação do fogo pelos quatro lados e efetuado um estudo do método da soma pesada das 4 componentes, referido na EN1994-1-2, para determinação da capacidade resistente da secção por compressão e da capacidade de rigidez à flexão em torno do eixo mais fraco. No capítulo 5 é avaliada a capacidade resistente deste elemento à flexão, através do cálculo do momento plástico da secção, momento crítico e momento resistente de encurvadura lateral torsional. No capítulo 6 é feita a caracterização do modelo numérico tridimensional. No capítulo 7 é apresentado o método avançado de cálculo para estudo da estabilidade linear elástica, com a determinação dos modos de instabilidade, carga crítica e imperfeição geométrica. É também apresentada a determinação do cálculo da resistência dos elementos à flexão, através de simulação não linear geométrica e material, para determinar a resistência última $M_{b,Rd}$. É ainda efetuada a comparação dos resultados com o modelo simplificado de cálculo do Eurocódigo. No capítulo 8 são apresentadas as principais conclusões e as propostas de trabalhos futuros.

1.5. ESTADO DA ARTE

Em 1993, Kindmann et al. [2], demonstraram a importância do reforço do betão armado no momento resistente à flexão. Esta investigação permitiu a adaptação de novas regras de projeto da pré-norma do Eurocódigo 4 para este tipo de elemento, incluindo o efeito do reforço do betão na capacidade resistente e na determinação do deslocamento associado.

Em 1994 Hunaiti e Fattah [3] concluíram que os pilares parcialmente embebidos com betão e carga axial excêntrica constante mantiveram um comportamento misto e resistência semelhante, independentemente da quantidade de reforço utilizado.

Em 1994, Hosser et al. [4], desenvolveram um modelo de cálculo para determinar a largura efetiva da laje de vigas mistas, concluindo que a largura dependia do reforço ao corte transversal.

Em 1995, Plumier et al. [5], concluíram que o comportamento dos elementos não dependia do tipo de ligação (soldada, aparafusada) nem da dimensão da espessura da alma. A presença do betão condicionou o modo de instabilidade dos banzos dos elementos de viga.

Em 2000, Lindner and Budassis [6] apresentaram uma nova proposta de dimensionamento do elemento à encurvadura lateral torsional, tendo em consideração a rigidez à torção do betão.

Em 2002, Maquoi et al. [7], apresentam um estudo sobre a resistência à encurvadura lateral destes elementos de viga parcialmente embebidos, apresentando novas propostas para o dimensionamento à flexão. O momento crítico e o momento resistente à encurvadura lateral torsional foram revistos e melhorados.

Em 2002, Assi et al. [8], apresentam um estudo teórico e experimental sobre a capacidade resistente última de elementos de viga parcialmente embebidos com betão, concluindo que a utilização de betão de densidade normal proporciona valores de resistência à flexão pouco superiores quando comparado com a utilização de betão leve.

Em 2004, Kodaira et al. [9], demonstraram que o reforço é eficiente no aumento da resistência ao fogo. Os ensaios foram parcialmente validados com simulação numérica.

Em 2004 Vila Real, et al [10] apresentam um estudo para melhorar a proposta do EC3 sobre a encurvadura lateral torsional de vigas de aço simples, submetidas ao fogo, comparando o método simplificado apresentado na pré norma com os resultados de simulação numérica para diferentes tipos de carregamentos.

Em 2006, Brent Pricket e Robert Driver [11] elaboraram um projeto de investigação para estudar o comportamento de colunas parcialmente embebidas com betão normal e betão de alto desempenho. Concluíram que nas colunas com betão de alto desempenho a rotura deu-se de maneira súbita em comparação com as colunas com betão normal. Nas colunas com betão de alto desempenho reforçado com fibras de aço, o comportamento na rotura foi mais dúctil, influência da introdução das fibras de aço. Concluíram ainda que quando ocorreu flexão em torno do eixo mais forte, atingiram-se as tensões últimas no

aço e enquanto submetidas à flexão em torno do eixo fraco, atingiram-se as tensões últimas no betão. Este comportamento é justificado pelo confinamento das fibras betão pelos banzos do perfil, quando submetida à flexão em torno do eixo mais forte.

Em 2008, Elghazouli and Treadway [12], apresentam um estudo sobre a influência do endurecimento do aço por deformação, do confinamento do betão e da extensão dos elementos com secção plastificada na capacidade resistente destes elementos.

Em 2008 Márcio Cláudio Viveiros Fernandes [13], fez um estudo na sua tese de mestrado para verificação da resistência ao fogo de estruturas de betão, com base nos métodos simplificados da EN1992-1-2, onde revela ser preferível adotar o método da isotérmica dos 500°C para análises menos detalhadas de vigas e lajes.

Em 2009, Nardin and El Debs [14], confirmam o funcionamento misto deste tipo de secções e o aumento da resistência à flexão.

Em 2011, António Correia e João Paulo C. Rodrigues [15], realizaram ensaios em colunas parcialmente embebidas com betão de classe de resistência C25/30 e com agregados calcários. A temperatura dos elementos foi registada com a colocação de vários termopares em diferentes secções.

Em 2011 E. G. Choi, Y. S. Shin [16], realizaram um estudo sobre o comportamento estrutural e sobre análises térmicas simplificadas de betão normal e de alta resistência em vigas submetidas ao fogo. Concluíram que era importante utilizar métodos de fabrico de betão por forma a evitar o “spalling”, tais como a adição de fibras de polipropileno.

Em 2012 Cajot Louis-Guy, Gallois Louis, Debruyckere Rik, Franssen Jean-Marc [17], fizeram uma investigação a métodos simplificados de cálculo para vigas integradas com lajes esbeltas expostas ao fogo. Apresentam regras simples para determinar campos de temperatura no banzo inferior, alma e aço de reforço das vigas. Para a apresentação do novo método basearam-se no Eurocódigo 4, com exceção da determinação da temperatura do banzo inferior, para a qual deduziram uma nova formulação paramétrica.

Em 2013, Paulo A.G. Piloto, Ana B. R. Gavilan, Marco Zipponi, Alberto Marini, Luís M. R. Mesquita, Giovanni Plizzari [18]; realizaram uma investigação experimental de vigas parcialmente embebidas em betão, para testar a sua resistência ao fogo e verificaram que as vigas cedem por encurvadura lateral torsional. Os resultados demonstraram a dependência da resistência em relação ao nível de carga. Foram ainda apresentados resultados de temperatura crítica para os diferentes tipos de materiais.

2. PROPRIEDADE DOS MATERIAIS

2.1. Propriedades mecânicas

2.1.1. Aço dos perfis metálicos

A resistência nominal do aço dos perfis é caracterizada nas normas europeias Eurocódigo EN1993-1-1 [19], para a temperatura ambiente e Eurocódigo EN1993-1-2 [20] para a ação do fogo. Os valores das tensões de cedência e últimas f_y e f_u podem ser determinadas neste documento. Em condições normais o aço S275, com espessura inferior a 40mm, possui as seguintes propriedades nominais $f_y = 275 \text{ MPa}$ e $f_u = 430 \text{ MPa}$. O módulo de elasticidade, E_a , é de 210 GPa, o módulo de elasticidade transversal, G_a , é de 81 GPa e o coeficiente de Poisson ν é 0,3.

Para ter em conta o efeito das altas temperaturas nas propriedades mecânicas do aço são definidos fatores de redução, EN 1993-1-2 [20]. Os fatores de redução para a tensão limite de proporcionalidade $k_{p,\theta}$, para a tensão de cedência efetiva $k_{y,\theta}$ e para a inclinação da reta que representa o domínio elástico $k_{E,\theta}$ são fornecidos na tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Fatores de redução para a relação tensões-extensões de aço carbono a temperaturas elevadas

Temperatura do aço θ_a [$^{\circ}\text{C}$]	Fatores de redução a temperatura θ_a referidos ao valor de f_y ou E_a a 20 $^{\circ}\text{C}$		
	$k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	$k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$	$k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$
20	1,000	1,000	1,000
100	1,000	1,000	1,000
200	1,000	0,807	0,900
300	1,000	0,613	0,800
400	1,000	0,420	0,700
500	0,780	0,360	0,600
600	0,470	0,180	0,310
700	0,230	0,075	0,130
800	0,110	0,050	0,090
900	0,060	0,0375	0,0675
1000	0,040	0,0250	0,0450
1100	0,020	0,0125	0,0225
1200	0,000	0,0000	0,0000

Nota: Para os valores intermédios da temperatura do aço, poderá efetuar-se uma interpolação linear.

2.1.2. Aço de reforço

As características do aço das armaduras para betão armado estão descritas no Eurocódigo EN 1992-1-1 [21]. O aço S500 NR, classe B apresenta as propriedades descritas na tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Características mecânicas do aço S500.

E_s [GPa]	f_{yk} [MPa]	f_{uk} [MPa]	G [GPa]	k	ν
210	500	540	81	1,08	0,3

Quando sujeito a altas temperaturas o Eurocódigo EN 1992-1-2 [22], define fatores de redução das propriedades mecânicas. O valor da tensão de cedência $f_{sy,\theta}$, o valor da tensão limite de proporcionalidade $f_{sp,\theta}$ e o valor do módulo de elasticidade $E_{s,\theta}$ variam com a temperatura, em relação com o seu valor à temperatura ambiente, como pode ser observado na tabela 2.3, onde estão representados os fatores de redução para a tensão de cedência efetiva, $k_{sy,\theta}$ e para o módulo de elasticidade, $k_{Es,\theta}$.

Tabela 2.3 - Coeficientes de redução das propriedades mecânicas do aço laminado a quente para betão armado a temperaturas elevadas

Fatores de redução a temperatura θ_s referidos aos valores de f_y e E_s a 20 °C		
Temperatura do aço θ_s [°C]	$k_{sy,\theta} = f_{sy,\theta} / f_y$	$k_{Es,\theta} = E_{s,\theta} / E_s$
20	1,00	1,00
100	1,00	1,00
200	1,00	0,87
300	1,00	0,72
400	0,94	0,56
500	0,67	0,40
600	0,40	0,24
700	0,12	0,08
800	0,11	0,06
900	0,08	0,05
1000	0,05	0,03
1100	0,03	0,02
1200	0,00	0,00

2.1.3. Betão

A resistência do betão, para a temperatura ambiente esta definida no Eurocódigo EN 1992-1-1 [21]. As propriedades do betão C20/25 são as representadas na tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Características mecânicas do betão C20/25.

f_{ck} [MPa]	$f_{ck,cube}$ [MPa]	f_{cm} [MPa]	f_{ctm} [MPa]	E_{cm} [GPa]	ε_{c1} [‰]	ε_{cu1} [‰]
20	25	28	2,2	30	2,0	3,5

O Eurocódigo EN 1992-1-2 [22] define fatores de redução das propriedades mecânicas do betão, para ter em consideração o efeito de altas temperaturas como se pode observar na tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Coeficientes de redução das propriedades mecânicas do betão a temperaturas elevadas.

Temperatura do betão θ [° C]	Agregados siliciosos		
	$f_{c,\theta}/f_{ck}$	$\varepsilon_{c1,\theta}$	$\varepsilon_{cu1,\theta}$
20	1,00	0,0025	0,0200
100	1,00	0,0040	0,0225
200	0,95	0,0055	0,0250
300	0,85	0,0070	0,0275
400	0,75	0,0100	0,0300
500	0,60	0,0150	0,0325
600	0,45	0,0250	0,0350
700	0,30	0,0250	0,0375
800	0,15	0,0250	0,0400
900	0,08	0,0250	0,0425
1000	0,04	0,0250	0,0450
1100	0,01	0,0250	0,0475
1200	0,00	-	-

f_{ck} - Valor característico da resistência à compressão à temperatura ambiente; $f_{c\theta}$ - Valor característico da resistência à compressão a temperatura elevada; $\varepsilon_{c1,\theta}$ - Valor da deformação correspondente ao valor máximo da resistência; $\varepsilon_{cu1,\theta}$ - Valor da deformação máxima à compressão.

A resistência à tração do betão a temperaturas elevadas, $f_{ck,t(\theta)}$, é obtido efetuando uma redução pelo coeficiente $k_{c,t(\theta)}$, segundo a expressão:

$$f_{ck,t(\theta)} = k_{c,t(\theta)} \times f_{ck,t} \quad (1)$$

Em que $k_{c,t(\theta)}$ é obtido através das seguintes expressões:

$$20[^\circ C] \leq \theta \leq 100[^\circ C]:$$

$$k_{c,t(\theta)} = 1,0 \quad (2)$$

$100[^\circ C] < \theta \leq 600[^\circ C]$:

$$k_{c,t(\theta)} = 1,0 - 1,0(\theta - 100)/500 \quad (3)$$

2.1. Propriedades térmicas

2.1.1. Aço

As propriedades térmicas com influência no comportamento do aço em condições de extrema temperatura elevada estão expressas no Eurocódigo EN1993-1-2 [20] são:

O calor específico c_a , devendo ser determinado pelas seguintes expressões.

$20[^\circ C] \leq \theta_a < 600[^\circ C]$:

$$c_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1} \theta_a - 1,69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6} \theta_a^3 \quad [J/k_g K] \quad (4)$$

$600[^\circ C] \leq \theta_a < 735[^\circ C]$:

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \quad [J/k_g K] \quad (5)$$

$735[^\circ C] \leq \theta_a < 900[^\circ C]$:

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \quad [J/k_g K] \quad (6)$$

$900[^\circ C] \leq \theta_a < 1200[^\circ C]$:

$$c_a = 650 \quad [J/k_g K] \quad (7)$$

Em que θ_a representa a temperatura do aço $[^\circ C]$.

A variação do calor específico com a temperatura é representada no gráfico da figura 2.1.

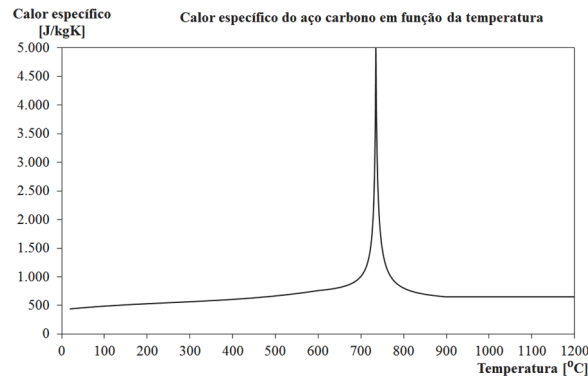


Figura 2.1 - Calor específico do aço carbono, em função da temperatura.

A condutividade térmica do aço λ_a é determinada pelas seguintes expressões:

$20[^\circ C] \leq \theta_a < 800[^\circ C]$:

$$\lambda_a = 54 - 3,33 \times 10^{-2} \theta_a \quad [W/mK] \quad (8)$$

$800[^\circ C] \leq \theta_a \leq 1200[^\circ C]$:

$$\lambda_a = 27,3 \quad [W/mK] \quad (9)$$

Em que θ_a representa a temperatura do aço $[^\circ C]$.

A variação da condutibilidade térmica com a temperatura é representada no gráfico da figura 2.2.

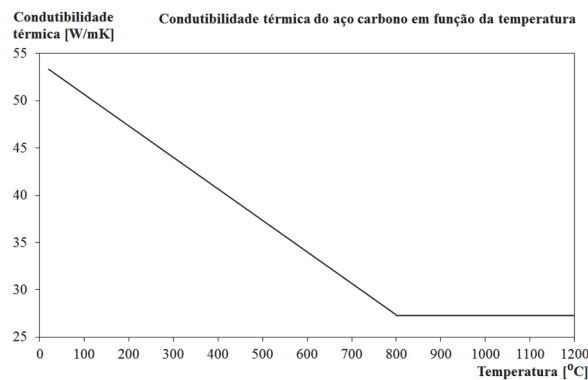


Figura 2.2 - Condutibilidade do aço carbono, em função da temperatura.

2.1.2. Betão

O calor específico do betão $c_p(\theta)$, segundo o Eurocódigo EN 1992-1-2 [22] deve ser determinado para um teor de água ($u = 0\%$) através das seguintes expressões:

$20[^\circ C] \leq \theta \leq 100[^\circ C]$:

$$c_p(\theta) = 900 \text{ [J/k}_g\text{K]} \quad (10)$$

$100[^\circ C] < \theta \leq 200[^\circ C]$:

$$c_p(\theta) = 900 + (\theta - 100) \text{ [J/k}_g\text{K]} \quad (11)$$

$200[^\circ C] < \theta \leq 400[^\circ C]$:

$$c_p(\theta) = 1000 + (\theta - 200)/2 \text{ [J/k}_g\text{K]} \quad (12)$$

$400[^\circ C] < \theta \leq 1200[^\circ C]$:

$$c_p(\theta) = 1100 \text{ [J/k}_g\text{K]} \quad (13)$$

Em que θ representa a temperatura do betão em $[^\circ C]$.

Quando o teor de água é explicitamente considerado no método de cálculo, a função indicada para o calor específico do betão com agregados siliciosos ou calcários poderá ser considerada por um valor constante, $c_{p,peak}$, situado entre $100^\circ C$ e $115^\circ C$ e decrescente linearmente entre $115^\circ C$ e $200^\circ C$, como se pode observar no gráfico da figura 2.3.

$$c_{p,peak} = 900 \text{ [J/k}_g\text{K]} \text{ } u = 0 \text{ [%]} \quad (14)$$

$$c_{p,peak} = 1470 \text{ [J/k}_g\text{K]} \text{ } u = 1,5 \text{ [%]} \quad (15)$$

$$c_{p,peak} = 2020 \text{ [J/k}_g\text{K]} \text{ } u = 3 \text{ [%]} \quad (16)$$

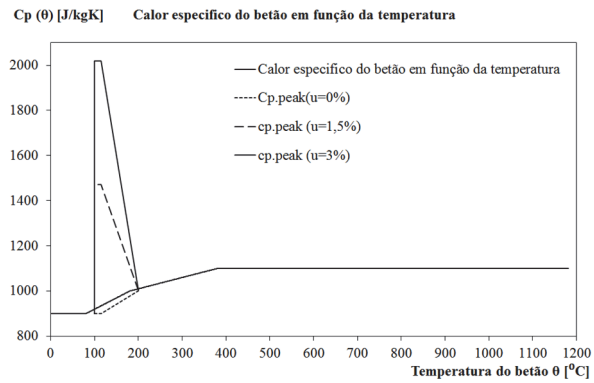


Figura 2.3 - Calor específico do betão, em função da temperatura.

O modelo permite ter em conta o efeito da vaporização das moléculas de água presentes no betão. A massa volúmica do betão varia com a temperatura, sendo influenciada pela perda de água. O Eurocódigo EN 1992-1-2 [22] define a variação através das seguintes expressões:

$20[^\circ C] \leq \theta \leq 115[^\circ C]$:

$$\rho(\theta) = \rho(20^\circ C) \quad (17)$$

$115[^\circ C] < \theta \leq 200[^\circ C]$:

$$\rho(\theta) = \rho(20^\circ C) \times (1 - 0,02 (\theta - 115) / 85) \quad (18)$$

$200[^\circ C] < \theta \leq 400[^\circ C]$:

$$\rho(\theta) = \rho(20^\circ C) \times (0,98 - 0,03 (\theta - 200) / 200) \quad (19)$$

$400[^\circ C] < \theta \leq 1200[^\circ C]$:

$$\rho(\theta) = \rho(20^\circ C) \times (0,95 - 0,07 (\theta - 400) / 800) \quad (20)$$

A variação da massa volúmica com a temperatura está representada na figura 2.4.

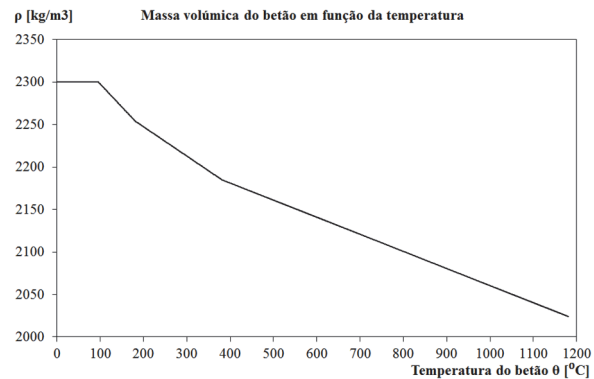


Figura 2.4 - Massa volúmica do betão em função da temperatura.

A condutividade térmica, λ_c segundo o Eurocódigo EN 1992-1-2 [22] faz referência às fórmulas que descrevem os limites, superior e inferior da condutividade térmica do betão em função da temperatura. O limite superior é determinado pela expressão:

$$20[^\circ C] \leq \theta \leq 1200[^\circ C]$$

$$\lambda_c = 2 - 0,2451 (\theta/100) + 0,0107(\theta/100)^2 \quad [W/mK] \quad (21)$$

Em que θ representa a temperatura do betão [°C].

A figura 2.5 representa o limite superior da condutividade térmica do betão.

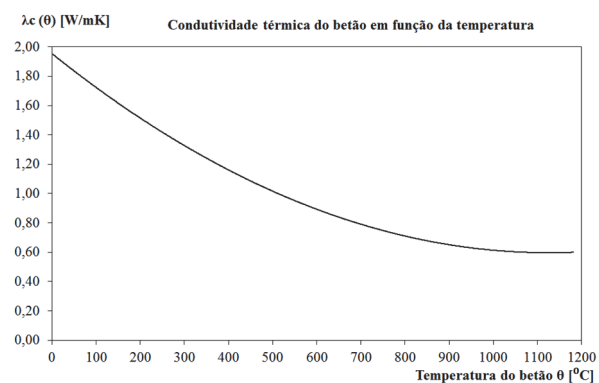


Figura 2.5 – Condutibilidade térmica do betão em função da temperatura.

3. AÇÃO DO FOGO

O fogo resulta de uma rápida oxidação de um material combustível, libertando calor, luz e produtos de reação, tais como água e dióxido de carbono. O Eurocódigo EN 1991-1-2 [22] define a ação do fogo em estruturas. Estas ações sobre estruturas decorrentes da exposição ao fogo são classificadas como ações de acidente. O cálculo estrutural em relação a ação do fogo obriga a aplicação de ações térmicas para análise de temperaturas e a consequente perda de resistência mecânica.

3.1. Ação térmica

As ações térmicas são definidas no Eurocódigo EN 1991-1-2 [22], pelo fluxo de calor efetivo \dot{h}_{net} [W/m^2] na superfície do elemento. Nas superfícies expostas ao fogo deve ser considerada a transferência de calor por convecção e radiação, determinada pela expressão seguinte.

$$\dot{h}_{net,d} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r} \quad [W/m^2] \quad (22)$$

A componente do fluxo de calor por convecção é determinada pela seguinte expressão:

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta_m) \quad [W/m^2] \quad (23)$$

Em que: α_c representa o coeficiente de transferência de calor por convecção em [W/m^2K]; θ_g representa a temperatura do gás na vizinhança do elemento exposto ao fogo em [$^{\circ}C$]; θ_m representa a temperatura da superfície do elemento exposto ao fogo em [$^{\circ}C$]

O valor de coeficiente de convecção α_c deve ser considerado igual a 9, 25 e 50 para os casos de superfície não exposta, superfície exposta com curva ISO834 [23] e superfície exposta com hidrocarbonetos.

A componente do fluxo de calor por radiação é determinada pela seguinte expressão:

$$\dot{h}_{net,r} = \phi \times \varepsilon_f \times \varepsilon_m \times \sigma [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] [W/m^2] \quad (24)$$

Em que: ϕ representa o fator de forma; ε_f é a emissividade do fogo; ε_m é a emissividade da superfície do elemento; σ é a constante de Stephan Boltzmann cujo valor é $5,67 \times 10^{-8} [W/m^2 K^4]$; θ_r é a temperatura de radiação efetiva do ambiente de incêndio em $[^\circ C]$; θ_m é a temperatura da superfície do elemento exposto ao fogo em $[^\circ C]$

No caso do aço e do betão considera-se $\varepsilon_m = 0,7$, o valor da emissividade das chamas $\varepsilon_f = 1,0$. O fator de forma ϕ pode ser tomado igual à unidade, quando não for especificado.

3.1.1. Curva de incêndio natural

A curva de incêndio natural típica possui quatro fases, ver figura 3.1 [24]. A fase inicial ou de ignição, onde se mantém o comportamento com temperaturas baixas, não tem influência no comportamento estrutural dos edifícios. A segunda fase ou de propagação é caracterizada pela propagação do fogo a todo o compartimento por radiação ou contacto direto. Nesta fase dá-se a inflamação súbita dos gases, caracterizado por temperaturas entre $450^\circ C$ e $600^\circ C$. Este fenómeno é conhecido como “flashover”. A partir deste instante as temperaturas sobem rapidamente, dando início à fase de desenvolvimento pleno do incêndio. O material inflamável pode estar em combustão, mantendo constantes as temperaturas. A fase de extinção ou de arrefecimento verifica-se pela diminuição progressiva das temperaturas, quer por falta de combustível ou por intervenção externa.

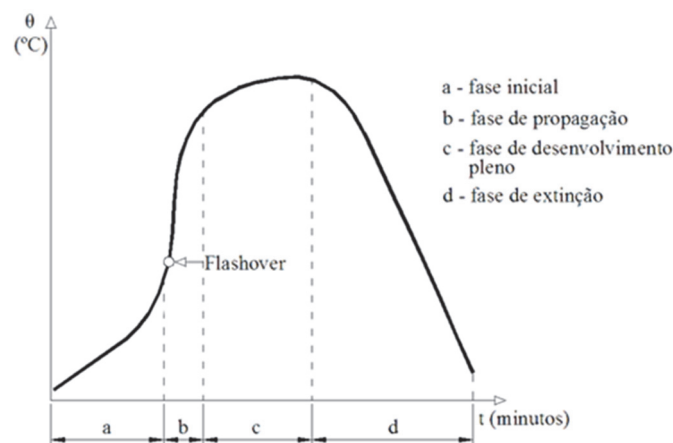


Figura 3.1 – Curva de incêndio natural.

3.1.2. Curva de incêndio padrão

O Eurocódigo EN 1991-1-2 [25] apresenta outras curvas de incêndio. A curva de incêndio padrão, ISO834, a curva de incêndio para elementos exteriores e a curva de incêndio de hidrocarbonetos.

A curva de incêndio padrão, conhecida por curva ISO834 [23] é definida pela seguinte expressão:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (25)$$

Em que θ_g representa a temperatura dos gases no compartimento de incêndio em $[^{\circ}C]$ e t representa o tempo em [min].

A curva de incêndio padrão tem uma evolução no tempo demonstrada no gráfico da figura 3.2.

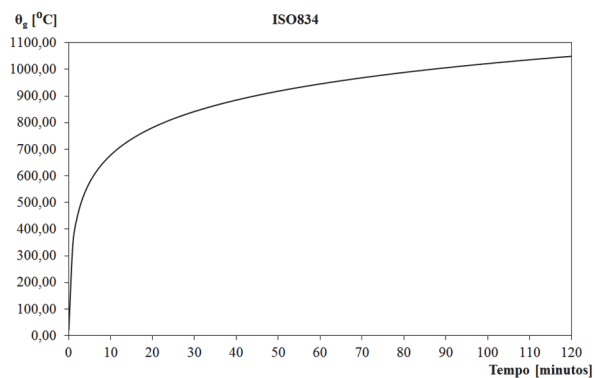


Figura 3.2 - Curva de incêndio padrão, ISO834 [23]

3.2. Ação mecânica

A verificação da resistência ao fogo pode ser feita em três domínios [24]; tempo, resistência e temperatura.

No domínio do tempo:

$$t_{fi,d} \geq t_{fi,requ} \quad (26)$$

No domínio da resistência:

$$E_{fi,d,t} \leq R_{fi,d,t}, \text{ no instante } t_{fi,requ} \quad (27)$$

No domínio da temperatura:

$$\theta_d \leq \theta_{cr,d}, \text{ no instante } t_{fi,requ} \quad (28)$$

Em que: $t_{fi,d}$ representa o valor de cálculo da resistência ao fogo; $t_{fi,requ}$ representa a resistência ao fogo requerida regularmente; θ_d representa o valor de cálculo da temperatura do elemento; $\theta_{cr,d}$ representa o valor de cálculo da temperatura crítica do elemento.

A figura 3.3 representa a relação entre os vários domínios. A temperatura do elemento deve ser inferior à sua temperatura crítica. Nessas condições também o efeito das ações é inferior à resistência do elemento. O tempo de resistência exigido pelo regulamento tem que ser inferior ao valor de cálculo da resistência ao fogo.

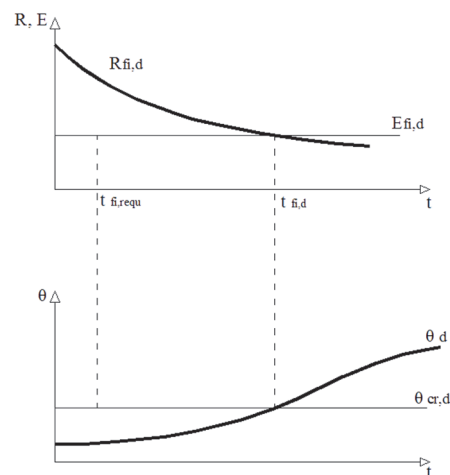


Figura 3.3 -Resistência ao fogo considerando os vários domínios de resistência.

4. COMPORTAMENTO DA SECÇÃO TRANSVERSAL AO FOGO

4.1. Introdução

A resistência ao fogo de secções parcialmente embebidas em betão depende da evolução da temperatura. Segundo o Eurocódigo 4, parte 1.2 [1], a análise da secção é feita tendo em consideração as quatro componentes (banzos, alma, aço de reforço e betão) para definir a temperatura média e a redução da geometria após um determinado período de exposição ao fogo padrão (R30, R60, R90, R120).

Este estudo tem como objetivo validar os coeficientes apresentados na tabela G.1 do anexo G da norma EN1994-1-2; a área residual e temperatura média do betão, assim como o parâmetro para a redução da altura efetiva da alma do perfil.

Será utilizado um método avançado de cálculo térmico, incremental no tempo e iterativo, (não linear) para verificar o efeito da redução das características resistentes, do módulo de elasticidade reduzido e da redução a área transversal resistente em secções HEB e IPE.

4.1. Secções parcialmente embebidas

Os elementos de secção parcialmente embebida com betão são normalmente constituídos por perfis metálicos laminados, revestidos com betão reforçado entre os banzos. A secção composta é responsável pelo aumento da rigidez à flexão e torção, quando comparada com a mesma secção do perfil metálico. Para além destas vantagens, o betão reforçado é responsável pelo aumento da resistência ao fogo destes elementos.

Para estudar o efeito da ação do fogo nestas secções foram analisados dois tipos de secção reta (IPE e HEB) com diferentes fatores de secção A_m/V , correspondentes à gama de perfis IPE 200-500 e HEB 160-500. Na Figura 4.1 estão representados os parâmetros de caracterização da secção, indicada a exposição ao fogo, identificados os quatro componentes (banzo, alma, reforço e betão) e apresentada a malha de elementos finitos regular.

Será utilizado o método de elementos finitos em regime transiente, com um método de solução não linear para avaliar o efeito da ação do fogo nestas secções. O método de

elementos finitos pressupõe a solução da Eq. (29) no domínio (Ω) e da Eq. (30) na fronteira ($\partial\Omega$). Nestas equações adaptadas de [24]: θ representa a variável temperatura de cada material; $\rho_{(\theta)}$ define a massa específica de cada material; $C_{p(\theta)}$ define o calor específico de cada material; $\lambda_{(\theta)}$ define a condutividade térmica; α_c especifica o coeficiente de convecção; θ_g representa a temperatura da curva de incêndio padrão; Φ especifica o fator de forma; ε_m representa a emissividade de cada material; ε_f especifica a emissividade do compartimento de incêndio; σ especifica a constante de Stefan-Boltzmann.

$$\nabla \cdot (\lambda_{(\theta)} \cdot \nabla \theta) = \rho_{(\theta)} \cdot C_{p(\theta)} \cdot \partial\theta/\partial t \quad (\Omega) \quad (29)$$

$$(\lambda_{(\theta)} \cdot \nabla \theta) \cdot \vec{n} = \alpha_c(\theta_g - \theta) + \Phi \cdot \varepsilon_m \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot (\theta_g^4 - \theta^4) \quad (\partial\Omega) \quad (30)$$

É assumida a utilização da curva de incêndio padrão ISO834 [23] na envolvente da secção (4 faces expostas).

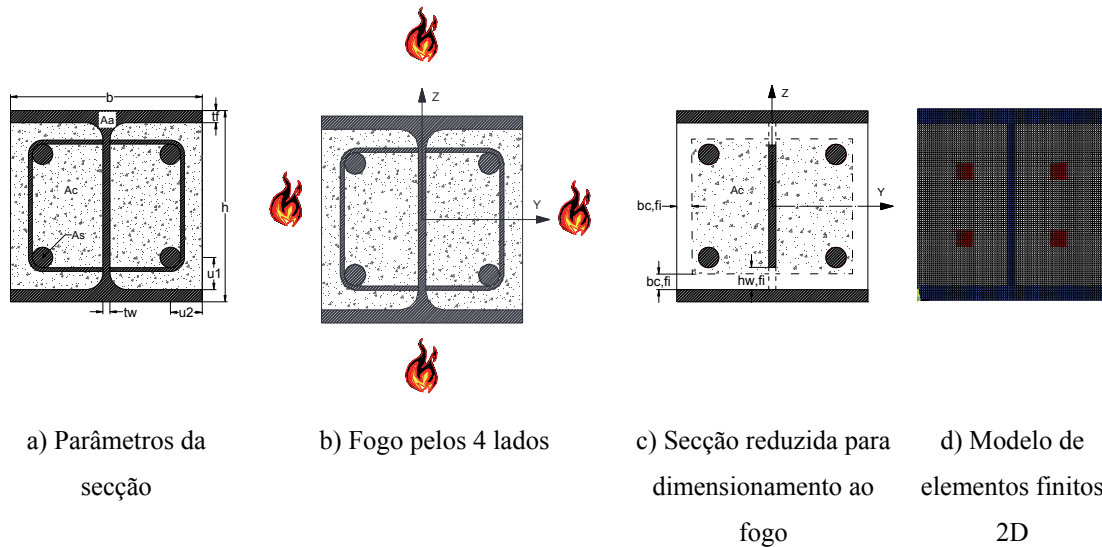


Figura 4.1- Secção parcialmente embebida com betão.

As secções analisadas foram caracterizadas, tendo em consideração o método tabular de projeto de colunas em condições de incêndio [1], tendo em consideração as dimensões mínimas da secção reta (b e h), distâncias mínimas de recobrimento do reforço (u) e percentagem mínima de reforço ($A_s / (A_s + A_c)$). As secções devem ainda ser definidas em função do nível de carregamento $\eta_{f,t}$, e pela razão entre a espessura da

alma t_w e a espessura do banzo t_f , ver figura 4.1. Este método tabular aplica-se às classes de aço estrutural S235, S275 e S355 e para percentagem mínimas de reforço entre 1% e 6%. Na tabela 4.1 estão representadas as dimensões utilizadas que definem as secções parcialmente embebidas em betão, em particular o número de varões de reforço, o diâmetro de cada varão Φ , as dimensões de recobrimento nas duas direções principais da secção reta: (u_2) segundo y e (u_1) segundo z.

Tabela 4.1 - Características das secções em estudo.

Perfil	Nº de varões	Φ [mm]	A_s [mm ²]	A_c [mm ²]	u_1 [mm]	u_2 [mm]	u [mm]	$\frac{A_s}{A_s + A_c}$	$\frac{t_w}{t_f}$	A_m/V [mm ⁻¹]
HEB160	4	12	452	19916	40	40	40	2,22	0,62	3,61
HEB180	4	12	452	25616	40	40	40	1,74	0,61	2,86
HEB200	4	20	1257	31213	50	50	50	3,87	0,60	6,45
HEB220	4	25	1963	37611	50	50	50	4,96	0,59	8,36
HEB240	4	25	1963	45417	50	50	50	4,14	0,59	7,05
HEB260	4	32	3217	53033	50	50	50	5,72	0,57	10,01
HEB280	4	32	3217	62541	50	50	50	4,89	0,58	8,39
HEB300	4	32	3217	72501	50	50	50	4,25	0,58	7,34
HEB320	4	32	3217	77275	50	50	50	4,00	0,56	7,12
HEB340	4	40	5027	80509	50	50	50	5,88	0,56	10,53
HEB360	4	40	5027	85536	50	50	50	5,55	0,56	9,99
HEB400	4	40	5027	95821	70	50	59	4,98	0,56	8,86
HEB450	4	40	5027	108801	70	50	59	4,42	0,54	8,20
HEB500	4	40	5027	121735	70	50	59	3,97	0,52	7,66
IPE200	4	12	452	16823	50	40	45	2,62	0,66	3,97
IPE220	4	20	1257	19730	50	40	45	5,99	0,64	9,34
IPE240	4	20	1257	23825	50	40	45	5,01	0,63	7,92
IPE270	4	25	1963	30085	50	40	45	6,13	0,65	9,47
IPE300	4	25	1963	37848	50	40	45	4,93	0,66	7,43
IPE330	4	25	1963	44854	50	40	45	4,19	0,65	6,43
IPE360	4	32	3217	50988	50	40	45	5,93	0,63	9,42
IPE400	4	32	3217	60715	70	40	53	5,03	0,64	7,90
IPE450	4	32	3217	72779	70	40	53	4,23	0,64	6,57
IPE500	4	40	5027	83800	70	50	59	5,66	0,64	8,88

4.2. Método simplificado de cálculo

O Eurocódigo 4 parte 1.2 [1] possibilita a determinação da rigidez efetiva da secção em torno do eixo mais fraco e a capacidade de resistência plástica da secção, dividindo a secção em quatro componentes: o banzo do perfil; a alma do perfil; o betão contido pelo perfil metálico; o aço de reforço, assumindo a secção exposta à ação do fogo padrão pelos quatro lados. Cada componente deverá ser avaliada com base na evolução da temperatura em cada componente e do efeito que esta produz na redução das características resistentes, na redução do módulo de elasticidade e da secção efetiva. O valor de projeto da resistência

plástica por compressão e o da rigidez à flexão, em relação ao eixo de menor inércia, podem ser determinados pela soma pesada das componentes.

4.2.1. Temperatura nos banzos

A temperatura média nos banzos, $\theta_{f,c}$, deve ser determinada através da equação (31). $\theta_{0,t}$ é um valor de referência da temperatura para um determinado período de exposição à ação do fogo t e k_t representa o coeficiente empírico representado na tabela 4.2.

$$\theta_{f,t} = \theta_{0,t} + k_t(A_m/V) \quad (31)$$

Tabela 4.2 - Parâmetros para determinação da temperatura no Banzo.

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

A temperatura média $\theta_{f,t}$ nos banzos pode ser determinada para as secções escolhidas, resultando a tabela AII 1.1 do Anexo II. Obtidas as temperaturas médias pode ainda construir-se a tabela AII 1.2 do Anexo II referentes aos coeficientes analíticos, $k_{y,\theta}$ a) e $k_{E,\theta}$ b) para as secções em estudo.

4.2.2. Redução da altura da alma

O efeito da ação do fogo por condução do calor afeta o comportamento da alma do perfil. Parte da secção desta componente, $h_{w,fi}$, pode ser desprezada para o cálculo da capacidade resistente e da rigidez à flexão. O valor da redução da componente pode ser determinado através da equação (32), tendo em consideração o valor do coeficiente H_t fornecido na tabela 4.3.

$$h_{w,fi} = 0.5(h - 2t_f)(1 - \sqrt{1 - 0.16(H_t/h)}) \quad (32)$$

Tabela 4.3 - Parâmetros para a redução da altura da alma.

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

De acordo com a EN1994-1-2, a altura $h_{w,fi}$ que não deve ser considerada para o cálculo da resistência das secções em estudo está representada na tabela AII 1.3 do Anexo II. Na equação (32) o fator $\sqrt{1 - 0.16(H_t/h)}$ representa a diminuição da capacidade resistente da alma, que depende da fração entre a altura da alma e a constante H_t dada na tabela 4.3. Tendo em consideração este facto, foi possível contruir a tabela AII 1.4 do anexo II com os coeficientes atribuídos às secções em estudo a) e consequentemente a temperatura média na alma residual, b).

4.2.3. Secção resistente e temperatura média no betão

O efeito direto da ação do fogo nas partes laterais da secção e o efeito indireto por condução permitem definir uma isotérmica limite com capacidade resistente para o betão. Essa linha permite definir uma secção residual, definida pelo parâmetro $b_{c,fi}$ em duas direções y e z. O parâmetro da espessura, $b_{c,fi}$, é definido na tabela 4.4, tendo em consideração o fator de secção.

Tabela 4.4 - Redução da secção de betão.

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

A temperatura média no betão $\theta_{c,t}$ é determinada através da tabela 4.5, em função do fator de seção A_m/V , e para diferentes classes de resistência ao fogo padrão.

Tabela 4.5 - Temperatura média na secção resistente do betão.

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

O parâmetro de espessura $b_{c,fi}$ foi determinado para cálculo da resistência das secções escolhidas, assim como a temperatura média da secção de betão residual. Estes resultados estão representadas respetivamente em a) e b) da tabela AII 1.5 do anexo II. Da análise da temperatura média residual obteve-se a tabela AII 1.6 com o coeficiente de redução $f_{c,\theta}/f_{ck}$, a) e a tabela AII 1.7 com a extensão $\varepsilon_{c1,\theta}$, a). Foi ainda possível determinar a resistência da secção a temperaturas elevadas $f_{c,\theta}$ e a rigidez da secção de betão residual $E_{c,sec,\theta}$, representadas em b) das tabelas AII 1.6 e AII 1.7 do anexo II.

4.2.4. Redução das características de rigidez e resistência do aço de reforço

O fator de redução $k_{y,\theta}$ para o limite de cedência e o fator de redução $k_{E,\theta}$ para o módulo de elasticidade do aço de reforço, são definidos em função da resistência ao fogo padrão e do valor médio da geometria u , das distâncias de recobrimento do aço de reforço do betão (tabelas 4.6 e 4.7). O valor médio da geometria u é definido a partir das distâncias de recobrimento u_1 e u_2 , entre o eixo do aço de reforço e a superfície exterior do betão, nas duas direções z e y da secção.

$$u = \sqrt{u_1 \cdot u_2} \quad (33)$$

$$u = \sqrt{u_2 \cdot (u_2 + 10)} \quad , (u_1 - u_2) > 10 [mm] \quad (34)$$

$$u = \sqrt{u_1 \cdot (u_1 + 10)} \quad , (u_2 - u_1) > 10 [mm] \quad (35)$$

Tabela 4.6 - Fator de redução $k_{y,\theta}$ para a tensão de cedência do aço de reforço f_{sy} .

u [mm]	Resistência ao fogo padrão			
	R30	R60	R90	R120
40	1	0,789	0,314	0,17
45	1	0,883	0,434	0,223
50	1	0,976	0,572	0,288
55	1	1	0,696	0,367
60	1	1	0,822	0,436

Tabela 4.7 - Fator de redução $k_{E,\theta}$ para o módulo de elasticidade do aço de reforço E_s .

u [mm]	Resistência ao fogo padrão			
	R30	R60	R90	R120
40	0,83	0,604	0,193	0,11
45	0,865	0,647	0,283	0,128
50	0,888	0,689	0,406	0,173
55	0,914	0,729	0,522	0,233
60	0,935	0,763	0,619	0,285

Tendo em conta o exposto nas tabelas 4.6 e 4.7 foram definidos os coeficientes $k_{y,\theta}$ e $k_{E,\theta}$ para as secções em estudo através de interpolação linear e representados na tabela AII 1.8 do anexo II em a) e b) respetivamente. Através do cálculo anterior foram interpolados os valores de ambos os coeficientes, para determinação da temperatura média no reforço. Dos valores obtidos das duas tabelas escolheu-se o valor mais seguro, permitindo determinar a tabela AII 1.9 do anexo II.

4.3. Método avançado de cálculo

O cálculo da temperatura na secção foi efetuado pelo método dos elementos finitos, com recurso ao programa Ansys. Foi utilizando o elemento “PLANE55” [26], com 4 nós e 1 grau de liberdade (temperatura), permitindo efetuar uma análise térmica num domínio bidimensional, em regime transiente, utilizando o comportamento não linear material. Este elemento utiliza funções de interpolação lineares para determinação da matriz de condutividade e 4 pontos de integração (2x2), ver figura 4.2.

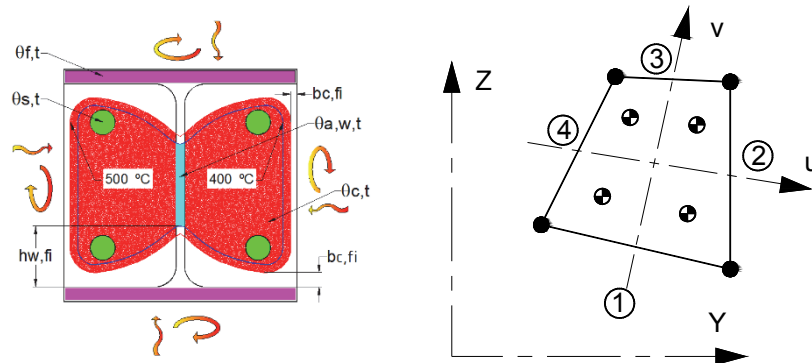


Figura 4.2. Condições limites e elemento finito “PLANE55” adaptado de [26].

O modelo utiliza elementos quadrangulares com malha regular, ver figura 4.1. Foi utilizada uma discretização de 4 elementos na espessura da alma, 6 elementos na espessura do banzo e 8 elementos, em ambas as direções do reforço. Foi considerado contacto perfeito entre os diferentes materiais ou componentes. Na superfície exterior da seção foram impostas as condições de radiação $\varepsilon_f = 1$ e $T_g = ISO834$ e as condições de convecção $\alpha = 25 [Wm^{-2}K^{-1}]$ e $T_g = ISO834$, de acordo com o Eurocódigo 1 parte 1.2 [25]. As propriedades dos materiais foram definidas de acordo com os Eurocódigos correspondentes a cada material.

A massividade das secções, foi determinada para os perfis em estudo, ver tabela 4.8 a). Na tabela 4.8 b) está representada informação sobre o modelo de elementos finitos.

Tabela 4.8 - Características das secções em estudo.

Perfil	A_m	V	A_m/V	Perfil	Nº de nós	Nº de elementos			
						Total	t_w	t_f	A_s
HEB160	0,64	0,03	25,00	HEB160	11663	11448	4	8	6 x 6
HEB180	0,72	0,03	22,22	HEB180	7055	6888	4	6	5 x 5
HEB200	0,80	0,04	20,00	HEB200	8742	8556	4	6	8 x 8
HEB220	0,88	0,05	18,18	HEB220	8463	8280	4	6	8 x 8
HEB240	0,96	0,06	16,67	HEB240	8099	7920	4	6	8 x 8
HEB260	1,04	0,07	15,38	HEB260	8188	8008	4	6	10 x 10
HEB280	1,12	0,08	14,29	HEB280	6804	6640	4	6	8 x 8
HEB300	1,20	0,09	13,33	HEB300	7209	7040	4	6	8 x 8
HEB320	1,24	0,10	12,92	HEB320	7209	7040	4	6	8 x 8
HEB340	1,28	0,10	12,55	HEB340	6545	6384	4	6	8 x 8
HEB360	1,32	0,11	12,22	HEB360	7315	7144	4	6	8 x 8
HEB400	1,40	0,12	11,67	HEB400	7623	7448	4	6	8 x 8
HEB450	1,50	0,14	11,11	HEB450	9163	8968	4	6	8 x 8
HEB500	1,60	0,15	10,67	HEB500	8701	8512	4	6	8 x 8
IPE200	0,60	0,02	30,00	IPE200	8385	8192	4	6	8 x 8
IPE220	0,66	0,02	27,27	IPE220	8515	8320	4	6	10 x 10
IPE240	0,72	0,03	25,00	IPE240	9045	8844	4	6	10 x 10
IPE270	0,81	0,04	22,22	IPE270	11319	11096	4	6	12 x 12
IPE300	0,90	0,05	20,00	IPE300	8643	8448	4	6	10 x 10
IPE330	0,98	0,05	18,56	IPE330	9855	9648	4	6	10 x 10
IPE360	1,06	0,06	17,32	IPE360	9295	9088	4	6	10 x 10
IPE400	1,16	0,07	16,11	IPE400	8385	8192	4	6	10 x 10
IPE450	1,28	0,09	14,97	IPE450	11169	10944	4	6	10 x 10
IPE500	1,40	0,10	14,00	IPE500	8235	8040	4	6	10 x 10

a) Fatores de forma

b) Características numéricas

Na figura 4.3 estão representados os campos de temperatura correspondentes às classes de resistência ao fogo, para o caso de uma das secções analisadas. No anexo II nas tabelas da AII 3.1 à AII 3.12 estão representados os campos de temperatura de todas as secções para as classes de resistência ao fogo R30, R60, R90 e R120. Nas tabelas de AII 3.13 a AII 3.26 está representada a isotérmica de 500°C para se ter uma percepção geométrica visual da diminuição da secção resistente de betão em ambas as direções principais da secção.

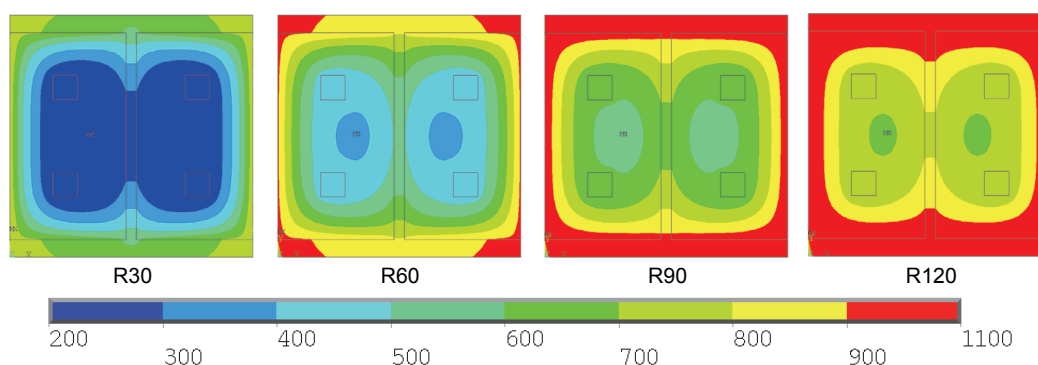


Figura 4.3 - Resultados de simulação numérica da secção HEB 200 para 4 classes de resistência.

Este método de cálculo utilizou critérios para avaliação dos parâmetros das componentes. Para determinação da temperatura dos banzos foi utilizado o critério da média aritmética simples dos nós correspondentes. Para determinação da redução da altura da alma foi utilizado o critério da isotérmica de 400 °C (valor limite para redução da capacidade resistente do aço), [17]. Para determinação da secção residual resistente do betão foi considerado o critério da isotérmica de 500 °C (valor limite para a resistência do betão) [22]. Em ambos os casos foram identificadas as distâncias nas duas direções principais z e y. Para determinação das características de resistência e rigidez do aço do reforço foi utilizado o critério da média aritmética simples da temperatura dos nós correspondentes.

4.4. Comparação dos resultados e novas propostas

Após efetuar as simulações de todas as secções pretendidas, foram determinados os valores das temperaturas médias das várias componentes da secção, para cada classe de resistência ao fogo padrão (R30, R60, R90 e R120). Este procedimento foi utilizado com os critérios mencionados para comparação dos resultados numéricos e do método simplificado. Serão apresentados os resultados numéricos e analíticos aplicando uma nova formulação proposta para o Eurocódigo EN1994-1-2.

4.4.1. Temperatura nos banzos

O resultado obtido das simulações efetuadas para cada uma das secções em estudo permitiu a construção da tabela AII 2.1 a) onde se encontram as temperaturas médias nos banzos $\theta_{f,t}$. Na figura 4.4 estão representados os valores médios das temperaturas dos banzos para as diferentes secções em estudo. Cada gráfico apresenta os resultados do método simplificado de cálculo (subcapítulo 4.4), os resultados do método avançado de cálculo (subcapítulo 4.5) e as novas propostas de cálculo. Para algumas secções deste estudo, o Eurocódigo 4 parte 1.2 [1] apresenta valores conservadores para alguns casos e apresenta valores inseguros para outros casos. A temperatura média do banzo das secções

HEB e IPE é segura para classe de resistência R30, parcialmente segura para a classe de resistência R60 e insegura para as restantes classes.

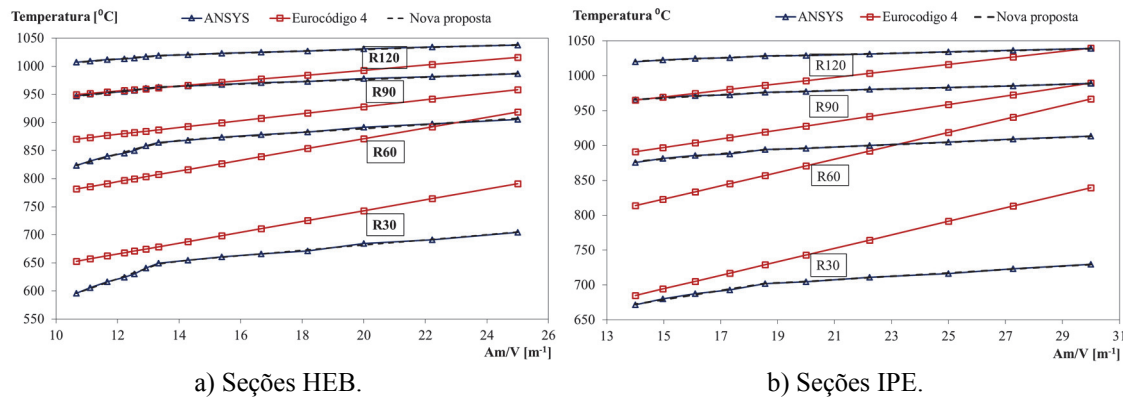


Figura 4.4.- Resultados da temperatura média nos banzos das secções analisadas.

Da análise dos gráficos da figura 4.4 resulta uma nova proposta de cálculo para determinação da temperatura média do banzo, mais segura do que o método proposto no Eurocódigo EN1994-1-2, [1]. Esta nova proposta é baseada na utilização da mesma equação (31) do Eurocódigo 4 e numa aproximação bilinear da curva da temperatura determinada pelo programa ANSYS, utilizando um novo fator empírico k_t e uma nova temperatura de referência $\theta_{0,t}$. Nas tabelas 4.9 e 4.10 estão apresentados os novos parâmetros para determinação da temperatura do banzo para os dois tipos de secções (HEB e IPE).

Tabela 4.9.- Parâmetros para determinação da temperatura no Banzo (secções HEB).

Resistência ao fogo padrão	$10 < A_m/V < 14$		$14 \leq A_m/V < 25$	
	$\theta_{0,t} [^\circ C]$	$k_t [m^\circ C]$	$\theta_{0,t} [^\circ C]$	$k_t [m^\circ C]$
R30	387	19,55	588	4,69
R60	665	14,93	819	3,54
R90	887	5,67	936	2,04
R120	961	4,29	998	1,62

Tabela 4.10 - Parâmetros para determinação da temperatura no Banzo (secções IPE).

Resistência ao fogo padrão	$14 < A_m/V < 19$		$19 \leq A_m/V < 30$	
	$\theta_{0,t} [^\circ C]$	$k_t [m^\circ C]$	$\theta_{0,t} [^\circ C]$	$k_t [m^\circ C]$
R30	582	6,45	656	2,45
R60	824	3,75	862	1,72
R90	935	2,20	956	1,09
R120	997	1,68	1010	0,96

A temperatura média do banzo, obtida pela nova formulação, permite a construção da tabela AII 2.1 b) do Anexo II que apresenta o valor de temperatura media nos banzos para as secções em estudo. Obtidas as temperaturas médias, foram realizadas as tabelas AII 2.2 a) e AII 2.3 a) onde estão representados os coeficientes de redução da resistência referentes aos resultados numéricos e aos resultados obtidos considerando a nova proposta, para as secções em estudo. Realizaram-se ainda as tabelas AII 2.2 b) e AII 2.3 b) onde estão representados os coeficientes de redução do módulo de elasticidade referentes aos resultados numéricos e aos resultados obtidos considerando a nova proposta para as secções em estudo.

4.4.2. Redução da altura da alma

Para cada classe de resistência ao fogo padrão foi determinada a posição de todos os nós que se encontravam com temperatura inferior à isotérmica de 400°C. Foi medida a distância dos nós posicionados nessa isotérmica e a extremidade interior dos banzos. Para cada classe de resistência foi calculado o valor da redução da altura da alma, utilizando o método avançado de cálculo. Dos resultados obtidos fez-se a tabela AII 2.4 a) do anexo II.

O valor da redução da altura da alma foi comparado com o valor determinado pelo método simplificado de cálculo. Foi ainda representado o resultado da solução proposta. A figura 4.5 apresenta esta comparação para os dois tipos de secções estudadas, HEB e IPE respetivamente.

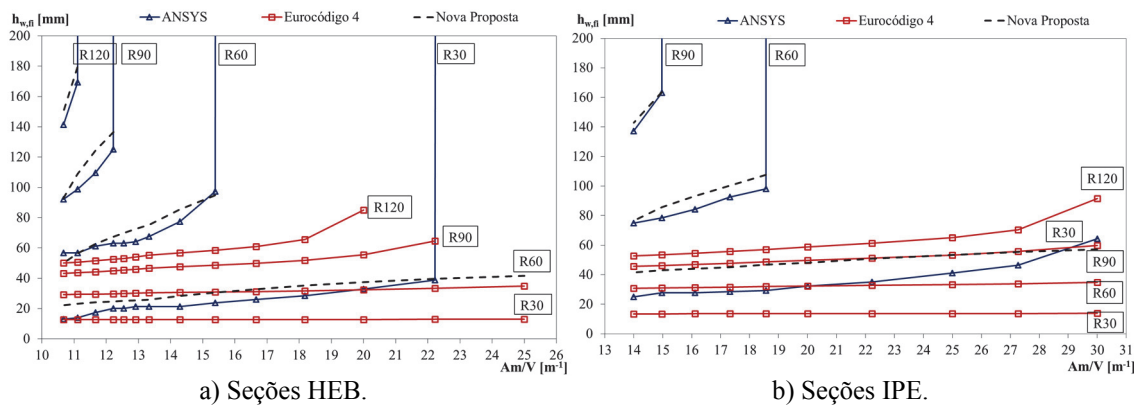


Figura 4.5 - Resultados da redução da altura da alma das secções.

Os resultados numéricos apresentam uma dependência do fator de secção do perfil significativa, independentemente da classe de resistência ao fogo, ao contrário do método simplificado proposto no Eurocódigo, ver curvas da redução da altura da alma para R30 e R60. Os resultados do método simplificado de cálculo evidenciam falta de segurança para todas as classes de resistência e para todas as secções estudadas.

Para secções do tipo HEB e para classes de resistência R60, a redução da altura da alma é total para fatores de secção superiores a 15,38, enquanto segundo o Eurocódigo 4 [1], este apresenta uma redução pouco variável (35 mm) e independente do fator de secção. Para classes de resistência R90, a redução da altura da alma é total para fatores de secção maiores do que 12,22 (Ansys) e é total para fatores de secção maiores que 22,22 (Eurocódigo 4). Para classes de resistência R120, a resistência da alma obtida na análise não é considerada para fatores de secção superiores a 11,11, enquanto de acordo com Eurocódigo 4, a resistência da alma apenas não é considerada para fatores de secção superiores a 20,00.

Para secções do tipo IPE e para a classe de resistência R30, foi determinada uma redução crescente com o aumento do fator de secção, enquanto o Eurocódigo 4 apresenta uma redução da altura da alma praticamente constante de aproximadamente 13,5 mm, independentemente do fator de secção. Para a classe R60, a redução da altura da alma é total para fatores de secção superiores a 18,50 enquanto segundo o Eurocódigo 4 é proposta uma redução pouco variável entre 31 a 35 mm. Para classes de resistência R90, a redução da altura da alma é total para fatores de secção superiores a 15,00 e de acordo com o Eurocódigo 4 é proposta uma variação de 45 a 60 mm. Para a classe de resistência R120, os resultados numéricos consideram que a redução da altura é total, enquanto, de acordo com Eurocódigo 4, é apresentada uma redução pouco variável de entre 52 a 92 mm.

Em alternativa ao método proposto pelo Eurocódigo 4 [1], a nova proposta apresenta uma expressão paramétrica para relacionar os resultados obtidos com o fator de secção e com a classe de resistência. Deste estudo resultaram duas equações paramétricas (36-37), referentes respetivamente a perfis HEB e perfis IPE. Ambas as equações possuem os limites de aplicação apresentados na tabela 4.11.

$$2h_{w,fi} / h_i \times 100 = 0.0035 \times t^2 \times (A_m/V) - 0.03 \times t^{2.02} + (A_m/V) / 2 \quad (36)$$

$$2h_{w,fi} / h_i \times 100 = 0.002 \times t^2 \times (A_m/V) - 0.03 \times t^{1.933} + (A_m/V) \quad (37)$$

Classe de resistência	Fator de secção (HEB)	Fator de secção (IPE)
R30	$A_m/V < 22,22$	$A_m/V < 30$
R60	$A_m/V < 15,38$	$A_m/V < 18,56$
R90	$A_m/V < 12,22$	$A_m/V < 14,97$
R120	$A_m/V < 11,11$	-

Com base na nova formulação realizou-se a tabela AII 2.4 b) do anexo II e a consequente representação gráfica já apresentada na figura 4.5.

A temperatura média aritmética da secção efetiva da alma foi determinada pelo conjunto de nós que verificam a condição limite, ver tabela AII 2.5 do anexo II, e figura 4.6 para os dois tipos de secções (HEB e IPE). Foi feita ainda a tabela AII 2.5 b) do anexo II onde se representa a temperatura média obtida pela formulação da nova proposta.

Nos gráficos da figura 4.6, estão apresentados os resultados do método simplificado, os resultados numéricos e os resultados da nova proposta.

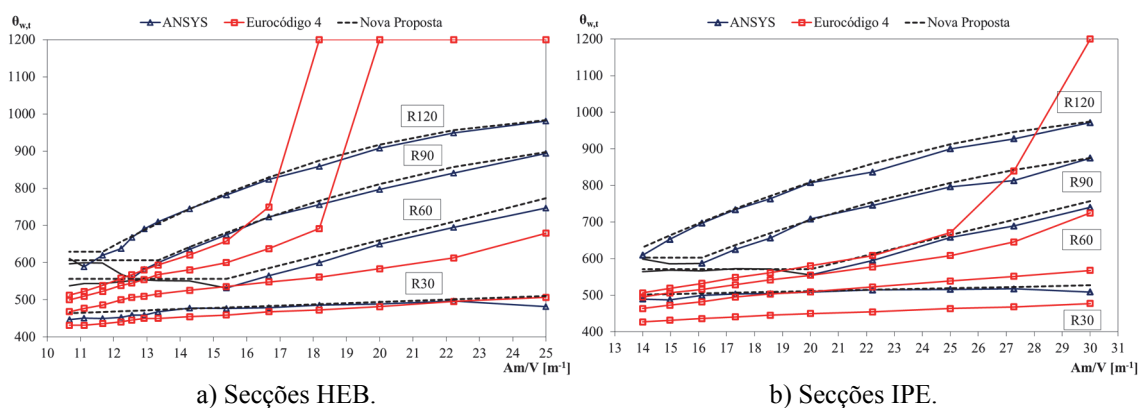


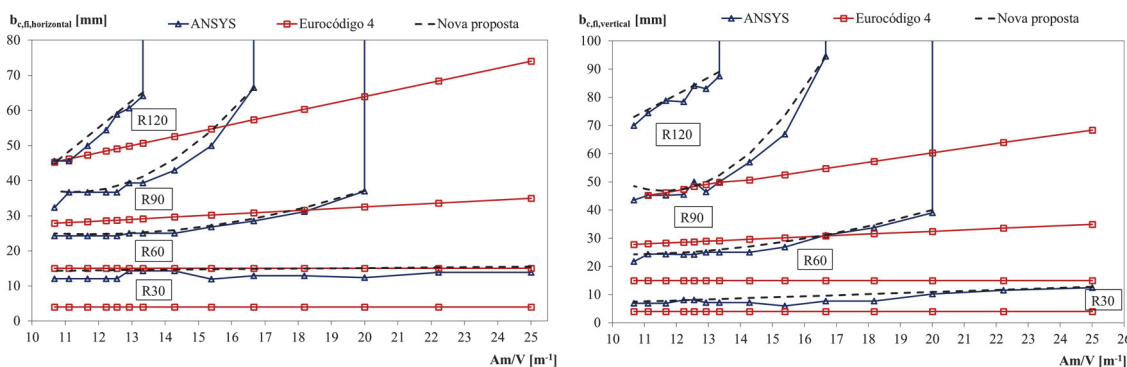
Figura 4.6 - Temperatura média da alma, para diferentes classes de resistência e secções.

Tendo em conta a temperatura média da alma construíram-se, através de interpolação linear, a) e b) da tabela AII 2.6 do anexo II com os coeficientes $k_{y,\theta, parcial}$ atribuídos às secções em estudo, para os resultados numéricos e para os resultados obtidos da nova proposta respetivamente.

4.4.3. Seção resistente e temperatura média no betão

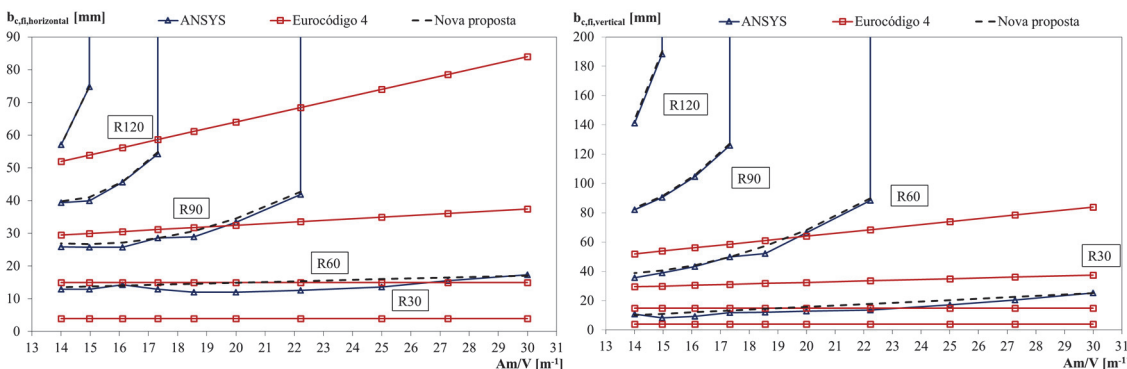
Tendo em consideração o critério da isotérmica dos 500°C, assumindo que o betão perde toda a sua capacidade resistente quando atinge os 500°C, para cada classe de resistência ao fogo padrão, foi determinada a posição de todos os nós do modelo numérico (ANSYS) que se encontravam nesse valor limite. Foram medidas as distâncias entre os nós dessa condição limite e a extremidade interior dos banzos, $b_{c,fi,vertical}$, e as distâncias entre os nós dessa condição e o exterior da secção, $b_{c,fi,horizontal}$. Tendo em conta as diferenças verificadas nas medições em ambas as direções, optou-se por separar a distância $b_{c,fi}$ nas duas direções, vertical e horizontal. Após a análise dos resultados foram elaboradas as tabelas AII 2.7 a) e AII 2.8 a) para a representação dos resultados numéricos, e as tabelas AII 2.7 b) e AII 2.8 b) para a representação dos resultados obtidos pela formulação das novas propostas.

Os gráficos da Figura 4.7 representam a comparação dos resultados horizontais e verticais obtidos em seções compostas por perfis metálicos HEB e IPE, respetivamente.



a) Redução horizontal $b_{c,fi}$ de seções HEB.

b) Redução vertical $b_{c,fi}$ de seções HEB.



c) Redução horizontal $b_{c,fi}$ de seções IPE.

d) Redução vertical $b_{c,fi}$ de seções IPE.

Figura 4.7 - Resultados da redução da secção resistente do betão

De acordo com os resultados da simulação, no caso de secções HEB e para classes de resistência R60 R90 e R120, a redução da coordenada horizontal e vertical $b_{c,fi}$ é total, quando o fator de secção é superior a 20, 16.67 e 13.33 [m^{-1}], respetivamente, ver figura 4.7 a) e figura 5.7 b). No caso de secções IPE e para classes de resistência R60 R90 e R120, a redução da coordenada horizontal e vertical $b_{c,fi}$ é total, quando o fator de secção é superior a 22.22, 17.32 e 14.97 [m^{-1}], respetivamente, ver figura 4.7 c) e figura 4.7 d).

De acordo com a norma EN1994-1-2 [1], a redução da coordenada, $b_{c,fi}$, varia pouco com o fator de secção dos perfis, em particular para classes de resistência inferiores a R90. Os resultados numéricos evidenciam a falta de segurança da norma, para todas as classes de resistência ao fogo.

A temperatura média aritmética do betão residual foi determinada para o conjunto de nós do modelo numérico que verificavam a condição apresentada, representada em a) e b) da tabela AII 2.9 do anexo II e nos gráficos a) e b) da figura 4.8.

A camada exterior do betão pode ser desprezada para o cálculo da capacidade resistente da secção e para o cálculo da rigidez à flexão. Esta camada foi determinada em função dos resultados numéricos, de acordo com a condição limite da isotérmica de 500 °C. Na figura 4.7 está apresentada uma nova proposta para determinação da camada horizontal, $b_{c,fi, horizontal}$ e vertical, $b_{c,fi, vertical}$ de betão. Esta proposta foi elaborada com garantia de segurança, assumindo as expressões analíticas que conferem reduções superiores ao valor determinado pelos resultados da simulação numérica. Nas tabelas 4.12 e 4.13 é apresentada a nova formulação para determinação da camada exterior de betão a descontar em fase de projeto.

Tabela 4.12 - Redução da espessura de betão em secções HEB.

Resistência ao fogo	$b_{c,fi} = a \times (A_m/V)^2 + b \times A_m/V + c$						Fator de secção
	$b_{c,fi, horizontal}$			$b_{c,fi, vertical}$			
	a	b	c	a	b	c	
R30	0,0	0,0809	13,5	0,0	0,372	3,5	$10 < A_m/V < 25$
R60	0,1825	-4,2903	50,0	0,1624	-3,2923	41,0	$10 < A_m/V < 20$
R90	1,0052	-22,575	163,5	1,8649	-43,287	298,0	$10 < A_m/V < 17$
R120	0,0	7,5529	-35,5	0,0	6,0049	9,0	$10 < A_m/V < 13$

Tabela 4.13 - Redução da espessura de betão em secções IPE.

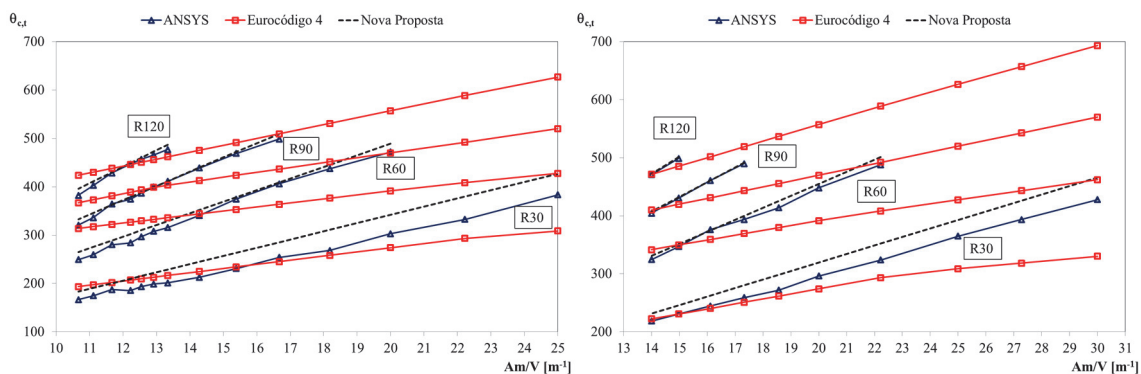
$$b_{c,fi} = a \times (A_m/V)^2 + b \times A_m/V + c$$

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

A temperatura média da secção residual do betão, que apresenta capacidade resistente, foi determinada em função dos resultados numéricos, ver tabela AII 2.9 a) do anexo II e figura 4.8. Na tabela AII 2.9 b) e figura 4.8 estão representadas a temperatura média do betão residual tendo em conta as novas propostas. Estas foram realizadas utilizando uma aproximação paramétrica dos resultados, em função da classe de resistência e do fator de secção, ver equações (38) e (39).

$$\theta_{c,t} = +3.1 \times t^{0.5} \times (A_m/V) + 0.003 \times t^{1.95} \tag{38}$$

$$\theta_{c,t} = +2.67 \times t^{0.5} \times (A_m/V) + 3.4 \times t^{0.61} \tag{39}$$



a) Temperatura média do betão residual em secções HEB. b) Temperatura média do betão residual em secções IPE.

Figura 4.8 - Temperatura média do betão residual.

Tabela 4.14 – Condições para o cálculo da temperatura média no betão residual.

$y = 3,1 \times t^{0,5} \times A_m/V + 0,003 \times t^{1,95}$		$y = 2,67 \times t^{0,5} \times A_m/V + 3,4 \times t^{0,61}$	
Classe de resistência	Fator de forma	Classe de resistência	Fator de forma
R30	$A_m/V < 25$	R30	$A_m/V < 30$
R60	$A_m/V < 20$	R60	$A_m/V < 23$
R90	$A_m/V < 17$	R90	$A_m/V < 18$
R120	$A_m/V < 14$	R120	$A_m/V < 15$

a) Validade da equação para o cálculo da temperatura residual no betão de PEB de secção HEB

b) Validade da equação para o cálculo da temperatura residual no betão de PEB de secção IPE

Da análise da temperatura média residual dos resultados numéricos e da nova proposta obtiveram-se ainda a) e b) da tabela AII 2.10 com a representação do coeficiente de redução $f_{c,\theta}/f_{ck}$, a tabela AII 2.12 a) e b) com a extensão $\varepsilon_{c1,\theta}$ e consequentemente a resistência a temperaturas elevadas $f_{c,\theta}$ representada em a) e b) da tabela AII 2.11 e o módulo de elasticidade da secção de betão residual $E_{c,sec,\theta}$ representado em a) e b) da tabela AII 2.13 do anexo II.

4.4.4. Redução das características de rigidez e resistência do aço de reforço

Tendo em consideração as características das secções dos dois tipos de perfis, foi determinada a coordenada u , de acordo com EN1994-1-2 [1], ver tabela 4.1. Após a simulação numérica, foi determinada a temperatura média nos nós do aço de reforço θ_s , ver figura 4.9. Dos dados fornecidos na EN1994-1-2, [1], realizaram-se a) e b) da tabela AII 1.8 com os coeficientes de redução da tensão de cedência, $k_{y,\theta}$, e coeficientes de redução do módulo de elasticidade do aço, $k_{E,\theta}$, para as secções em estudo. A partir destes valores foram efetuadas interpolações lineares para obter a tabela AII 1.9 referente à temperatura média atribuída pela norma. Obtidas as temperaturas médias do método simplificado, as temperaturas médias do resultado numérico foi apresentado na tabela AII 2.14 a) e as temperaturas médias do reforço dadas pela nova formulação representada na tabela AII 2.14 b). Após a obtenção das temperaturas médias realizaram-se as tabelas AII 2.15 e AII 2.16, onde estão representados o fator de redução para a tensão de cedência e

o fator de redução para o módulo de elasticidade, correspondentes ao método numérico e a nova proposta. Finalmente executaram-se os gráficos comparativos da figura 4.9.

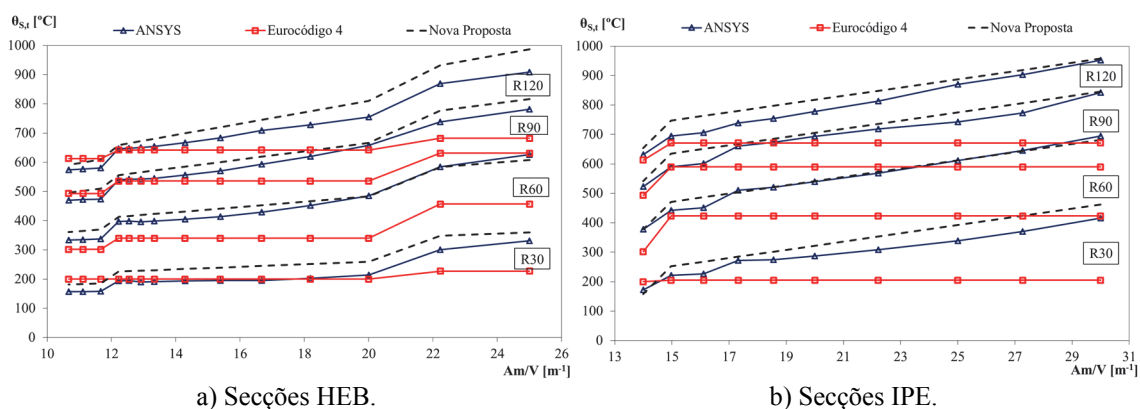


Figura 4.9 - Temperatura média do reforço.

Na figura 4.9 é representada a variação da temperatura em função do fator de forma e do valor médio da coordenada de recobrimento, u , para os dois tipos de secção reta (HEB e IPE) e para diferentes classes de resistência ao fogo. É ainda apresentada a comparação de resultados com os valores prescritos no Eurocódigo EN1994-1-2, [1].

Para classes de resistência R30, os coeficientes de redução determinados pelos dois métodos praticamente coincidem. O Eurocódigo 4 apresenta resultados inseguros do coeficiente de redução da tensão de cedência para classes de resistência R90 e R120 e ainda resultados inseguros do coeficiente de redução do módulo de elasticidade para classes de resistência R120, quando o fator de secção é superior a 50 (perfis HEB). No caso de perfis IPE, todos os resultados de ambos os coeficientes de redução são seguros, podendo em alguns casos apresentar resultados demasiadamente conservativos.

Em alternativa ao Eurocódigo 4 EN1994-1-2, [1], foram determinadas expressões paramétricas para determinação da temperatura média do reforço, tendo em consideração os valores dos resultados numéricos. Estas expressões dependem da classe de resistência, do fator de secção e do valor médio da geometria u (recobrimento). As equações (40) e (41) permitem a determinação da temperatura média do reforço para dois tipos de secção (HEB e IPE), permitindo determinar a redução da capacidade resistente e rigidez. Na figura 4.9 estão representadas as expressões paramétricas que aproximam a evolução da temperatura média do reforço. Esta proposta foi elaborada com garantia de segurança, assumindo que as expressões analíticas conferem reduções de resistência e rigidez superiores ao valor determinado pelos resultados da simulação numérica.

$$\theta_{s,t} = 0.1 \times t^{1.1} \times (A_m/V) + 7.5 \times t - 0.1 \times t^{1.765} - 8 \times u + 390 \quad (40)$$

$$\theta_{s,t} = 14.0 \times (A_m/V) + 11.0 \times t - 0.1 \times t^{1.795} - 8 \times u + 115 \quad (41)$$

4.4.5. Método de soma pesada para determinação de resistência ao fogo

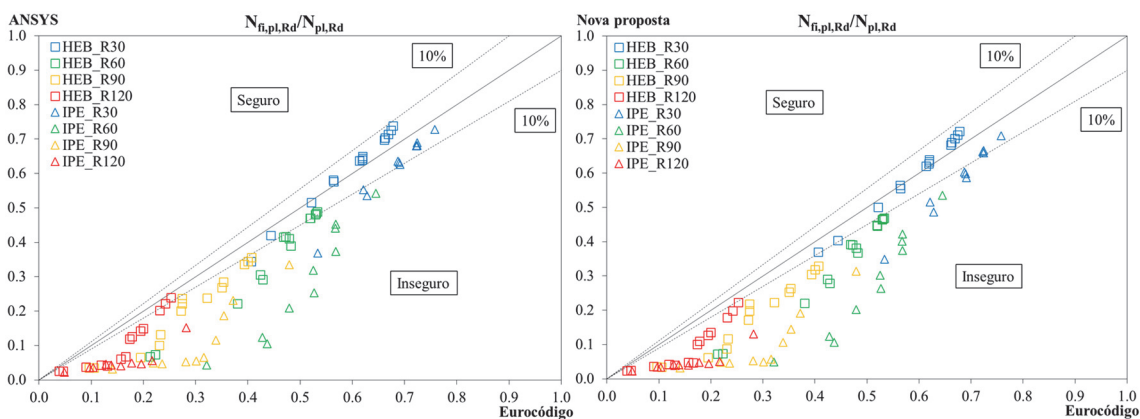
A soma pesada das quatro componentes das secções parcialmente embebidas em betão permite a obtenção da resistência plástica de secção $N_{fi,pl,Rd}$ em situação de incêndio e da rigidez efetiva à flexão $(EI)_{fi,eff,z}$ em torno do eixo mais fraco, em condições de incêndio.

Na tabela AII 2.17 a) do anexo II estão representados os valores de projeto da resistência plástica da secção à compressão à temperatura ambiente. As tabelas AII 2.17 b) e AII 2.18 a) e b) representam a capacidade resistente plástica da secção à compressão obtida para o método simplificado, para o método avançado de cálculo e para o resultado da soma pesada tendo em conta a formulação das novas propostas sugeridas neste estudo. Seguindo o procedimento anterior representou-se na tabela AII 2.19 do anexo II a rigidez efetiva das secções em estudo à temperatura de 20°C e os valores obtidos tendo em conta as classes de resistência ao fogo. As tabelas AII 2.20 e AII 2.21 a) e b) representam a rigidez efetiva obtido do método simplificado, do método avançado de cálculo e do resultado da soma pesada, tendo em conta a formulação das novas propostas sugeridas neste estudo.

Para poder ter uma melhor perceção dos resultados foi feita a tabela AII 2.22 onde está representado o quociente entre a resistência plástica da secção à compressão a temperaturas elevadas, para as classes R30, R60, R90 e R120 e a resistência plástica da secção à compressão a temperatura ambiente. A tabela AII 2.23 representam o quociente entre rigidez efetiva para as classes R30, R60, R90 e R120 e a rigidez efetiva a 20°C. As tabelas referem-se respetivamente ao método simplificado a), ao método avançado de cálculo b) e a nova proposta c).

Através do exposto nas tabelas mencionadas anteriormente, realizaram-se os gráficos das figuras 4.10. Como é possível observar no gráfico a) o método simplificado da EN1994-1-2 [1] é ligeiramente conservador para a classe de resistência R30, mostrando-se bastante inseguro para as restantes classes. Os resultados do gráfico b) da

figura 4.10 são semelhantes, pelo facto da nova proposta apresentar valores próximos dos resultados numéricos.

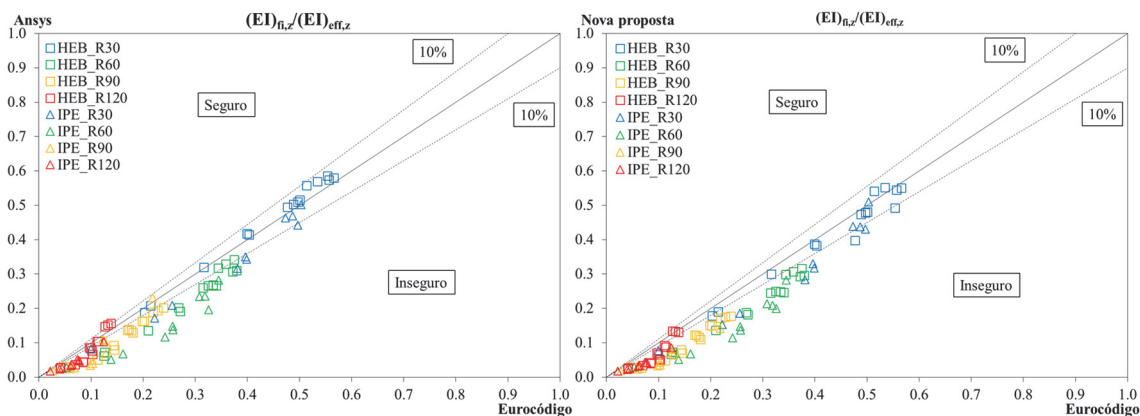


a) Ansys/EN1994-1-2.

b) Nova proposta/EN1994-1-2.

Figura 4.10 – Comparação dos resultados obtidos para o esforço axial plástico resistente através do método da soma pesada.

Os resultados do gráfico a) da figura 4.11 demonstram que a rigidez efetiva, obtida pelo método simplificado, da norma EN1994-1-2 [1] é ligeiramente conservadora para a classe de resistência R30 e R120, mostrando-se insegura para as classes R60 e R90. Os resultados do gráfico b) da figura 4.11 são semelhantes, pelo facto da nova proposta apresentar valores próximos dos resultados numéricos.



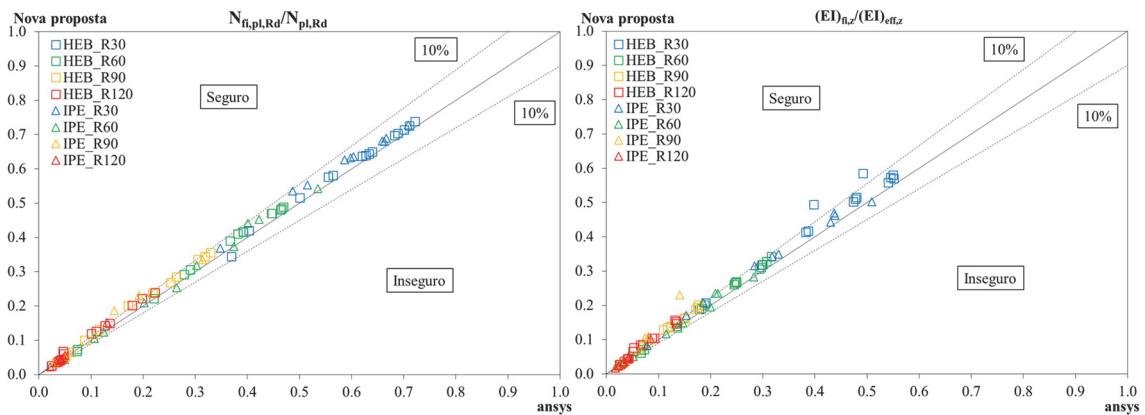
a) Ansys/EN1994-1-2.

b) Nova proposta/EN1994-1-2.

Figura 4.11 - Comparação dos resultados para a rigidez efetiva através do método da soma pesada

Como era de esperar os resultados da nova proposta encontram-se ligeiramente do lado da segurança quando comparados com os resultados numéricos, uma vez que a formulação das novas propostas se basearam nos resultados do método avançado de

cálculo, como é possível observar na figura 4.12 a) para a resistência plástica da secção à compressão e na figura 4.12 b) para a rigidez à flexão efetiva em torno do eixo mais fraco.



b) Esforço axial plástico resistente

b) Rigidez efetiva

Figura 4.12- Comparação entre os resultados da nova proposta e do ansys obtidos pelo método da soma pesada

4.5. Conclusões do capítulo

São apresentados os resultados das quatro componentes (evolução da temperatura média no banzo, redução da altura da alma, temperatura média do betão e a redução da rigidez do reforço).

O método simplificado proposto no anexo G do EN1994-1-2 [1] demonstra-se inseguro em comparação com os resultados numéricos, para alguns períodos de exposição ao fogo, sendo apresentado, neste trabalho, um conjunto de propostas alternativas. Após a realização da soma pesada dos quatro componentes, constatamos que o método simplificado de cálculo é conservador para a classe de exposição R30, sendo inseguro para as restantes classes de resistência. As novas propostas permitem obter resultados do lado da segurança.

5. RESISTÊNCIA DE VIGAS À FLEXÃO A TEMPERATURAS ELEVADAS

5.1. Introdução

Este capítulo trata do estudo do Momento plástico, do Momento crítico e do Momento resistente de encurvadura lateral torsional dos elementos parcialmente embebidas com betão (PEB).

5.2. Método analítico de cálculo do momento plástico

O momento plástico da secção ocorre quando os materiais entram no regime plástico. Na figura 5.1 está representada a distribuição de tensões em cada componente, tendo em consideração algumas hipóteses simplificativas.

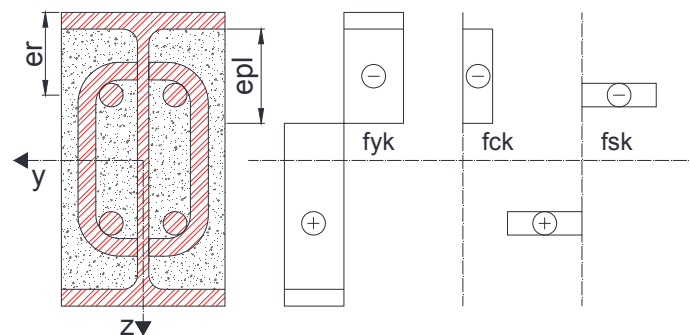


Figura 5.1 - Distribuição de tensões

O cálculo do momento plástico do perfil IPE efetua-se através da seguinte equação, simplificada no final.

$$M_{pl} = \int [\sigma_x dA] \times z \quad (42)$$

$$M_{pl} = f_y \int z \times dA \quad (43)$$

$$M_{pl} = f_y \times W_{pl} \quad (44)$$

Em que: M_{pl} é o momento plástico; σ_x é a tensão principal na direção x; dA é a área infinitesimal; z é o braço da área infinitesimal relativamente ao CG da secção; f_y é

a tensão de cedência do material; W_{pl} é o módulo plástico da secção (momento estático de 1ª ordem).

Nas vigas parcialmente embebidas com betão devem ser utilizadas algumas hipóteses simplificativas para contabilizar o contributo misto dos materiais envolvidos. A parte do betão é considerada, reduzindo neste contributo a uma parte equivalente em aço, considerando os valores relativos dos módulos de elasticidade transversal (G_c/G_a) e longitudinal (E_c/E_a). O valor equivalente em aço da constante de torção ($I_{tc,red}$) e o momento de 2ª ordem equivalente em aço ($I_{zc,red}$) do betão, devem ser aproximados de acordo com as expressões seguintes [6].

$$I_{tc,red} = I_{tc} \times \frac{G_c}{G_a} \quad (45)$$

$$I_{zc,red} = I_{zc} \times \frac{E_c}{E_a} \quad (46)$$

Em que: I_{tc} representa a constante de torção do betão; I_{zc} é o momento de 2ª ordem do betão.

Na figura 5.2 está representada a geometria da secção reta da viga.

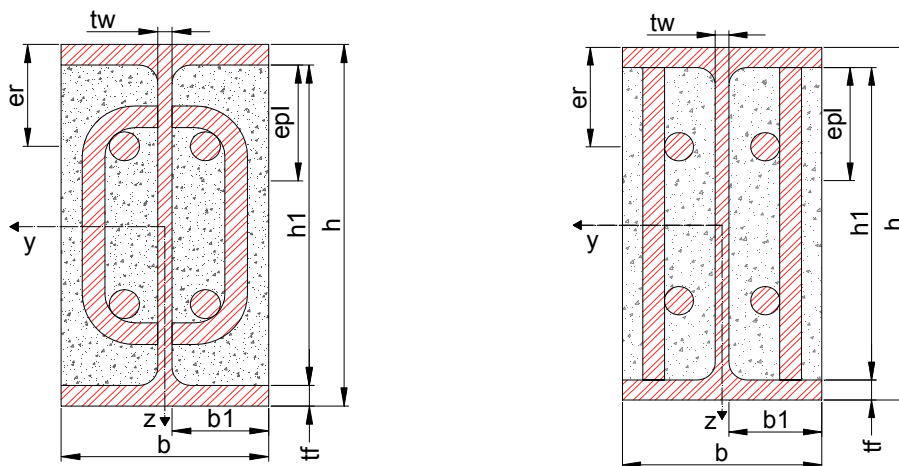


Figura 5.2 - Geometria de secções PEBA e PEBB da viga

O cálculo do fator da constante de torção efetua-se através da expressão (47) segundo N. S Trahair [27].

$$\alpha = \frac{1}{3} \left(1 - \frac{0,630e_{pl}}{b - t_w} + \frac{0,052e_{pl}^5}{(b - t_w)^5} \right) \quad (47)$$

O valor da constante de torção do betão é calculado na expressão (48).

$$I_{tc} = (b - t_w)e_{pl}^3 \alpha \quad (48)$$

O valor da constante de torção da viga parcialmente embebida com betão PEB obtém-se através da expressão (49).

$$I_t = I_{ta} + I_{tc,red} \quad (49)$$

O valor do momento de segunda ordem ou momento de inércia do betão obtém-se na expressão (50).

$$I_{zc} = \frac{e_{pl}(b - t_w)^3}{12} \quad (50)$$

O valor do momento de inércia total da secção da viga PEB obtém-se na expressão (51).

$$I_z = I_{za} + I_{zc,red} \quad (51)$$

A posição do eixo neutro plástico obtém-se na expressão (52).

$$e_{pl} = \frac{2f_{yk}t_w h_1/2}{2f_{yk}t_w + 2f_{ck}b_1} \quad (52)$$

Em que: α é o fator da constante de torsão; e_{pl} é a posição do eixo neutro plástico; f_{yk} é a tensão de cedência característica do aço do perfil; f_{ck} é a tensão de cedência à compressão característica do betão; b é o comprimento do banzo; t_w é a espessura da alma; h_1 é a altura entre banzos; I_t é a constante de torção da PEB; I_z é o momento de 2ª ordem da viga PEB; I_{ta} é a constante de torção do perfil; I_{za} é o momento de 2ª ordem do perfil.

O momento plástico para temperatura de 20°C, da secção da viga parcialmente embebida com betão PEB é obtido na expressão (53).

$$\begin{aligned}
 M_{pl} = & W_{pl,y} \cdot f_{yk} - 2 \cdot f_{yk} \cdot t_w \cdot (0,5h_1 - e_{pl})^2 / 2 \\
 & + 0,85 \cdot f_{ck} \cdot 2 \cdot b_1 \cdot e_{pl} \cdot (0,5 \cdot h_1 - 0,5 \cdot e_{pl}) \\
 & + 2 \cdot A_r \cdot (f_{sk} - 0,85 \cdot f_{ck}) (h - 2 \cdot e_r)
 \end{aligned} \tag{53}$$

Onde: f_{sk} representa a tensão de cedência característica do aço do reforço; e_r representa a excentricidade do CG do varão de reforço; 0,85 é um fator de redução da tensão de cedência a compressão característica do betão.

A dedução do momento plástico para elevadas temperaturas, expressão (54), é determinada partir da expressão (53) do momento plástico para nível de temperatura de 20°C, afetando as propriedades com os coeficientes de redução.

$$\begin{aligned}
 M_{fi,t,Rd} = & W_{pl,y} \cdot f_{yk} \cdot k_{y\theta} - 2 \cdot f_{yk} \cdot k_{y\theta} \cdot t_w \cdot (0,5h_1 - e_{pl})^2 / 2 \\
 & + 0,85 \cdot f_{ck} \cdot k_{c\theta} \cdot 2 \cdot b_1 \cdot e_{pl} \cdot (0,5 \cdot h_1 - 0,5 \cdot e_{pl}) \\
 & + 2 \cdot A_r \cdot (f_{sk} \cdot k_{s\theta} - 0,85 \cdot f_{ck} \cdot k_{c\theta}) (h - 2 \cdot e_r)
 \end{aligned} \tag{54}$$

Onde: $k_{y\theta}$ é o coeficiente de redução das propriedades mecânicas do aço do perfil; $k_{c\theta}$ é o coeficiente de redução das propriedades mecânicas do betão; $k_{s\theta}$ é o coeficiente de redução das propriedades mecânicas do aço do reforço.

5.3. Método analítico de cálculo do momento crítico

A resistência de uma viga à encurvadura lateral torsional depende do momento crítico, que representa o momento máximo que a viga, em condições ideais, pode suportar sem encurvar lateralmente. O momento crítico das vigas com dupla simetria, que se adequa as vigas em estudo, tem como base a formulação que consta no anexo B das novas regras para o projeto da estabilidade de elementos EN 1993-1-1 [19]. O momento crítico para secções com dupla simetria determina-se através da equação (55). O cálculo mencionado é utilizado para as duas condições de carga adotadas no estudo, com a variante atribuída pela escolha dos fatores dados nas tabelas 5.1 e 5.2. O momento crítico, a temperaturas elevadas, $M_{cr,\theta}$ é obtido pela equação (55) afetando os módulos de

elasticidade longitudinal E, e transversal G dos coeficientes de redução $k_{E,\theta}$ do aço carbono.

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(k_z l)^2} \left\{ \sqrt{\left[\left(\frac{k_z}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k_z l)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + [C_2 z_g]^2 \right]} - C_2 z_g \right\} \quad (55)$$

Em que:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (56)$$

I_t representa a constante de torção; I_w representa a constante de empenamento; I_z representa o momento de Inércia da secção em relação ao eixo menos resistente; l é o comprimento da viga entre apoios com restrição lateral; C_1 e C_2 são fatores que dependem do tipo de carregamento e das restrições nas extremidades; k_z e k_w são fatores de comprimento efetivo que variam entre 0,5 para restrição perfeita e 1 para ausência de restrição; k_z faz referência a rotação no plano e é análoga a fração L_{cr}/L ; k_w faz referência ao empenamento das extremidades; $z_g = |z_a - z_s|$, z_g é negativo para carregamento aplicado acima do centro de corte e positivo caso contrário; z_a é a coordenada do ponto de aplicação da carga em relação ao eixo geométrico da secção; z_s é a coordenada do centro de corte em relação ao eixo geométrico da secção.

Os coeficientes referidos anteriormente para os casos em estudo podem ser obtidos nas tabelas 5.1 e 5.2. Estes valores foram retirados do anexo B das regras de cálculo da norma EN 1993-1-1 [19], tendo em conta os tipos de carregamento deste estudo.

Tabela 5.1 – Fatores de comprimento efetivo e fatores dependentes da carga e das condições de restrição.

Tipo de carga	Valor do fator						
	k_z	k_w	k_c	$k_{c,\theta}$	C_1	C_2	C_3
Pontual	1,00	1,00	0,86	0,79	1,35	0,59	0,411
	0,50	0,50	0,86	0,79	1,05	0,48	0,338
Distribuída	1,00	1,00	0,94	0,91	1,12	0,45	0,525
	0,50	0,50	0,94	0,91	0,97	0,36	0,478

Tabela 5.2 – Fatores dependentes do centro de corte e aplicação da carga.

z_a	z_s	z_j	z_g
0,050	0,000	0,000	-0,050

5.4. Método analítico de cálculo do momento resistente de encurvadura lateral torsional

O momento de encurvadura à temperatura ambiente para as vigas parcialmente embebidas em betão pode ser determinado pela equação (57).

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT,mod} \times M_{pl,Rd} \quad (57)$$

Em que: $M_{pl,Rd}$ é obtido pela equação (53);

O coeficiente de redução modificado é obtido pela equação (58), para ter em consideração a distribuição de momentos fletores entre os travamentos laterais dos elementos.

$$\chi_{LT,mod} = \text{mínimo} \left\{ 1; \frac{1}{\lambda_{LT}^2}; \frac{\chi_{LT}}{f} \right\}; \quad (57)$$

O valor do fator de correção de χ_{LT} é obtido pela equação (59);

$$f = 1 - 0,5 \times (1 - k_c) \times \left(1 - 2 \times (\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2 \right) \quad (58)$$

O coeficiente de redução χ_{LT} é obtido pela equação (60).

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\left(\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \times \bar{\lambda}_{LT}^2} \right)}; \quad (59)$$

O valor para determinar ϕ_{LT} é obtido pela equação (61).

$$\phi_{LT} = 0,5 + \left(1 + \alpha_{LT} \times (\bar{\lambda}_{LT} - \lambda_{LT,0}) + \beta \times \bar{\lambda}_{LT}^2 \right) \quad (60)$$

O fator de imperfeição foi considerado igual a $\alpha_{LT} = 0,21$ segundo a EN1993-1-1;

A esbelteza normalizada é obtida pela equação (62).

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{M_{pl,Rd}}{M_{cr}}}; \quad (61)$$

O parâmetro para determinar o comprimento do patamar das curvas de dimensionamento para a encurvadura lateral segundo o anexo Nacional NA da NPEN1993-1-1 é dado em (63).

$$\lambda_{LT,0} = 0,2 \quad (62)$$

O fator de correção das curvas $\beta = 1,0$ segundo o anexo Nacional NA da EN1993-1-1.

O momento resistente de encurvadura a temperaturas elevadas é obtido pela equação (64), tendo em consideração a distribuição de momentos entre as restrições laterais dos elementos [10],

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi,mod} \times M_{fi,t,Rd} \quad (63)$$

Em que: $M_{fi,t,Rd}$ é obtido pela equação (54);

O coeficiente de redução modificado é obtido pela equação (65),[10]

$$\chi_{LT,fi,mod} = \text{mínimo} \left\{ 1; \frac{\chi_{LT,fi}}{f} \right\}; \quad (64)$$

O valor de f é obtido pela equação (66).

$$f = 1 - 0,5 \times (1 - k_{c,\theta}) \quad (65)$$

O coeficiente de redução $\chi_{LT,fi}$ é obtido pela equação (67).

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\left(\phi_{LT,\theta,com} + \sqrt{\phi_{LT,\theta,com}^2 - \bar{\lambda}_{LT,fi}^2} \right)}; \quad (66)$$

O valor para determinar $\phi_{LT,\theta,com}$ é obtido pela equação (68)

$$\phi_{LT,\theta,com} = 0,5 + \left(1 + \alpha \times \bar{\lambda}_{LT,fi} + \bar{\lambda}_{LT,fi}^2 \right); \quad (67)$$

O fator de imperfeição para encurvadura lateral α proposto [10] é obtido em função da tensão de cedência do aço e determinado pela equação (69)

$$\alpha = 0,65 \times \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (68)$$

A esbelteza normalizada é obtida pela equação (70)

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com} = \sqrt{\frac{M_{fi,t,Rd}}{M_{cr,\theta}}}; \quad (69)$$

O valor da tensão de cedência f_y deve ser em $[MPa]$.

5.5. Resultados à flexão em 3 pontos

O método analítico, definido pelas equações anteriores, para o cálculo do momento plástico em secções parcialmente embebidas em betão foi introduzido em folhas de cálculo automático, juntamente com o cálculo do momento plástico para perfis metálicos. Realizaram se folhas de cálculo separadas tendo em conta as temperaturas de 20, 200, 400 e 600°C para as secções parcialmente embebidas em betão PEB100, PEB200 e PEB300. Das folhas de cálculo apresentadas no anexo III as tabelas legendadas com índice impar foram utilizadas para obter as tabelas legendadas com índice par. A esbelteza dos elementos foi variada face a determinação das curvas de resistência à encurvadura para elementos metálicos e para os mesmos elementos metálicos, parcialmente embebidos em betão. É possível observar que para elementos com o mesmo

comprimento, os que se encontram parcialmente embebidos com betão possuem menor valor de esbelteza. O conjunto de gráficos que se seguem referem-se a secções IPE e PEB da série 100, 200 e 300 sujeitos a um carregamento de flexão em três pontos.

Na figura 5.3 esta representada a resistência dos elementos IPE100 a) e PEB100 b), à temperatura de 20°C. Para o mesmo comprimento efetivo os elementos PEB apresentam maior resistência à encurvadura lateral torsional. O aumento de resistência depende do comprimento do elemento, que nestes casos variam de 19% (L=2,4) até 80% (L=5,4).

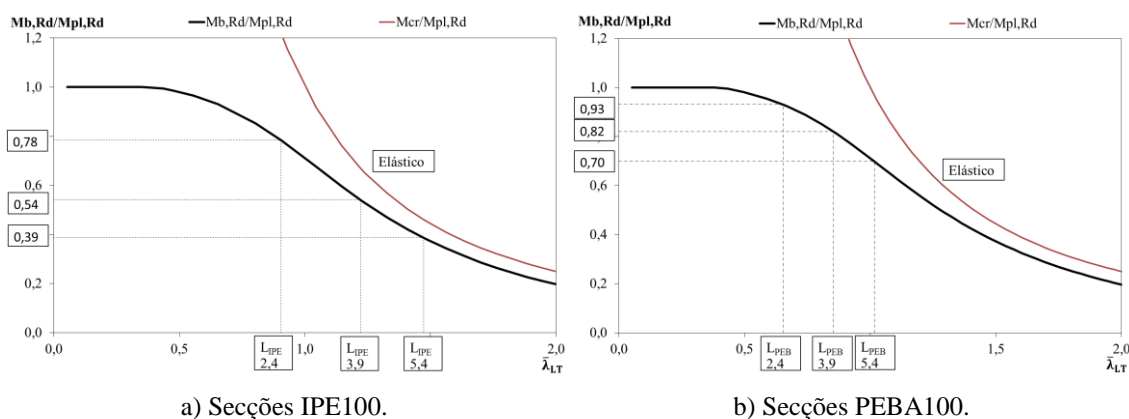


Figura 5.3.- Resistência à encurvadura a 20°C.

Na figura 5.4 está representada a resistência dos elementos IPE100 a) e PEB100 b) à temperatura de 200°C. A curva de projeto é bastante diferente da curva à temperatura ambiente, sendo o patamar inicial totalmente modificado. O aumento da resistência dos elementos PEB em relação ao elemento metálico de igual dimensão varia com o comprimento, verificando-se um incremento de 29, 49 e de 63% para os três comprimentos considerados, L=2,4, L=3,9 e L=5,4 respetivamente.

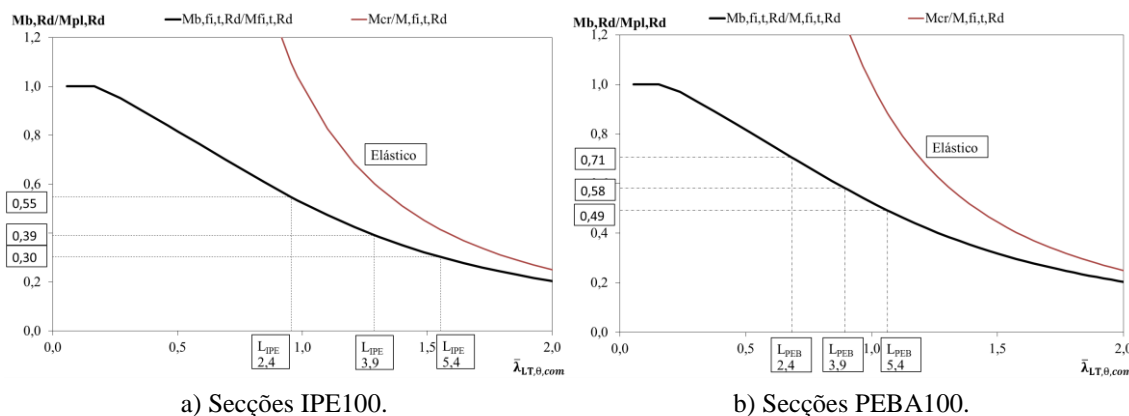


Figura 5.4 - Resistência à encurvadura a 200°C.

Na figura 5.5 está representada a resistência dos elementos IPE100 a) e PEB100 b) à temperatura de 400°C. O aumento da resistência dos elementos PEB em relação ao elemento metálico de igual dimensão varia com o comprimento, verificando-se um incremento de 40, 64 e de 80% para os três comprimentos considerados, L=2,4, L=3,9 e L=5,4 respetivamente.

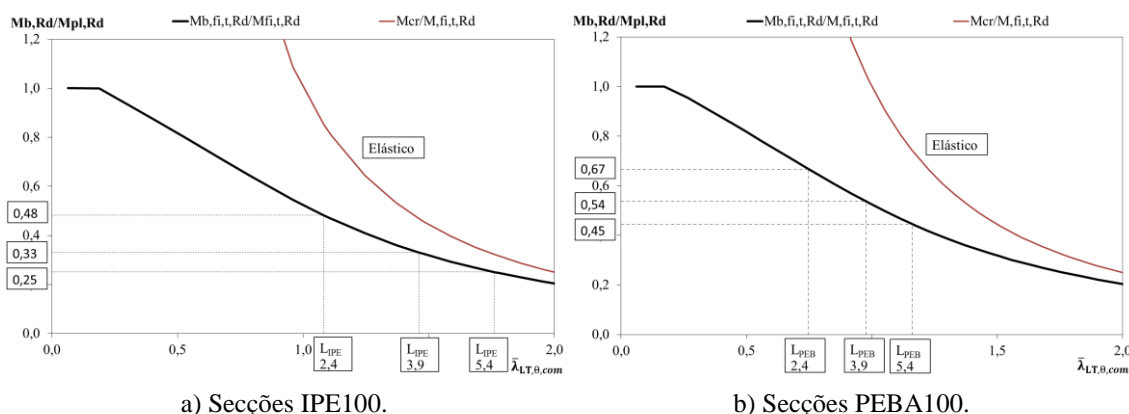


Figura 5.5 - Resistência à encurvadura a 400°C.

Na figura 5.6 está representada a resistência dos elementos IPE100 a) e PEB100 b) à temperatura de 600°C. O aumento da resistência dos elementos PEB em relação ao elemento metálico de igual dimensão varia com o comprimento, verificando-se um incremento de 36, 59 e de 75% para os três comprimentos considerados, L=2,4, L=3,9 e L=5,4 respetivamente.

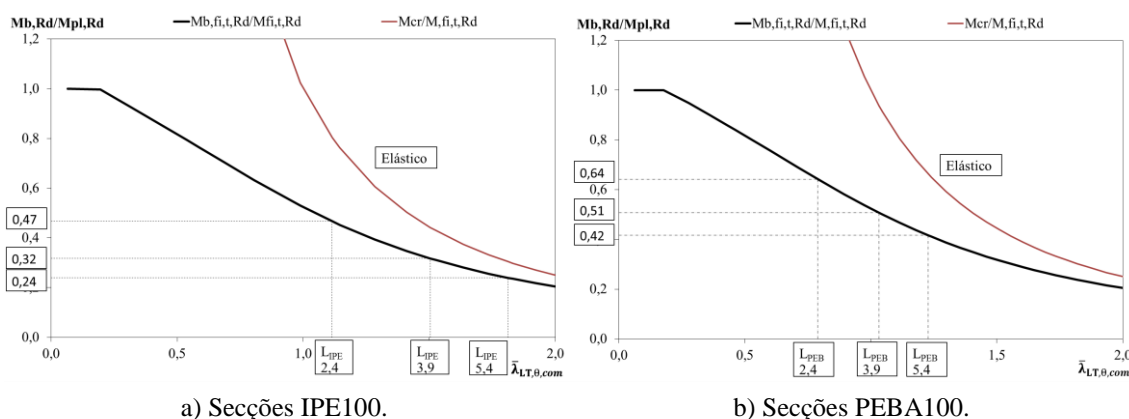
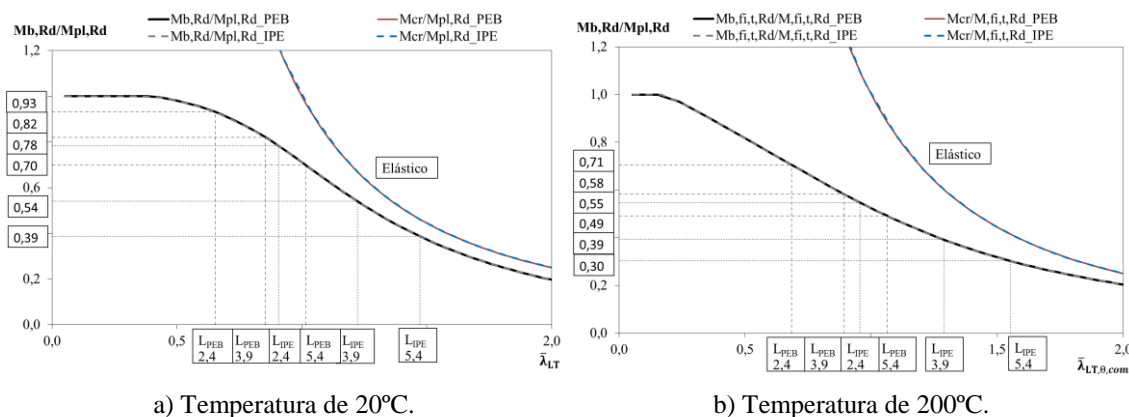


Figura 5.6 - Resistência à encurvadura a 600°C.

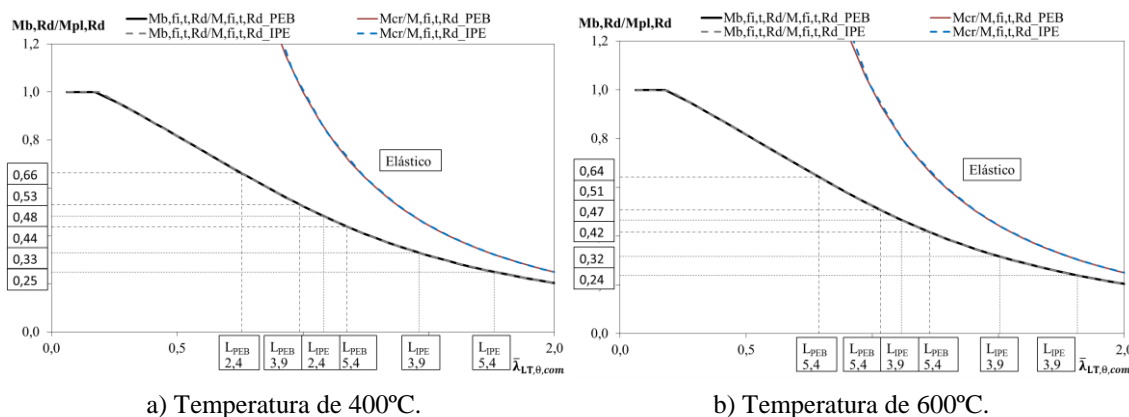
Na figura 5.7 é feita a comparação de resistência entre os elementos IPE100 e PEB100 à temperatura de 20°C a) e 200°C b). Verifica-se que o traçado da esbelteza é idêntico com a diferença que as PEB possuem menor esbelteza quando comparadas com

o perfil metálico. A comparação entre a) e b) permite ver que o aumento de temperatura faz diminuir a resistência dos elementos.



a) Temperatura de 20°C. b) Temperatura de 200°C.
 Figura 5.7 – Comparação da resistência à encurvadura entre IPE100 e PEBA100.

Na figura 5.8 é feita a comparação de resistência entre os elementos IPE100 e o elemento PEB100 à temperatura de 400°C a) e 600°C b). Verifica-se que de 400°C para 600°C a redução da resistência é tão significativa, quando comparada com a perda de resistência de 20°C para 200°C.



a) Temperatura de 400°C. b) Temperatura de 600°C.
 Figura 5.8 - Comparação da resistência à encurvadura entre IPE100 e PEBA100.

Na figura 5.9 está representada a resistência dos elementos IPE200 a) e PEB200 b), à temperatura de 20°C. Para o mesmo comprimento efetivo os elementos PEB apresentam maior resistência à encurvadura lateral torsional. O aumento de resistência depende do comprimento do elemento, que nestes casos variam de 5% (L=2,4) até 58% (L=5,4).

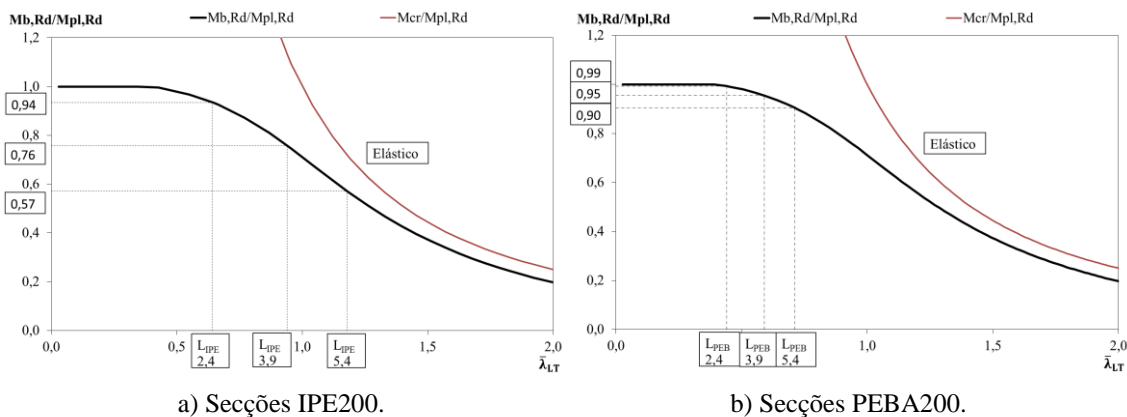


Figura 5.9 - Resistência à encurvadura a 20°C.

Na figura 5.10 está representada a resistência dos elementos IPE200 a) e PEB200 b) à temperatura de 200°C. O aumento da resistência dos elementos PEB em relação a elemento metálico de igual dimensão varia com o comprimento, verificando-se um incremento de 18, 42 e de 63% para os três comprimentos considerados, L=2,4, L=3,9 e L=5,4 respetivamente.

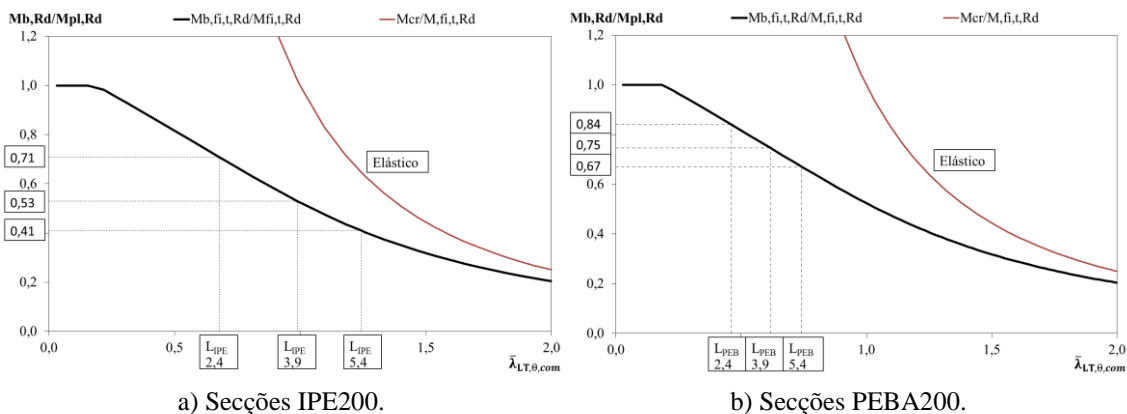


Figura 5.10 - Resistência à encurvadura a 200°C.

Na figura 5.11 está representada a resistência dos elementos IPE200 a) e PEB200 b) à temperatura de 400°C. O aumento da resistência dos elementos PEB em relação a elemento metálico de igual dimensão varia com o comprimento, verificando-se um incremento de 26, 57 e de 80% para os três comprimentos considerados, L=2,4, L=3,9 e L=5,4 respetivamente.

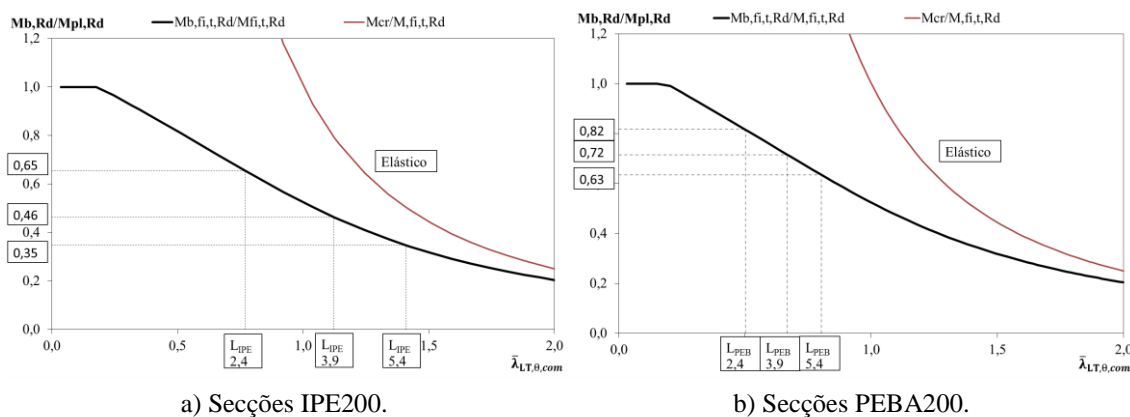


Figura 5.11 - Resistência à encurvadura a 400°C.

Na figura 5.12 está representada a resistência dos elementos IPE200 a) e PEB200 b) à temperatura de 600°C. O aumento da resistência dos elementos PEB em relação ao elemento metálico de igual dimensão varia com o comprimento, verificando-se um incremento de 25, 53 e de 82% para os três comprimentos considerados, L=2,4, L=3,9 e L=5,4 respetivamente.

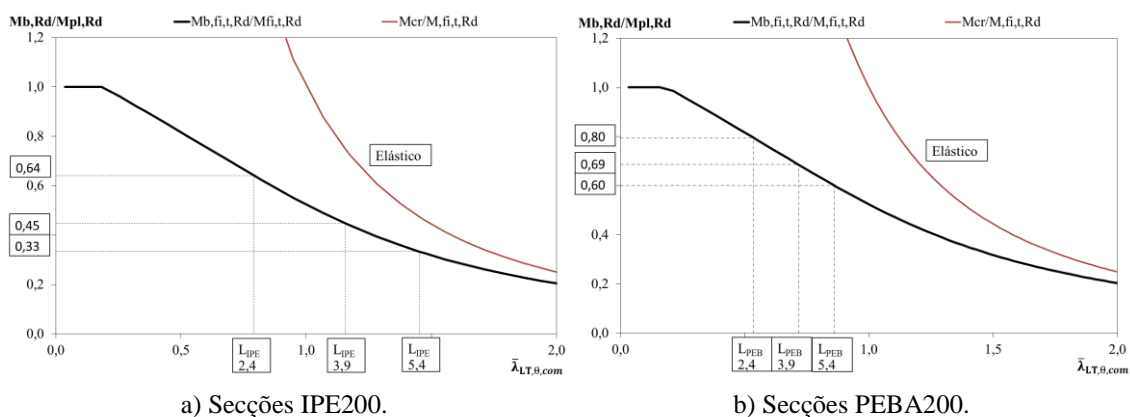


Figura 5.12 - Resistência à encurvadura a 600°C.

Na figura 5.13 é feita a comparação de resistência entre os elementos IPE200 e PEB200 à temperatura de 20°C a) e 200°C b). Verifica-se que o traçado da esbelteza é idêntico com a diferença que as PEB possuem menor esbelteza quando comparadas com o perfil metálico. A comparação entre a) e b) permite ver que o aumento de temperatura faz diminuir a resistência dos elementos.

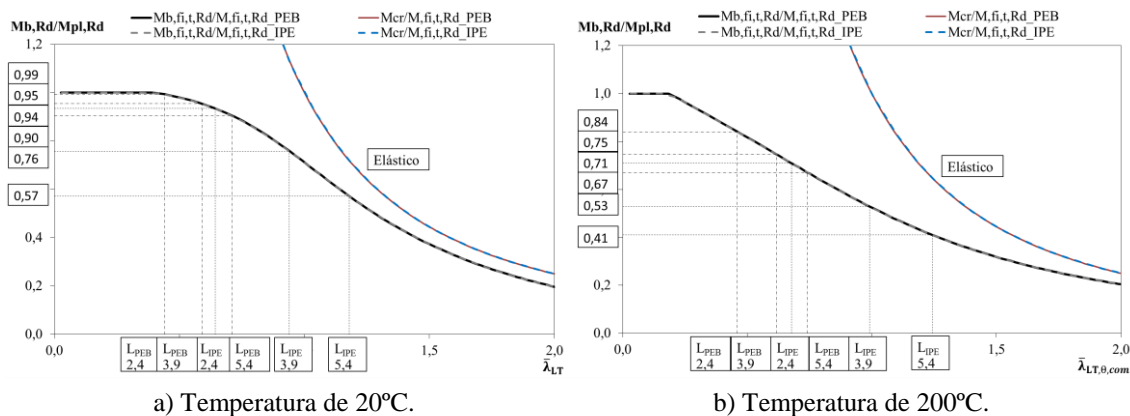


Figura 5.13 - Comparação da resistência à encurvadura entre IPE200 e PEBA200.

Na figura 5.14 é feita a comparação de resistência entre os elementos IPE200 e o elemento PEB200 à temperatura de 400°C a) e 600°C b). Verifica-se que de 400°C para 600°C a redução da resistência é tão significativa, quando comparada com a perda de resistência de 20°C para 200°C.

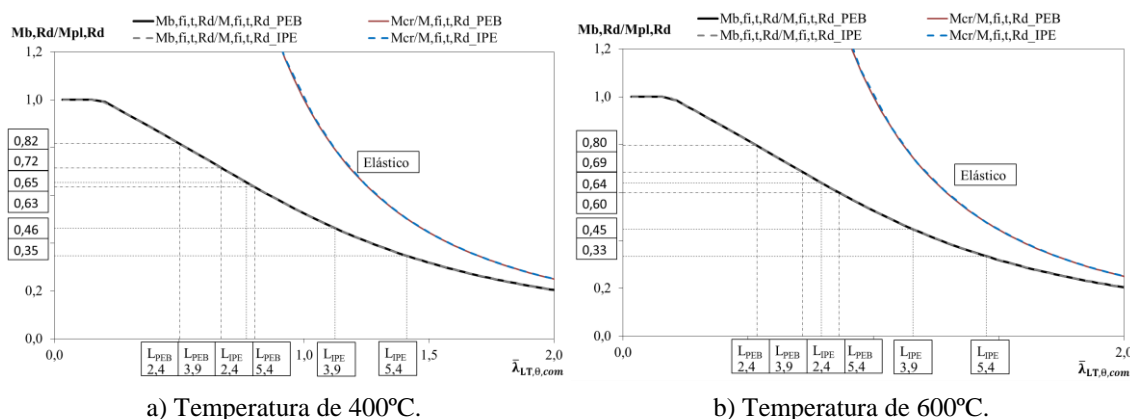


Figura 5.14 - Comparação da resistência à encurvadura entre IPE200 e PEBA200.

Na figura 5.15 está representada a resistência dos elementos IPE300 a) e PEB300 b), à temperatura de 20°C. Para o mesmo comprimento efetivo os elementos PEB apresentam maior resistência à encurvadura lateral torsional. O aumento de resistência depende do comprimento do elemento, que nestes casos variam de 1% (L=2,4) até 26% (L=5,4). No caso do elemento PEB300 com o comprimento de 2,4 metros, verifica-se que resistência à flexão é determinada pelo momento plástico da secção.

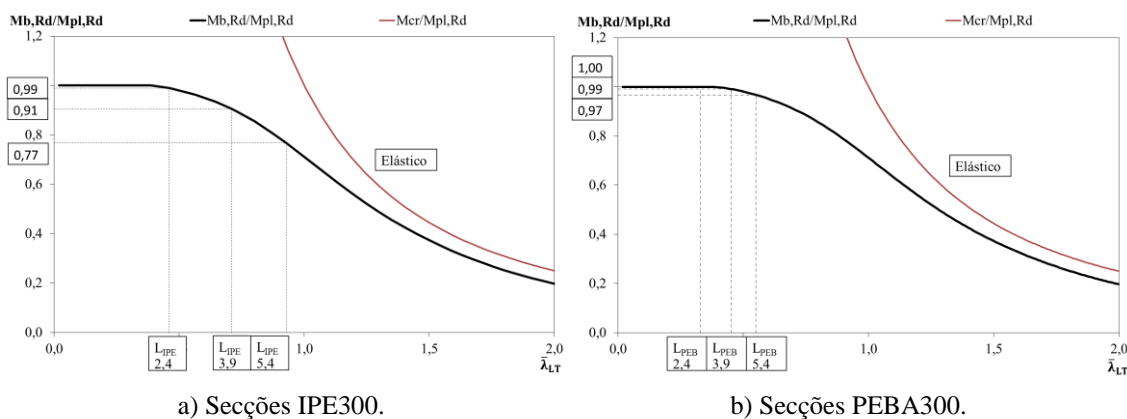


Figura 5.15 - Resistência à encurvadura a 20°C.

Na figura 5.16 está representada a resistência dos elementos IPE300 a) e PEB300 b) à temperatura de 200°C. O aumento da resistência dos elementos PEB em relação ao elemento metálico de igual dimensão varia com o comprimento, verificando-se um incremento de 10, 24 e de 43% para os três comprimentos considerados, L=2,4, L=3,9 e L=5,4 respectivamente.

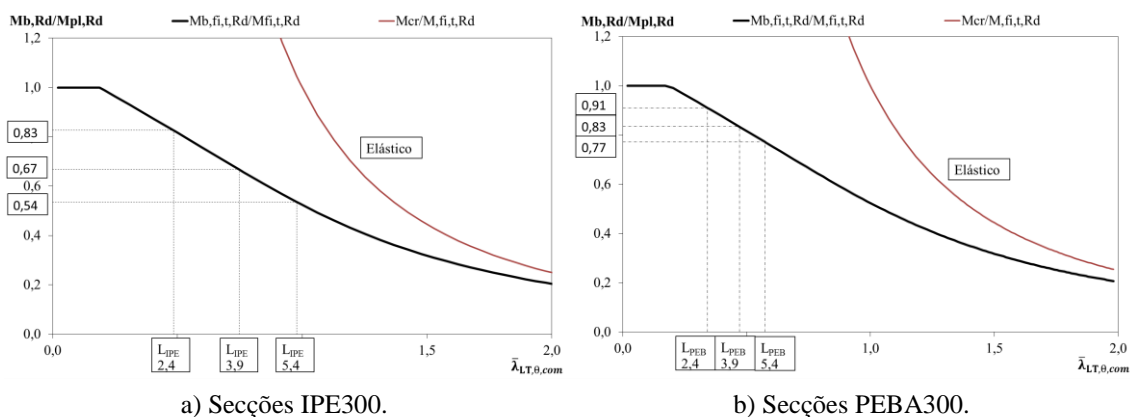


Figura 5.16 - Resistência à encurvadura a 200°C.

Na figura 5.17 está representada a resistência dos elementos IPE300 a) e PEB300 b) à temperatura de 400°C. O aumento da resistência dos elementos PEB em relação ao elemento metálico de igual dimensão varia com o comprimento, verificando-se um incremento de 13, 33 e de 60% para os três comprimentos considerados, L=2,4, L=3,9 e L=5,4 respectivamente.

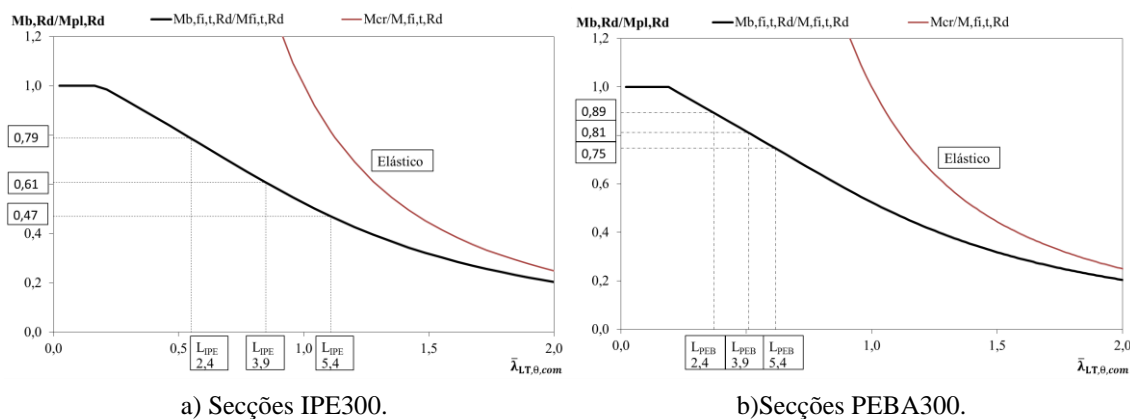


Figura 5.17 - Resistência à encurvadura a 400°C.

Na figura 5.18 está representada a resistência dos elementos IPE300 a) e PEB300 b) à temperatura de 600°C. O aumento da resistência dos elementos PEB em relação ao elemento metálico de igual dimensão varia com o comprimento, verificando-se um incremento de 13, 34 e de 60% para os três comprimentos considerados, L=2,4, L=3,9 e L=5,4 respetivamente.

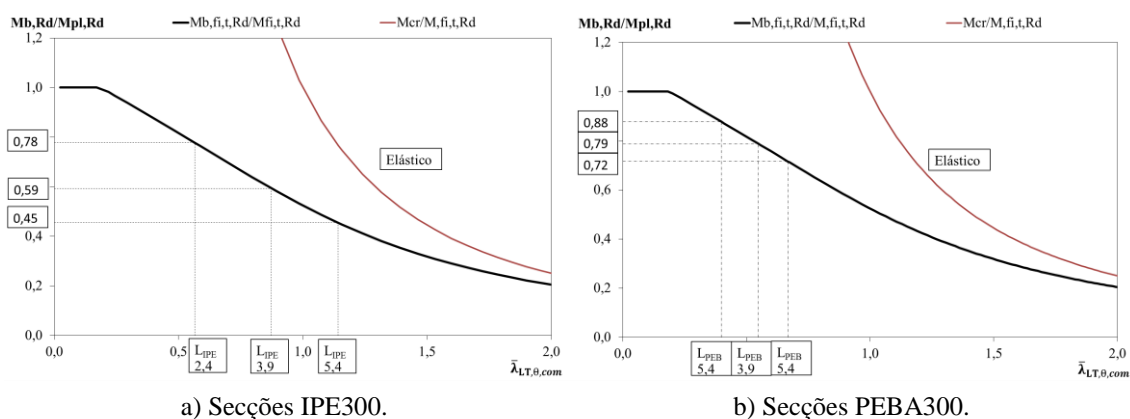
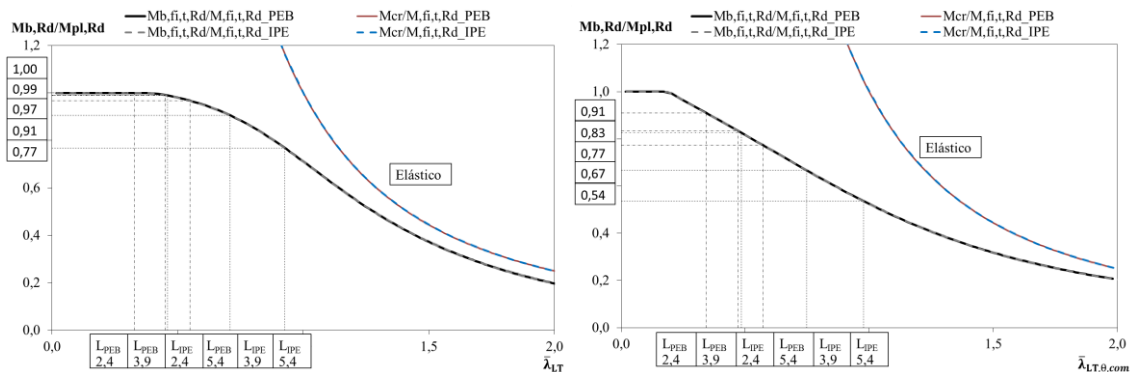


Figura 5.18 - Resistência à encurvadura a 600°C.

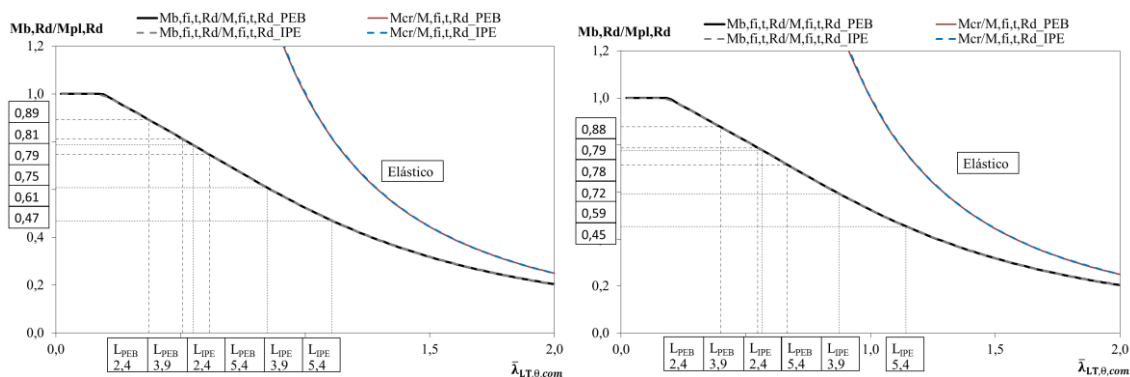
Na figura 5.19 é feita a comparação de resistência entre os elementos IPE300 e PEB300 à temperatura de 20°C a) e 200°C b). Verifica-se que o traçado da esbelteza é idêntico com a diferença que as PEB possuem menor esbelteza quando comparadas com o perfil metálico. A comparação entre a) e b) permite ver que o aumento de temperatura faz diminuir a resistência dos elementos.



a) Temperatura de 20°C. b) Temperatura de 200°C.

Figura 5.19 - Comparação da resistência à encurvadura entre IPE300 e PEBA300.

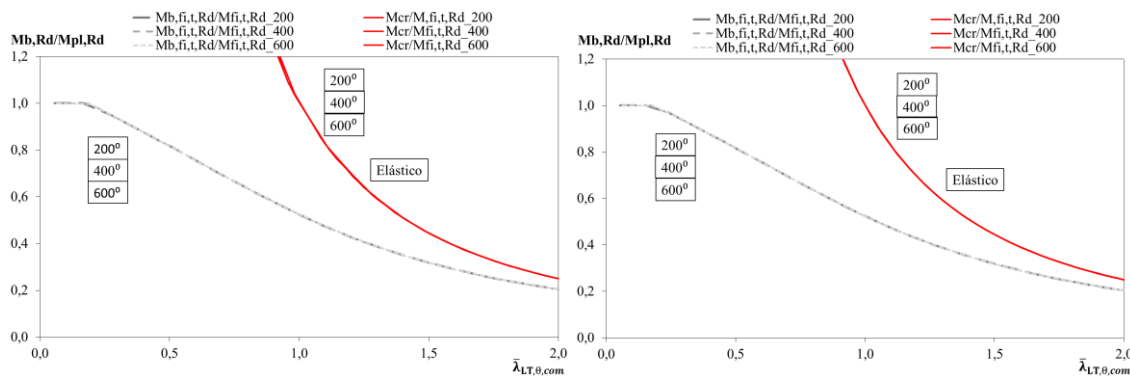
Na figura 5.20 é feita a comparação de resistência entre os elementos IPE300 e elemento PEB300 à temperatura de 400°C a) e 600°C b). Verifica-se que de 400°C para 600°C a redução da resistência é tão significativa, quando comparada com a perda de resistência de 20°C para 200°C.



a) Temperatura de 400°C. b) Temperatura de 600°C.

Figura 5.20 - Comparação da resistência à encurvadura entre IPE300 e PEBA300.

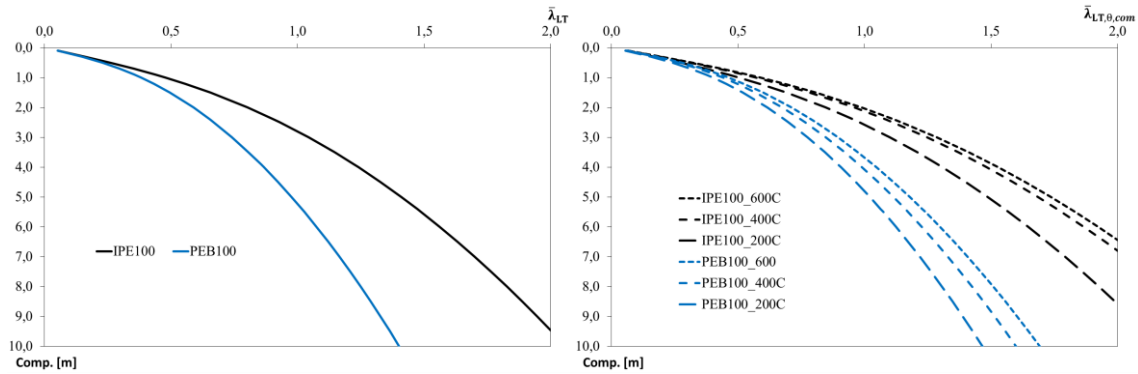
Na figura 5.21 onde estão sobrepostos os gráficos de resistência à encurvadura lateral torsional para várias temperaturas para elementos IPE a) e PEB b).



a) Secções IPE100. b) Secções PEB100.

Figura 5.21 – Comparação da resistência à encurvadura a várias temperaturas.

A figura 5.22 apresenta a comparação da esbelteza entre elementos IPE e PEB à temperatura ambiente a) e a temperaturas elevadas b). Como é possível ver a esbelteza aumenta com o aumento da temperatura sendo que esta é menor em secções PEB do que em secções IPE.



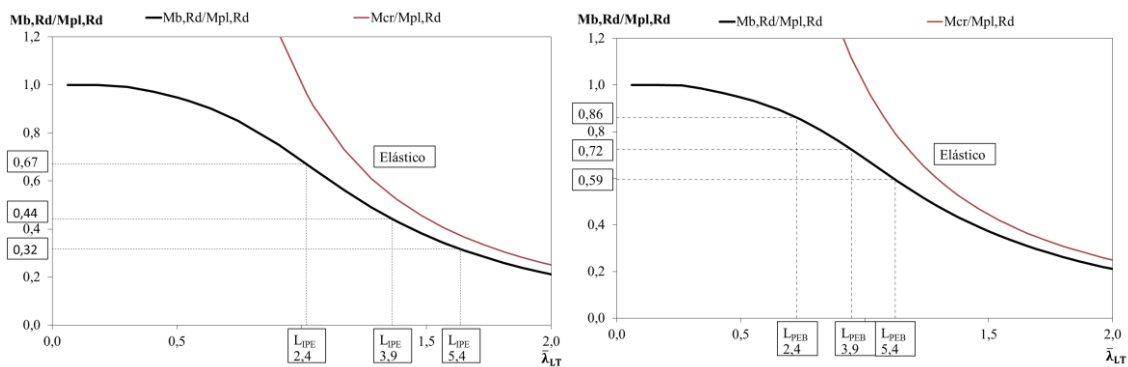
a) Temperatura de 20°C.

b) Temperatura de 200, 400 e 600°C.

Figura 5.22 – Comparação da esbelteza entre IPE100 e PEB100.

5.6. Resultados à flexão por carga distribuída

O conjunto de gráficos que se seguem referem-se a secções IPE e PEB de 100, 200 e 300 sujeitos a um carregamento uniforme. Na figura 5.23 está representada a resistência dos elementos IPE100 a) e PEB100 b), à temperatura de 20°C. Para o mesmo comprimento efetivo os elementos PEB apresentam maior resistência à encurvadura lateral torsional. O aumento de resistência depende do comprimento do elemento, que nestes casos variam de 28% (L=2,4) até 84% (L=5,4).



a) Secções IPE100.

b) Secções PEBB100.

Figura 5.23 - Resistência à encurvadura a 20°C.

Na figura 5.24 está representada a resistência dos elementos IPE100 a) e PEB100 b) à temperatura de 200°C. O aumento da resistência dos elementos PEB em relação ao elemento metálico de igual dimensão varia com o comprimento, verificando-se um incremento de 35, 56 e de 71% para os três comprimentos considerados, L=2,4, L=3,9 e L=5,4 respetivamente.

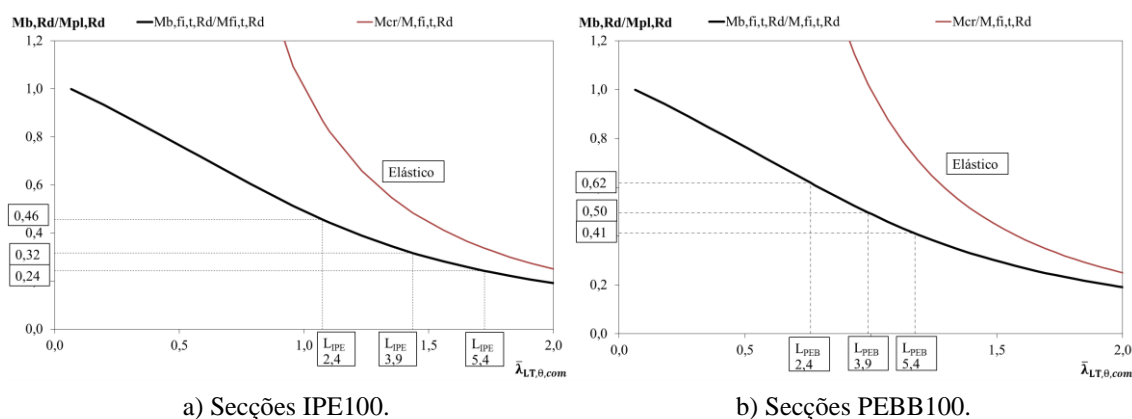


Figura 5.24 - Resistência à encurvadura a 200°C.

Na figura 5.25 está representada a resistência dos elementos IPE100 a) e PEB100 b) à temperatura de 400°C. O aumento da resistência dos elementos PEB em relação ao elemento metálico de igual dimensão varia com o comprimento, verificando-se um incremento de 49, 73 e de 85% para os três comprimentos considerados, L=2,4, L=3,9 e L=5,4 respetivamente.

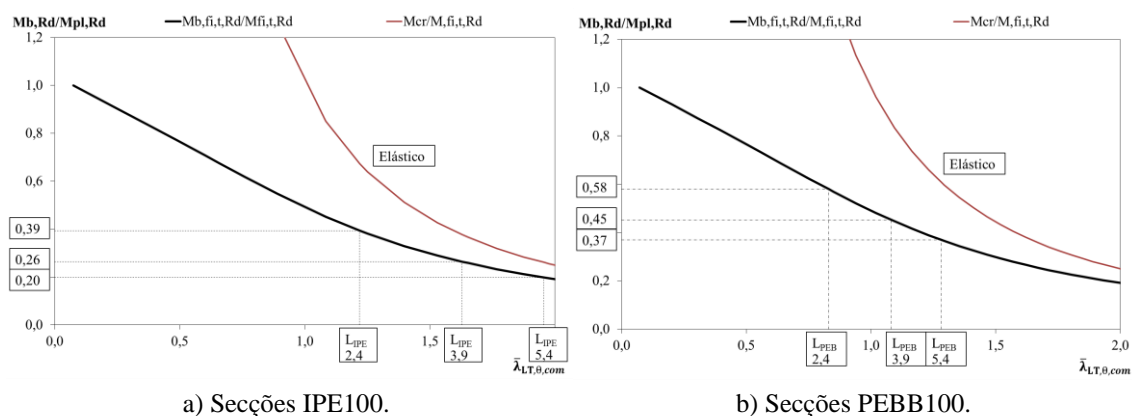


Figura 5.25 - Resistência à encurvadura a 400°C.

Na figura 5.26 está representada a resistência dos elementos IPE100 a) e PEB100 b) à temperatura de 600°C. O aumento da resistência dos elementos PEB em relação ao elemento metálico de igual dimensão varia com o comprimento, verificando-se um

incremento de 47, 76 e de 84% para os três comprimentos considerados, $L=2,4$, $L=3,9$ e $L=5,4$ respetivamente.

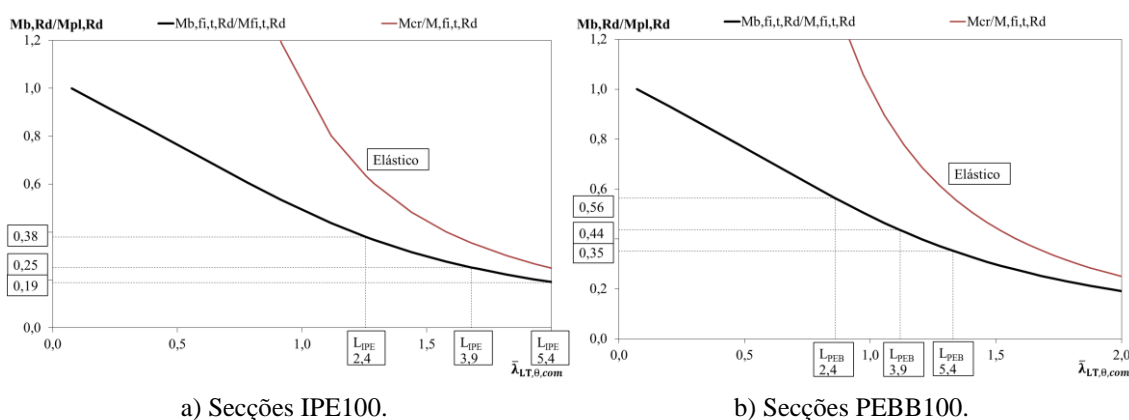


Figura 5.26 - Resistência à encurvadura a 600°C.

Na figura 5.27 é feita a comparação de resistência entre os elementos IPE100 e PEB100 à temperatura de 20°C a) e 200°C b). Verifica-se que o traçado da esbelteza é idêntico com a diferença que as PEB possuem menor esbelteza quando comparadas com o perfil metálico. A comparação entre a) e b) permite ver que o aumento de temperatura faz diminuir a resistência dos elementos.

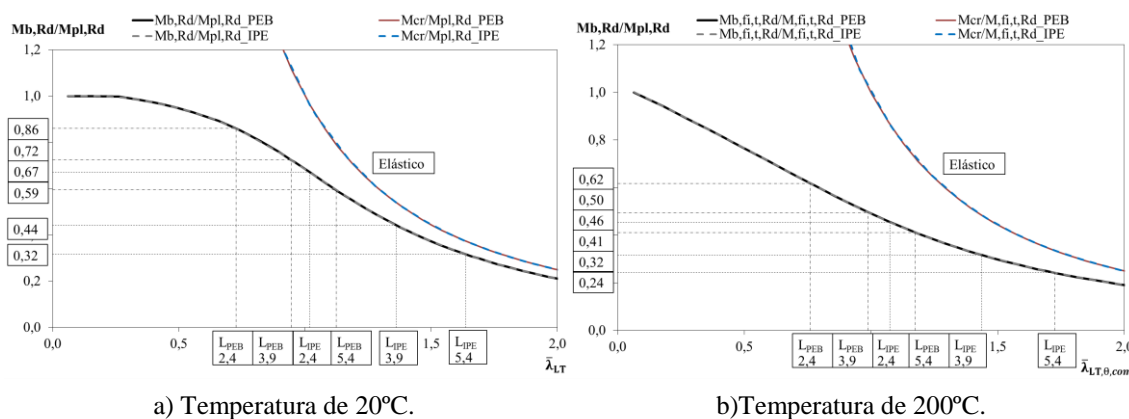
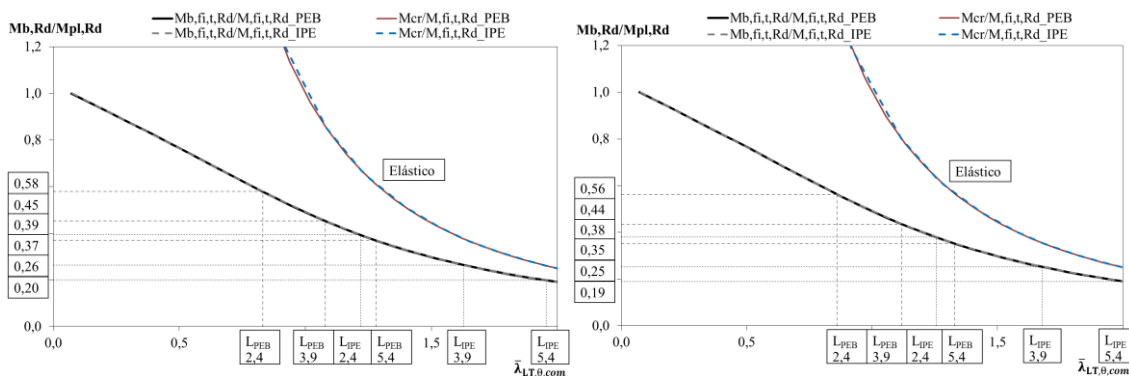


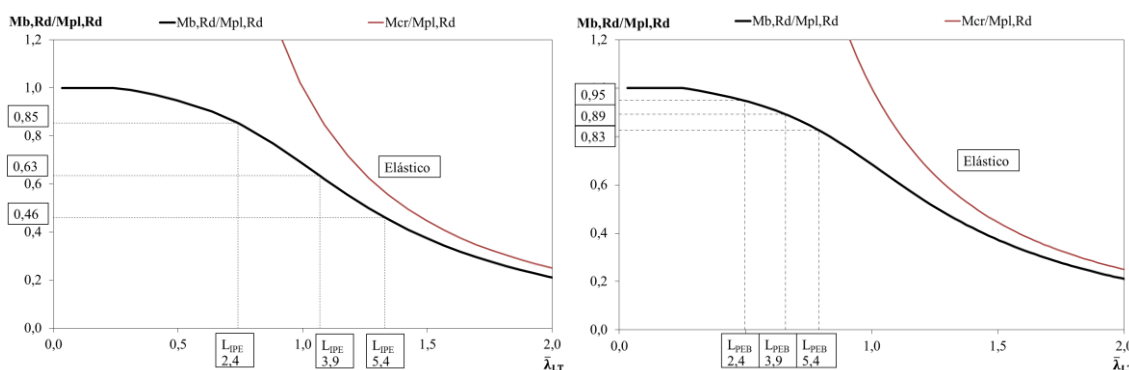
Figura 5.27 - Comparação da resistência à encurvadura entre IPE100 e PEBB100.

Na figura 5.28 é feita a comparação de resistência entre os elementos IPE100 e o elemento PEB100 à temperatura de 400°C a) e 600°C b). Verifica-se que de 400°C para 600°C a redução da resistência é tão significativa, quando comparada com a perda de resistência de 20°C para 200°C.



a) Temperatura de 400°C. b) Temperatura de 600°C.
 Figura 5.28 - Comparação da resistência à encurvadura entre IPE100 e PEBB100.

Na figura 5.29 está representada a resistência dos elementos IPE200 a) e PEB200 b), à temperatura de 20°C. Para o mesmo comprimento efetivo os elementos PEB apresentam maior resistência à encurvadura lateral torsional. O aumento de resistência depende do comprimento do elemento, que nestes casos variam de 12% (L=2,4) até 80% (L=5,4).



a) Seções IPE200. b) Seções PEBB200.

Figura 5.29 - Resistência à encurvadura a 20°C

Na figura 5.30 está representada a resistência dos elementos IPE200 a) e PEB200 b) à temperatura de 200°C. O aumento da resistência dos elementos PEB em relação ao elemento metálico de igual dimensão varia com o comprimento, verificando-se um incremento de 25, 53 e de 76% para os três comprimentos considerados, L=2,4, L=3,9 e L=5,4 respetivamente.

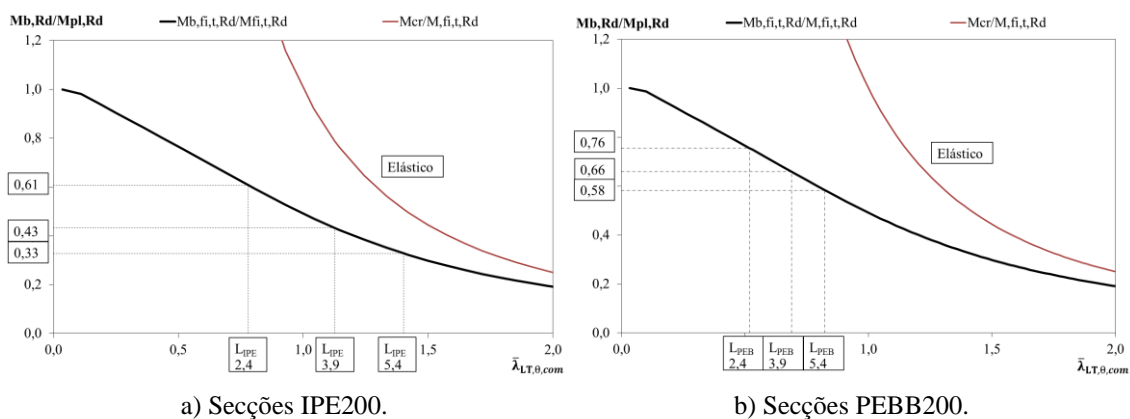


Figura 5.30 - Resistência à encurvadura a 200°C.

Na figura 5.31 está representada a resistência dos elementos IPE200 a) e PEB200 b) à temperatura de 400°C. O aumento da resistência dos elementos PEB em relação ao elemento metálico de igual dimensão varia com o comprimento, verificando-se um incremento de 33, 70 e de 104% para os três comprimentos considerados, L=2,4, L=3,9 e L=5,4 respectivamente.

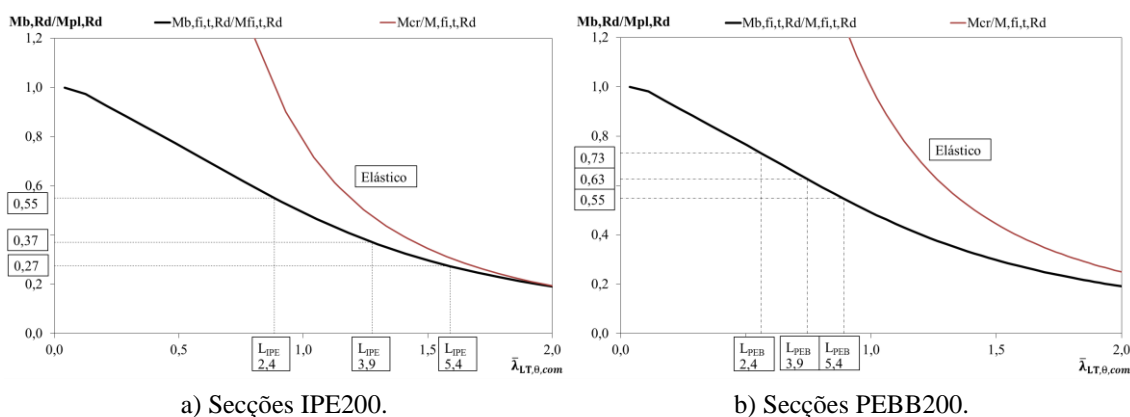


Figura 5.31 - Resistência à encurvadura a 400°C.

Na figura 5.32 está representada a resistência dos elementos IPE200 a) e PEB200 b) à temperatura de 600°C. O aumento da resistência dos elementos PEB em relação ao elemento metálico de igual dimensão varia com o comprimento, verificando-se um incremento de 26, 56 e de 80% para os três comprimentos considerados, L=2,4, L=3,9 e L=5,4 respectivamente.

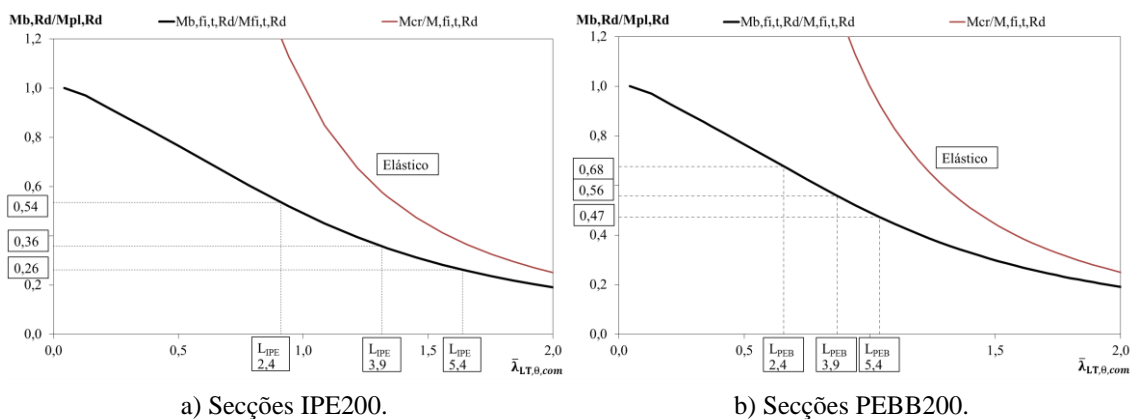


Figura 5.32 - Resistência à encurvadura a 600°C.

Na figura 5.33 é feita a comparação de resistência entre os elementos IPE200 e PEB200 à temperatura de 20°C a) e 200°C b). Verifica-se que o traçado da esbelteza é idêntico com a diferença que as PEB possuem menor esbelteza quando comparadas com o perfil metálico. A comparação entre a) e b) permite ver que o aumento de temperatura faz diminuir a resistência dos elementos.

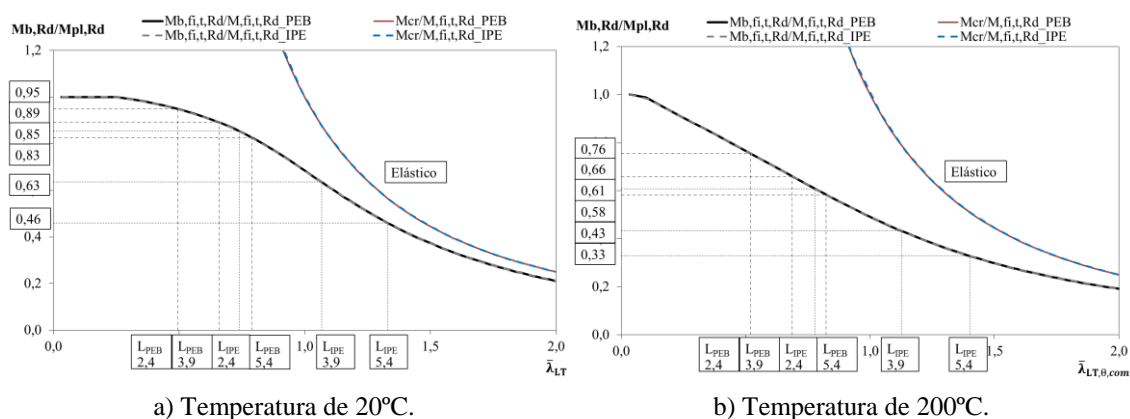


Figura 5.33 - Comparação da resistência à encurvadura entre IPE200 e PEBB200

Na figura 5.34 é feita a comparação de resistência entre os elementos IPE200 e elemento PEB200 à temperatura de 400°C a) e 600°C b). Verifica-se que de 400°C para 600°C a redução da resistência é tão significativa, quando comparada com a perda de resistência de 20°C para 200°C.

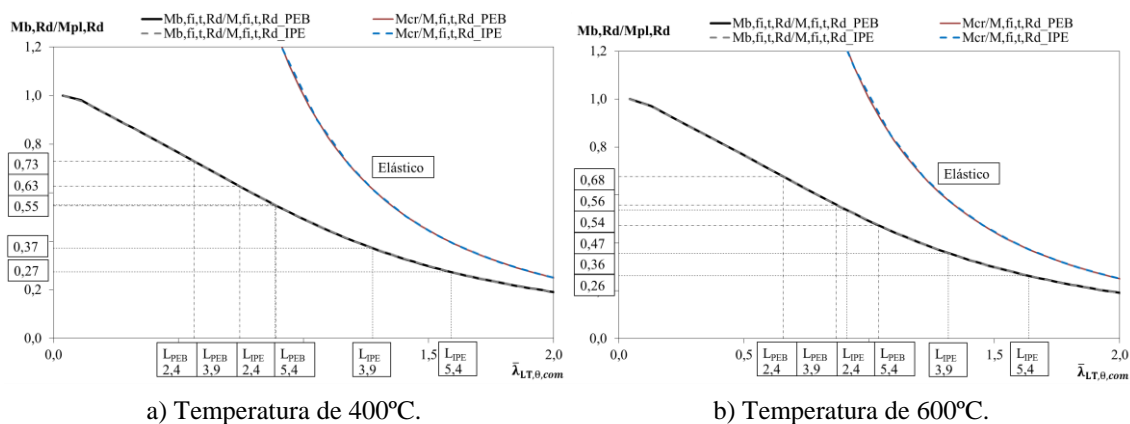


Figura 5.34 - Comparação da resistência à encurvadura entre IPE200 e PEBB200.

Na figura 5.35 está representada a resistência dos elementos IPE300 a) e PEB300 b), à temperatura de 20°C. Para o mesmo comprimento efetivo os elementos PEB apresentam maior resistência à encurvadura lateral torsional. O aumento de resistência depende do comprimento do elemento, que nestes casos variam de 4% (L=2,4) até 42% (L=5,4).

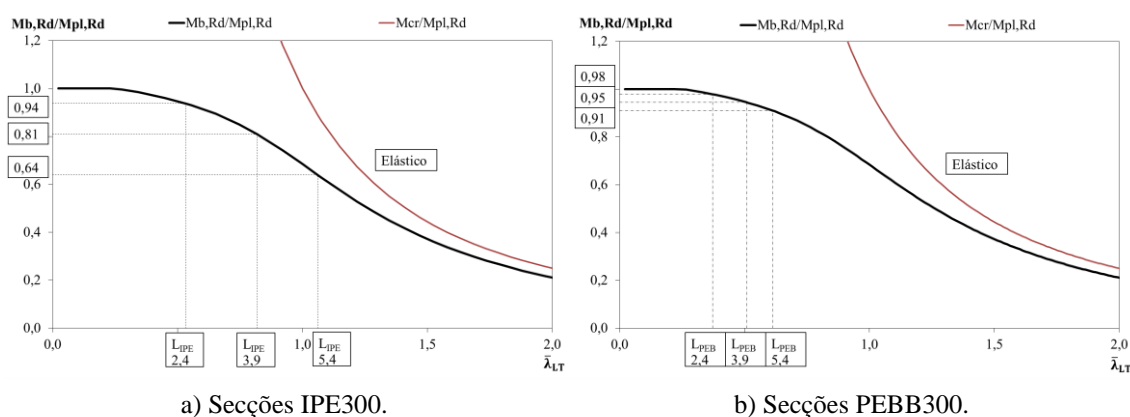


Figura 5.35 - Resistência à encurvadura a 20°C

Na figura 5.36 está representada a resistência dos elementos IPE300 a) e PEB300 b) à temperatura de 200°C. O aumento da resistência dos elementos PEB em relação ao elemento metálico de igual dimensão varia com o comprimento, verificando-se um incremento de 14, 34 e de 57% para os três comprimentos considerados, L=2,4, L=3,9 e L=5,4 respetivamente.

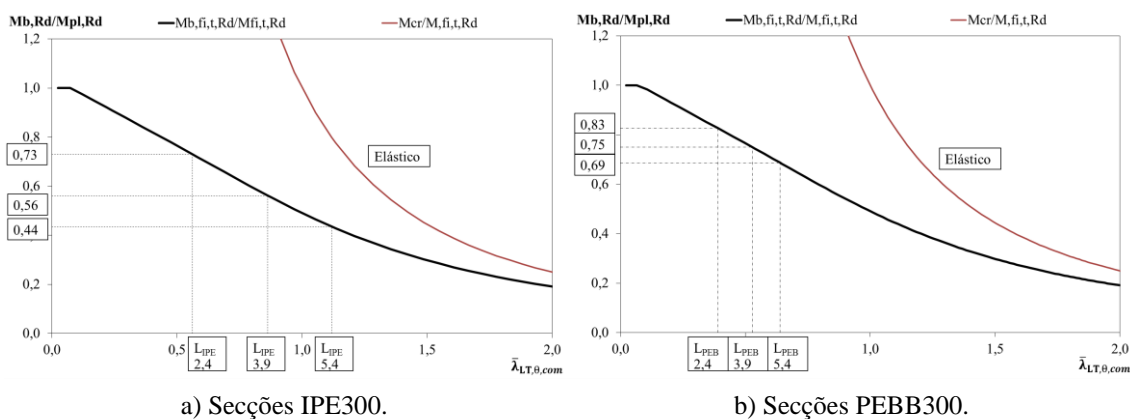


Figura 5.36 - Resistência à encurvadura a 200°C

Na figura 5.37 está representada a resistência dos elementos IPE300 a) e PEB300 b) à temperatura de 400°C. O aumento da resistência dos elementos PEB em relação ao elemento metálico de igual dimensão varia com o comprimento, verificando-se um incremento de 17, 46 e de 78% para os três comprimentos considerados, L=2,4, L=3,9 e L=5,4 respetivamente.

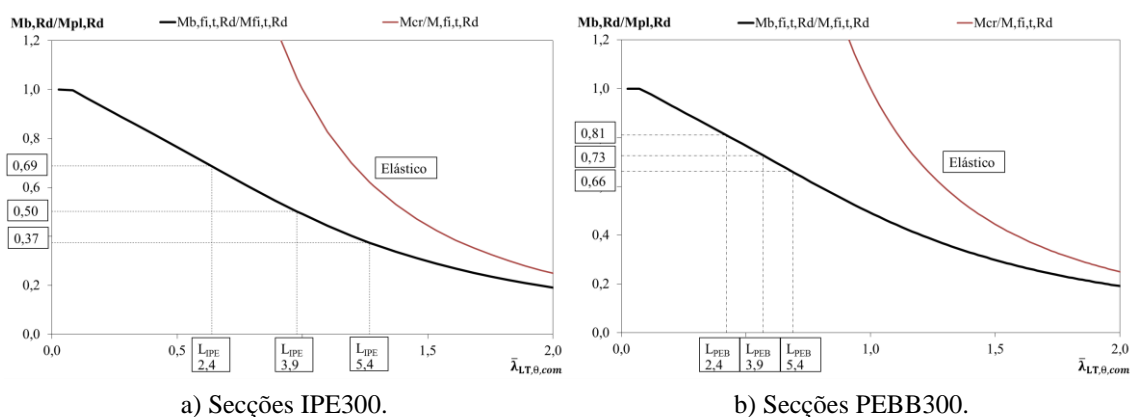


Figura 5.37 - Resistência à encurvadura a 400°C

Na figura 5.38 está representada a resistência dos elementos IPE300 a) e PEB300 b) à temperatura de 600°C. O aumento da resistência dos elementos PEB em relação ao elemento metálico de igual dimensão varia com o comprimento, verificando-se um incremento de 16, 43 e de 75% para os três comprimentos considerados, L=2,4, L=3,9 e L=5,4 respetivamente.

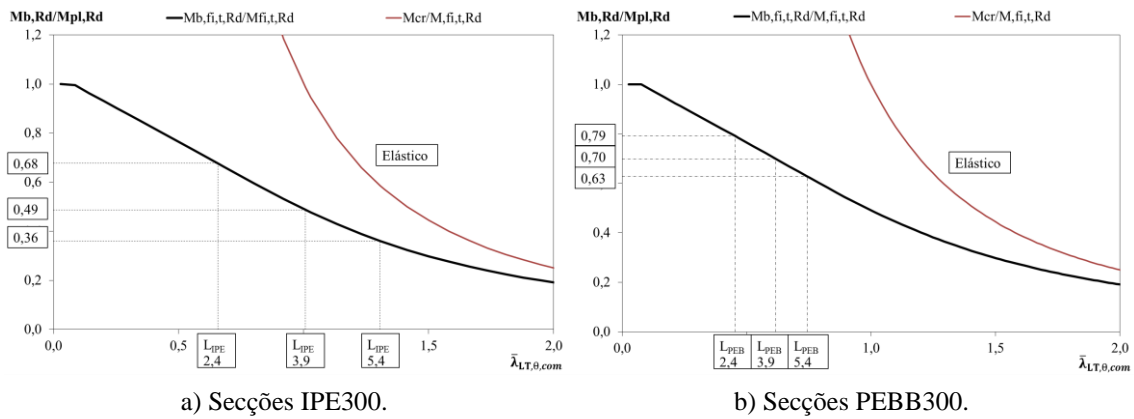


Figura 5.38 - Resistência à encurvadura a 600°C.

Na figura 5.39 é feita a comparação de resistência entre os elementos IPE300 e PEB300 à temperatura de 20°C a) e 200°C b). Verifica-se que o traçado da esbelteza é idêntico com a diferença que as PEB possuem menor esbelteza quando comparadas com o perfil metálico. A comparação entre a) e b) permite ver que o aumento de temperatura faz diminuir a resistência dos elementos.

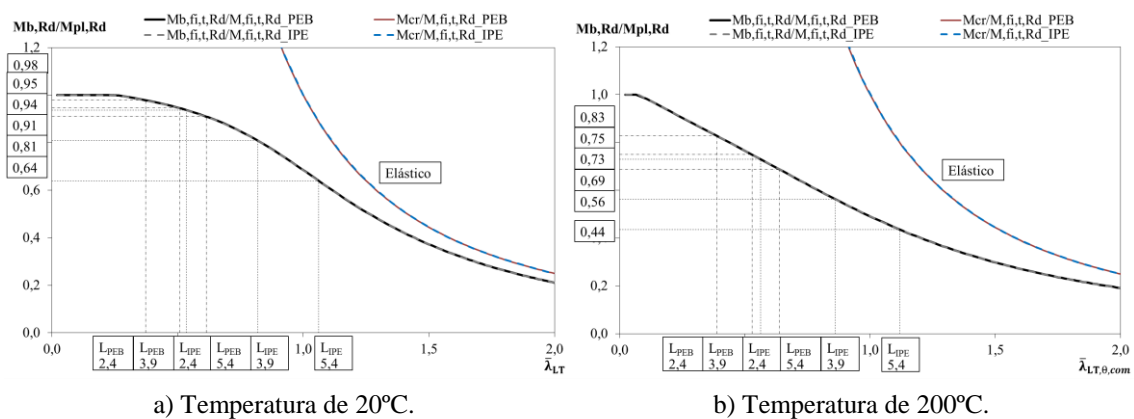
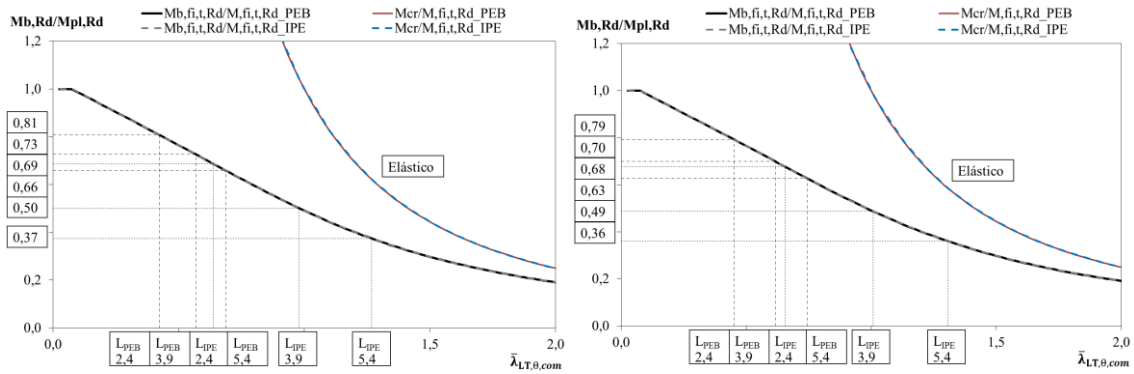


Figura 5.39 - Comparação da resistência à encurvadura entre IPE300 e PEBB300.

Na figura 5.40 é feita a comparação de resistência entre os elementos IPE300 e o elemento PEB300 à temperatura de 400°C a) e 600°C b). Verifica-se que de 400°C para 600°C a redução da resistência é tão significativa, quando comparada com a perda de resistência de 20°C para 200°C.

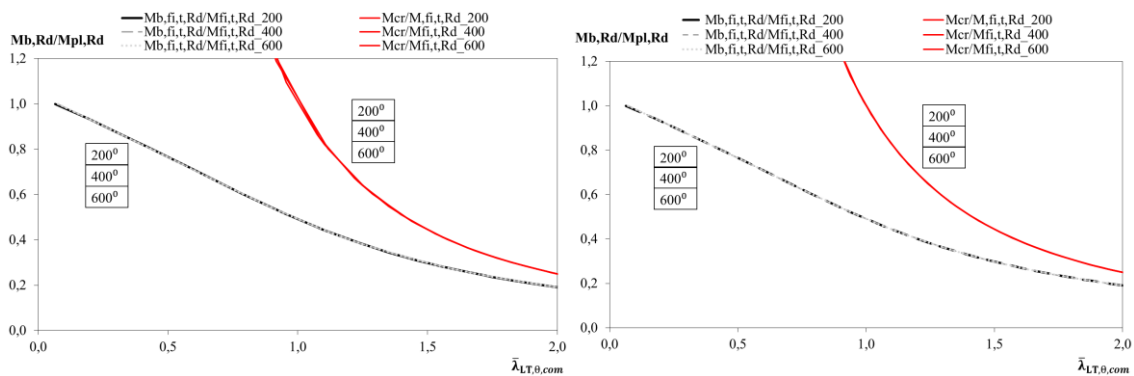


a) Temperatura de 400°C.

b) Temperatura de 600°C.

Figura 5.40 Comparação da resistência à encurvadura entre IPE300 e PEBB300

Na figura 5.41 onde estão sobrepostos os gráficos de resistência à encurvadura lateral torsional para várias temperaturas para elementos IPE a) e PEB b).

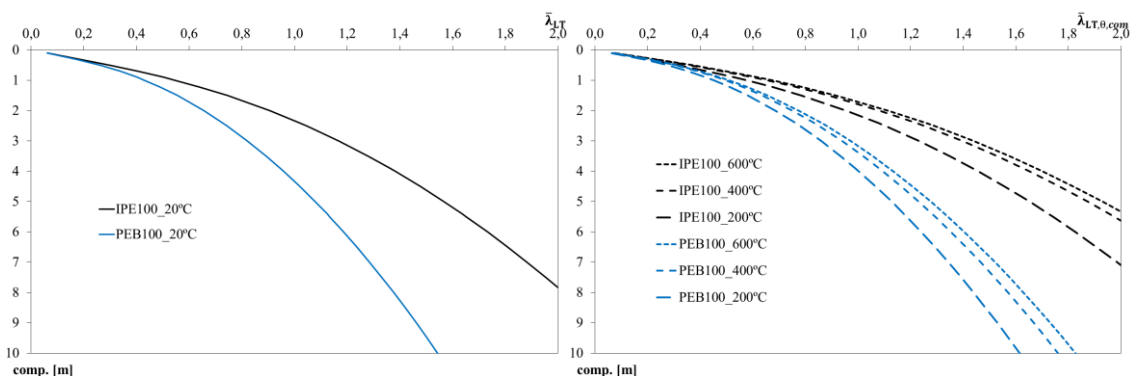


a) Secções IPE100.

b) Secções PEB100.

Figura 5.41 - Comparação da resistência a encurvadura a várias temperaturas.

A figura 5.42 apresenta a comparação da esbelteza entre elementos IPE e PEB à temperatura ambiente a) e a temperaturas elevadas b). Como é possível ver a esbelteza aumenta com o aumento da temperatura sendo que esta é menor em secções PEB do que em secções IPE.



a) Temperatura de 20°C.

b) Temperatura de 200, 400 e 600°C.

Figura 5.42 - Comparação da esbelteza entre IPE100 e PEB100.

6. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA RESISTÊNCIA DE VIGAS À FLEXÃO A TEMPERATURAS ELEVADAS

6.1. Introdução

Os programas de cálculo que permitem a aplicação de métodos avançados de cálculo facilitam a obtenção de resultados numéricos de grande complexidade, e que devido a resultados de confirmada aproximação a casos reais, são cada vez mais utilizados na verificação de resultados experimentais. Estes permitem ainda a obtenção resultados para problemas que na realidade seriam difíceis de realizar, quer pelas dimensões dos provetes quer pelos custos associados. A escolha do programa para o cálculo é também um fator importante pois alguns programas garantem bons resultados mas são por vezes limitados, não permitindo realizar certos estudos. O programa escolhido para a realização deste estudo foi o Ansys devido à sua precisão e versatilidade. No entanto estes programas necessitam de grande capacidade de armazenamento e processamento, obrigando as máquinas a funcionar em pleno rendimento durante muitas horas. Torna-se importante ter conhecimento da pormenorização que se aplica para ter em conta o tempo de processamento.

6.2. Características geométricas das vigas

As seções foram elaboradas tendo em conta as características dos materiais, a disposição do aço de reforço longitudinal e transversal, de acordo com a EN1994-1.2 [1], Também foi necessário comprometer certas regras de dimensionamento com o objetivo de poder realizar seções compostas por perfis de pequena dimensão, tendo em consideração a falta de espaço entre banzos, obriga a redução do recobrimento e ampliação do espaçamento entre estribos. As vigas parcialmente embebidas com betão denominadas de PEB podem ser construídas com estribos em C soldados a alma (PEBA) ou com estribos retos soldados aos banzos (PEBB). As PEB em estudo foram idealizadas com perfis de IPE100, IPE200 e IPE300. Foram testados com comprimentos efetivos de 2.4, 3.9 e 5.4 metros. Na nomenclatura foi acrescentado um F quando o elemento está submetido a uma carga pontual a meio vão ou um P, no caso de o elemento estar

submetido a uma carga uniformemente distribuída. Na tabela 6.1 estão representadas as características escolhidas para cada tipo de viga, assim como os números de nós e elementos que as representam no programa de simulação por elementos finitos ANSYS.

Tabela 6.1- Constituição e características numéricas das vigas em estudo.

Identidade	Reforço	Estribos	Tipo de ligação	Betão	Lt [m]	Ls [m]	s [m]	Número de nós	Número de elementos
PEBA100_2,4F	Ø10	Ø6	C-alma	C25/30	2,5	2,4	0,167	187473	171648
PEBA100_3,9F	Ø10	Ø6	C-alma	C25/30	4,0	3,9	0,167	290301	266112
PEBA100_5,4F	Ø10	Ø6	C-alma	C25/30	5,5	5,4	0,167	404415	370944
PEBA200_2,4F	Ø12	Ø6	C-alma	C25/30	2,5	2,4	0,100	200165	183600
PEBA200_3,9F	Ø12	Ø6	C-alma	C25/30	4,0	3,9	0,100	321195	294984
PEBA200_5,4F	Ø12	Ø6	C-alma	C25/30	5,5	5,4	0,100	439565	403920
PEBA300_2,4F	Ø20	Ø6	C-alma	C25/30	2,5	2,4	0,171	197715	182240
PEBA300_3,9F	Ø20	Ø6	C-alma	C25/30	4,0	3,9	0,171	312375	288320
PEBA300_5,4F	Ø20	Ø6	C-alma	C25/30	5,5	5,4	0,171	427035	394400
PEBB100_2,4F	Ø10	Ø6	I-Banzos	C25/30	2,5	2,4	0,167	187473	171648
PEBB100_3,9F	Ø10	Ø6	I-Banzos	C25/30	4,0	3,9	0,167	290301	266112
PEBB100_5,4F	Ø10	Ø6	I-Banzos	C25/30	5,5	5,4	0,167	404415	370944
PEBB200_2,4F	Ø12	Ø6	I-Banzos	C25/30	2,5	2,4	0,100	257985	238000
PEBB200_3,9F	Ø12	Ø6	I-Banzos	C25/30	4,0	3,9	0,100	321195	294984
PEBB200_5,4F	Ø12	Ø6	I-Banzos	C25/30	5,5	5,4	0,100	439565	403920
PEBB300_2,4F	Ø20	Ø6	I-Banzos	C25/30	2,5	2,4	0,171	197715	182240
PEBB300_3,9F	Ø20	Ø6	I-Banzos	C25/30	4,0	3,9	0,171	312375	288320
PEBB300_5,4F	Ø20	Ø6	I-Banzos	C25/30	5,5	5,4	0,171	427035	394400

Na elaboração das secções foram escolhidas duas disposições para os estribos; uma com estribos soldados a alma (PEBA) e outra com os estribos soldados aos banzos (PEBB) para verificar qual delas garante maior resistência quer a flexão quer a torção. As secções transversais escolhidas encontram-se representadas nas figuras AI 6.1, AI 6.2 e AI 6.3 do Anexo I. As secções longitudinais estão representadas desde a Figura AI 6.4 à Figura AI 6.10 do anexo I. Nessas representações é possível verificar o espaçamento entre estribos escolhidos para cada secção em estudo. A escolha do espaçamento teve em conta o cálculo efetuado no anexo I que foi executado a partir das normas do Eurocódigo EN1992-1-1 [21]. As vigas serão simuladas à flexão em 3 pontos, (F) e à flexão por carga distribuída, (P) conforme representação nas figuras 6.1 e 6.2.

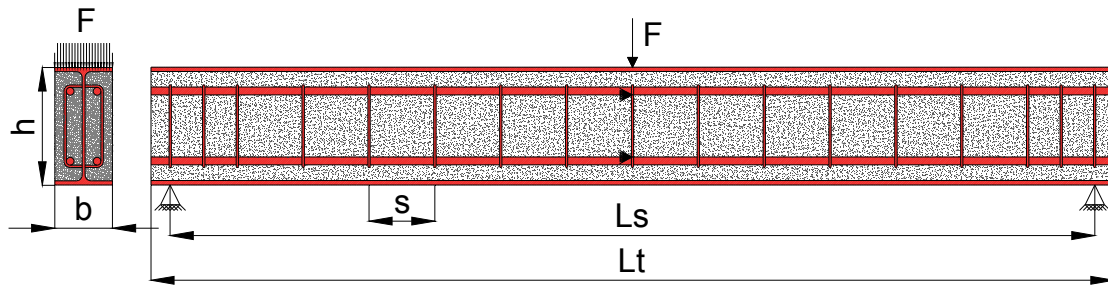


Figura 6.1 – Parâmetros do modelo para a simulação de flexão em 3 pontos.

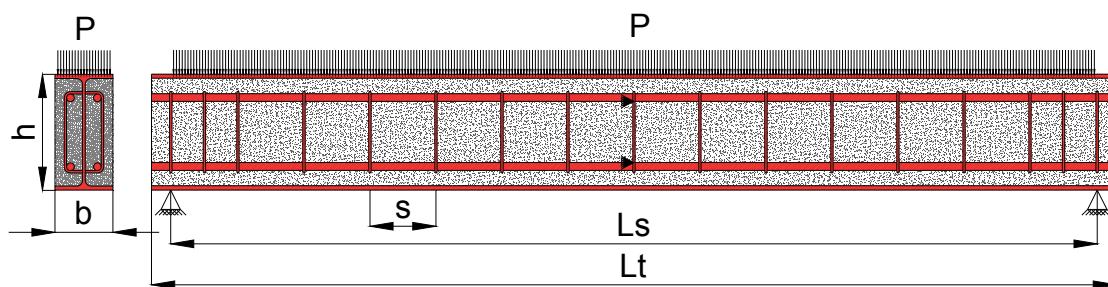


Figura 6.2 – Parâmetros do modelo para a simulação de flexão por carga distribuída uniformemente.

6.3. Comportamento do material

Para determinar a resistência à encurvadura lateral, foi utilizada uma análise não linear geométrica e material, considerando um método de solução incremental (carga) e iterativa. A introdução de imperfeições geométricas no modelo de elementos finitos foi realizada utilizando os modos de instabilidade já determinados. Afetaram-se os elementos com um fator de imperfeição geométrica lateral, comparando o deslocamento do centro geométrico das seções obtido pelo quociente entre o valor de deformação do modo de instabilidade e o valor de imperfeição $L/600$. O comportamento dos materiais segue a recomendação dos Eurocódigos, tendo adotado os valores nominais da classe de resistência e os modelos de elasticidade e plasticidade com e sem encruamento. Os valores nominais adotados encontram-se discriminados nas tabelas 6.2 para o aço do perfil, 6.3 para o betão e 6.4 para o aço de reforço respetivamente. Para a simulação numérica da estabilidade linear elástica referida no subcapítulo 7.1 apenas foi definido o módulo de elasticidade E e o coeficiente de Poisson ν . Para efetuar a simulação

numérica da resistência à flexão a temperaturas elevadas referida no subcapítulo 7.2 tiveram-se em consideração todas as propriedades dos materiais representadas.

Tabela 6.2 - Propriedades do aço S275.

$k_{y,\theta}$	$k_{E,\theta}$	$\theta [^\circ C]$	$f_y [N/mm^2]$	$f_u [N/mm^2]$	$E [kN/mm^2]$	$G [kN/mm^2]$	ν	ϵ_y	ϵ_u
1,00	1,00	20	275	430	210	80,76923		0,0013095	0,15
1,00	0,90	200	275	430	189	94,5	0,3	0,001455	0,15
1,00	0,70	400	275	430	147	73,5		0,0018707	0,15
0,47	0,31	600	129,25	202,1	65,1	32,55		0,0019854	0,15

Tabela 6.3 - Propriedades do betão C20/25.

$f_{c,\theta}/f_{ck}$	$k_{ct,\theta}$	$\theta [^\circ C]$	$f_{cm} [N/mm^2]$	$f_{ctm} [N/mm^2]$	E	ν	$\epsilon_{c1,\theta}$	$\epsilon_{cu1,\theta}$
1,00	1,00	20	28	28	30		0,000933	0,02
0,95	0,80	200	26,6	26,6	28,5	0,2	0,0055	0,025
0,75	0,40	400	21	21	22,5		0,01	0,03
0,45	0,00	600	12,6	12,6	13,5		0,025	0,035

Tabela 6.4 – Propriedades do aço S500.

$\frac{f_{sy,\theta}}{f_{yk}}$	$\frac{E_{s,\theta}}{E_s}$	$\theta [^\circ C]$	$f_y [N/mm^2]$	$f_u [N/mm^2]$	$E [kN/mm^2]$	$G [kN/mm^2]$	ν	ϵ_y	ϵ_u
1,00	1,00	20	500	500	210	80,76923		0,002381	0,15
1,00	0,87	200	500	500	182,7	91,35	0,3	0,0027367	0,15
0,94	0,56	400	470	470	117,6	58,8		0,0039966	0,15
0,40	0,24	600	200	200	50,4	25,2		0,0039683	0,15

Na figura 6.3 estão representadas as curvas extensão-tensão do aço S275 do perfil para os diferentes níveis de temperatura (20°C, 200°C, 400°C e 600°C). Para se ter uma melhor percepção da diferença das extensões a diferentes temperaturas realizou-se uma ampliação da zona de início de cedência do material da figura 6.3, resultando a figura 6.4.

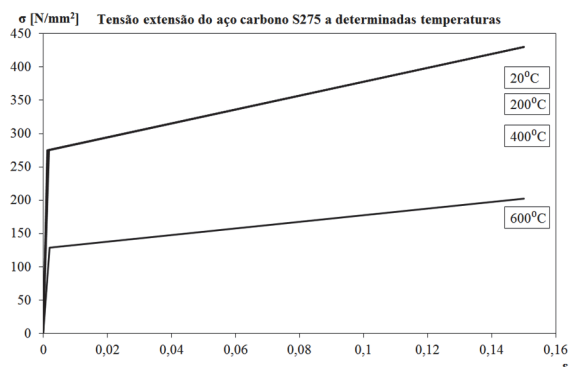


Figura 6.3 – Tensão extensão do aço carbono S275 a determinadas temperaturas.

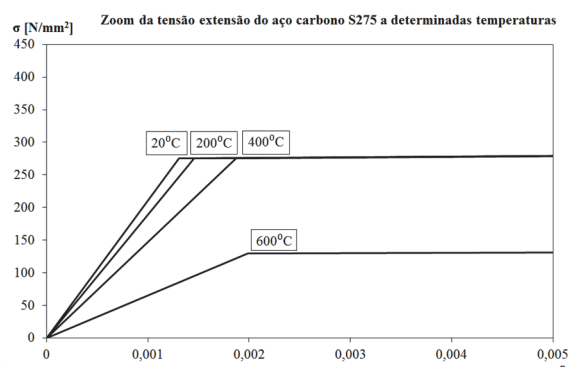


Figura 6.4 – Vista ampliada da figura 7.3.

Na figura 6.5 estão representadas as curvas tensão-extensão do betão para os níveis de temperaturas (20°C, 200°C, 400°C e 600°C). O ramo descendente das curvas foi considerado como constante, considerando assim o aumento da resistência à compressão do betão confinado. O comportamento do betão à tração difere do comportamento à compressão. Neste modelo foi assumido um comportamento igual em ambos os domínios.

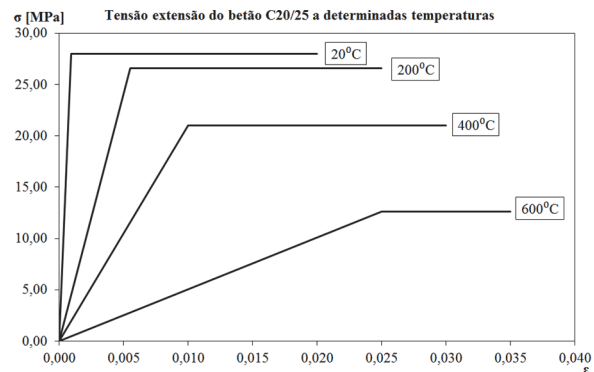


Figura 6.5 – Tensão extensão do betão C20/25 a determinadas temperaturas.

Na figura 6.6 está representado o modelo simplificado do comportamento do aço do reforço. Para se ter uma melhor perceção da diferença das extensões a diferentes temperaturas realizou-se uma ampliação da zona de início de cedência do gráfico da figura 6.6, resultando o gráfico da figura 6.7.

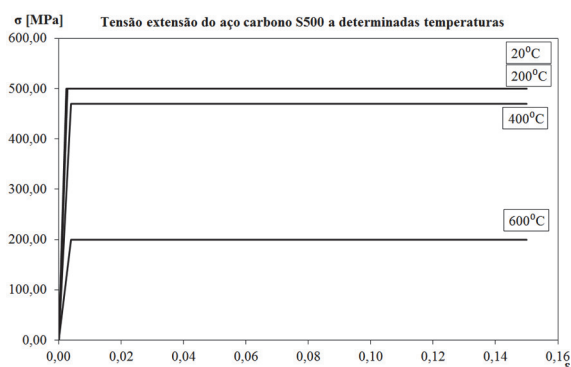


Figura 6.6 - Tensão extensão do aço S500 a determinadas temperaturas.

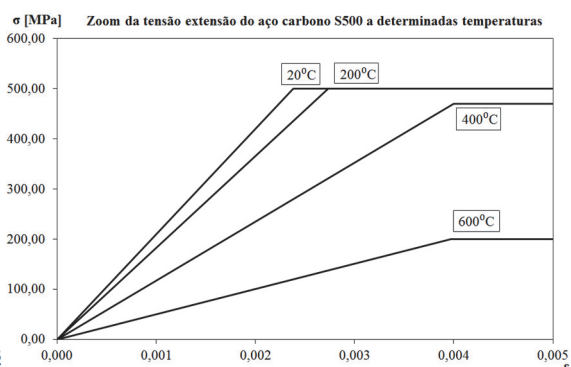


Figura 6.7 – Vista ampliada da figura 7.46

Os elementos em estudo são constituídos por perfis de secções abertas e de paredes finas, perfis IPE, pelo que quando submetidos à flexão sem estarem restringidos

lateralmente são geralmente condicionados por fenómenos de instabilidade de encurvadura lateral torsional.

6.4. Teste da malha (convergência)

Foram efetuados testes de convergência para otimizar o refinamento da malha considerando o tempo de análise e a quantidade de dados gerados. Após a análise dos dados foi escolhida uma malha com 15 espaços entre estribos, sendo o espaçamento junto ao estribo 2 vezes maior que o espaçamento no estribo, aumentando progressivamente do estribo para o centro. A razão da escolha pode ser observada na figura 6.8 e na figura 6.9 onde está representado o erro relativo cometido pela escolha. Como se pode observar desde o ponto de malha de 15 espaços, a otimização dos resultados é pouco significativa.

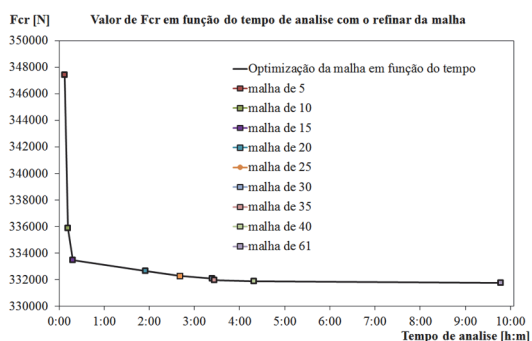


Figura 6.8 - Força crítica em função do tempo de análise.

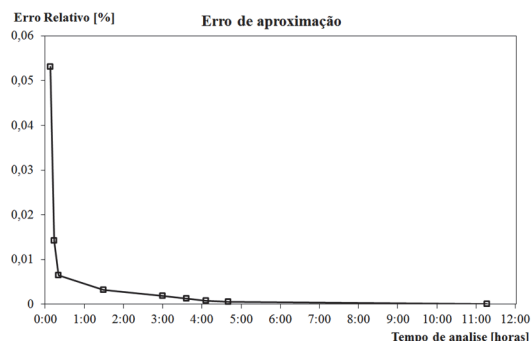
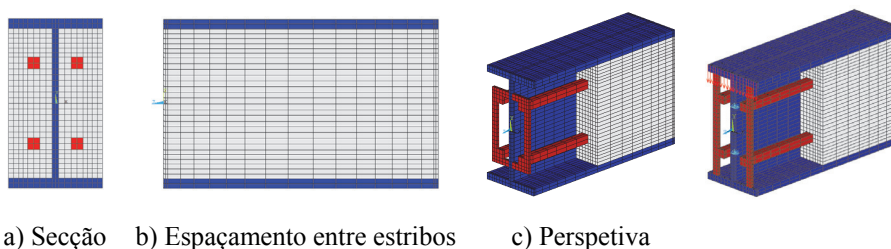


Figura 6.9 - Erro relativo obtido da força crítica em função do tempo de análise.

Pela análise do gráfico pode-se observar que o erro relativo da solução escolhida é de aproximadamente 0,6% tendo em conta o tempo de análise. Pelo que a viga será composta por uma malha com 15 espaços como se pode observar na figura 6.10.



a) Secção b) Espaçamento entre estribos c) Perspetiva

Figura 6.10 - Distribuição da malha na viga PEB, realizada no programa ANSYS

6.5. Modelo utilizado para o estudo dos elementos viga

O cálculo do momento crítico por elementos finitos foi efetuado com recurso ao programa Ansys. Para os materiais do aço do perfil e do aço de reforço e dos estribos foi utilizado o elemento finito “Solid 185” [26], ver figura 6.11. Este elemento permite efetuar uma análise estrutural num domínio tridimensional. Para o betão foi utilizado o elemento “Solid 65” [26], ver figura 6.12. O elemento “Solid 185” permite efetuar uma análise estrutural num domínio tridimensional. O elemento utilizado para simular o betão “Solid 65” permite a introdução do critério de dano, provocado pelo fissuramento à tração “cracking” e por o esmagamento do betão à compressão “crushing”. Por dificuldades de convergência nas simulações, não foi considerado o efeito do “cracking” e “crushing”. A carga foi implementada de forma quase estática, incremental e adaptativa.

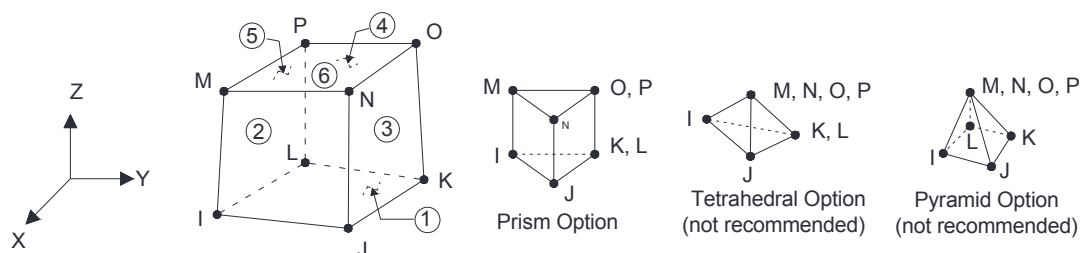


Figura 6.11 - Elemento finito “SOLID 185”[26]

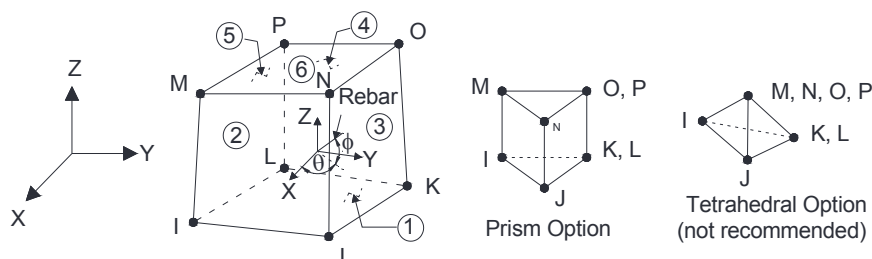
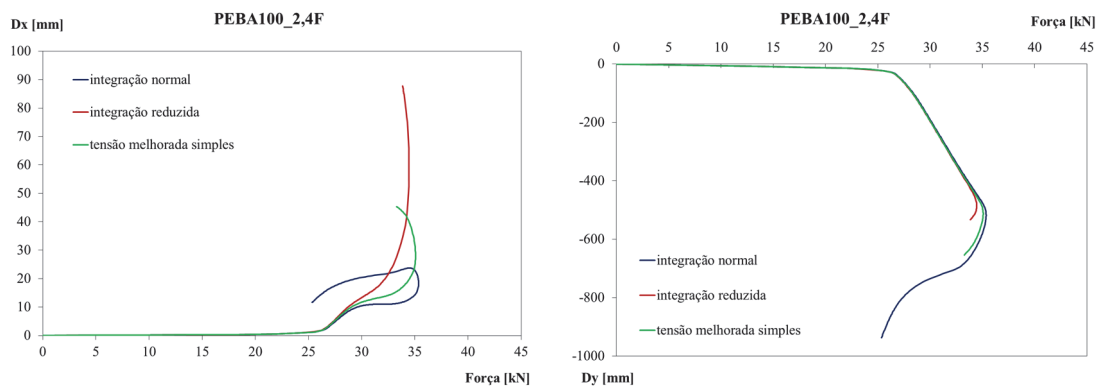


Figura 6.12 - Elemento finito “SOLID65”, [26].

6.6. Teste do método de Integração para o estudo dos elementos viga

Foram realizadas três simulações numéricas ao elemento de viga parcialmente embebido em betão, de secção composta por um perfil IPE 100, com 2,4 metros de vão, submetida a flexão em três pontos. As simulações diferem entre si apenas pelo método de integração utilizado, sendo eles: o método de integração normal, o método de integração

reduzida e método de tensão melhorada. A figura 6.13 apresenta a comparação entre os deslocamentos verificados pelos três métodos considerados.



a) Deslocamento em x.

a) Deslocamento em y.

Figura 6.13 – Comparação entre deslocamentos para diferentes métodos de integração.

Da análise da figura 6.13 verifica-se que a integração reduzida origina um valor inferior de força última, em comparação com os restantes métodos. O deslocamento lateral máximo na viga foi maior no método de integração reduzida. A integração reduzida foi obtida com menor tempo de processamento de computador. A análise é não linear com plasticidade e utiliza elementos sólidos, sendo aconselhado utilizar a integração reduzida.

7. MODELO NUMÉRICO

7.1. Simulação numérica da estabilidade linear elástica

7.1.1. Modos de deformação

As vigas em estudo podem perder a resistência por encurvadura lateral torsional [28] ou por formação de uma rótula plástica, ou seja por plastificação da secção mais esforçada. As vigas em estudo tendem a deformar por encurvadura lateral torsional devido à esbelteza da secção em torno do eixo mais fraco.

7.1.2. Momento crítico

O cálculo do momento crítico foi efetuado através do cálculo matemático dos vetores e valores próprios da seguinte expressão, de acordo com [26].

$$[K]\{\varphi_i\} = \lambda_i[M]\{\varphi_i\} \quad (70)$$

Em que: $[K]$ é a matriz de rigidez do elemento; $\{\varphi_i\}$ é o vetor próprio; λ_i é o valor próprio; $[M]$ é a matriz da massa do elemento.

Foi utilizado o método “subspace method” [26] para análise de encurvadura elástica (estabilidade). Este método aplica-se para análise à encurvadura para sistemas com as matrizes simétricas, através da seguinte expressão.

$$([K] + \lambda_i[S])\{\Psi_i\} = \{0\} \quad (71)$$

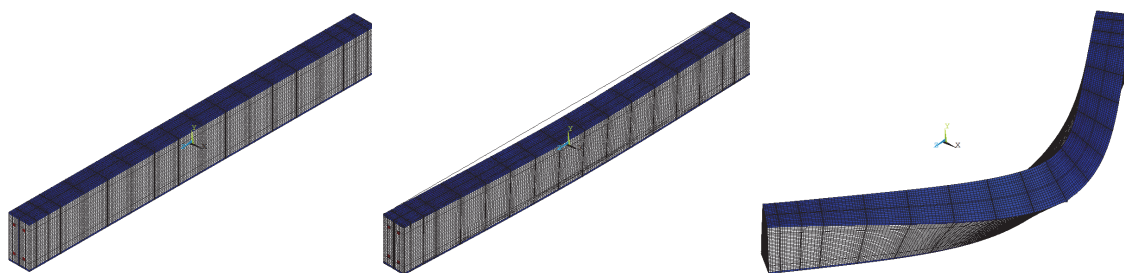
Em que: $[K]$ é a matriz de rigidez do elemento; $[S]$ é a matriz de rigidez geométrica do elemento; λ_i é o valor próprio; Ψ_i vetor próprio dos deslocamentos.

Foi obtida uma solução linear elástica para o cálculo dos modos de instabilidade. O primeiro modo corresponde à encurvadura lateral torsional “LTB” e permite determinar o M_{cr} . Aplicou-se uma carga unitária em cada um dos 19 nós e efetuou-se uma análise estática do modelo numérico. Obtidos os resultados da análise estática efetua-se a análise

de estabilidade. Obtém-se o valor próprio, que vai ser multiplicado pelo número de nós em que foi aplicada a carga unitária, 19 nós, e obtêm-se o valor da força crítica. Multiplicando a força crítica pelo seu braço, que é a distância ao apoio mais próximo, determina-se o valor do momento crítico.

7.1.3. Imperfeição geométrica

Após efetuar uma análise linear elástica submetendo as vigas a flexão provocada por uma carga pontual unitária ou a uma pressão, obteve-se a força que instabiliza a viga e o deslocamento máximo, ver b) da figura 7.2. As vigas PEB instabilizaram por encurvadura lateral. Pelo que se obteve um fator de escala que será aplicado as vigas, atribuindo-lhe assim uma imperfeição inicial, ver c) da figura 7.2. Os dados obtidos para o Momento crítico estão representados na tabela 7.1.



a) Estado inicial. b) 1º Modo de instabilidade. c) Imperfeição do elemento

Figura 7.1 - Geometria do elemento com uma ampliação de 200x.

Tabela 7.1 – Momento crítico

Identidade	Carga de flexão	M_{cr} [kN]	Identidade	Carga de flexão	M_{cr} [kN]
PEBA100_2,4F	3 pontos	200,093	PEBA100_2,4P	distribuída	356,576
PEBA100_3,9F	3 pontos	124,658	PEBA100_3,9P	distribuída	216,709
PEBA100_5,4F	3 pontos	88,723	PEBA100_5,4P	distribuída	150,908
PEBA200_2,4F	3 pontos	2453,839	PEBA200_2,4P	distribuída	2573,509
PEBA200_3,9F	3 pontos	1543,874	PEBA200_3,9P	distribuída	1571,428
PEBA200_5,4F	3 pontos	1125,855	PEBA200_5,4P	distribuída	1126,291
PEBA300_2,4F	3 pontos	11090,627	PEBA300_2,4P	distribuída	8519,227
PEBA300_3,9F	3 pontos	7059,099	PEBA300_3,9P	distribuída	5343,547
PEBA300_5,4F	3 pontos	5168,680	PEBA300_5,4P	distribuída	3845,010
PEBB100_2,4F	3 pontos	199,386	PEBB100_2,4P	distribuída	356,166
PEBB100_3,9F	3 pontos	124,323	PEBB100_3,9P	distribuída	216,428
PEBB100_5,4F	3 pontos	88,528	PEBB100_5,4P	distribuída	150,673
PEBB200_2,4F	3 pontos	2216,137	PEBB200_2,4P	distribuída	2574,115
PEBB200_3,9F	3 pontos	1573,077	PEBB200_3,9P	distribuída	1572,557
PEBB200_5,4F	3 pontos	1126,112	PEBB200_5,4P	distribuída	1127,393
PEBB300_2,4F	3 pontos	11062,879	PEBB300_2,4P	distribuída	8514,198
PEBB300_3,9F	3 pontos	7049,596	PEBB300_3,9P	distribuída	5341,759
PEBB300_5,4F	3 pontos	5164,448	PEBB300_5,4P	distribuída	3844,128

7.2. Simulação numérica da resistência à flexão a temperatura elevadas

7.2.1. Método numérico

Os elementos finitos encontram a solução calculando a matriz de esbelteza do elemento e depois invertendo o para descobrir os deslocamentos do elemento. Em elementos de ordem elevada é necessário usar a integração numérica para calcular a matriz de esbelteza. O método de Gauss não é restrito para o uso de intervalos fixos pelo que requer menor avaliação de funções, obtendo resultados igualmente rigorosos. Na integração de funções são calculados um número de pontos e as suas posições são otimizadas, conhecidas como coordenadas de Gauss. Para cada um desses pontos a função é multiplicada por uma função de peso otimizada. Quantas mais coordenadas de Gauss para cada elemento, mais apurada será o resultado, atendendo ao tempo de computação. A integração reduzida utiliza um menor número de coordenadas de Gauss para a resolução do integral, o que implica menos tempo de análise. O deslocamento baseado em formulações de elementos finitos permite estimar sempre por excesso a matriz de esbelteza, e o uso de uma integração utilizando menos pontos produzirá um elemento menos esbelto. Em problemas não lineares como na plasticidade, ou em materiais incompressíveis é aconselhado usar a integração reduzida. A ligeira perda de apuramento traduz-se numa melhoria na aproximação do comportamento na vida real. Notavelmente

a integração reduzida resolve completamente o bloqueio em certos elementos, e ainda melhora a precisão do elemento.

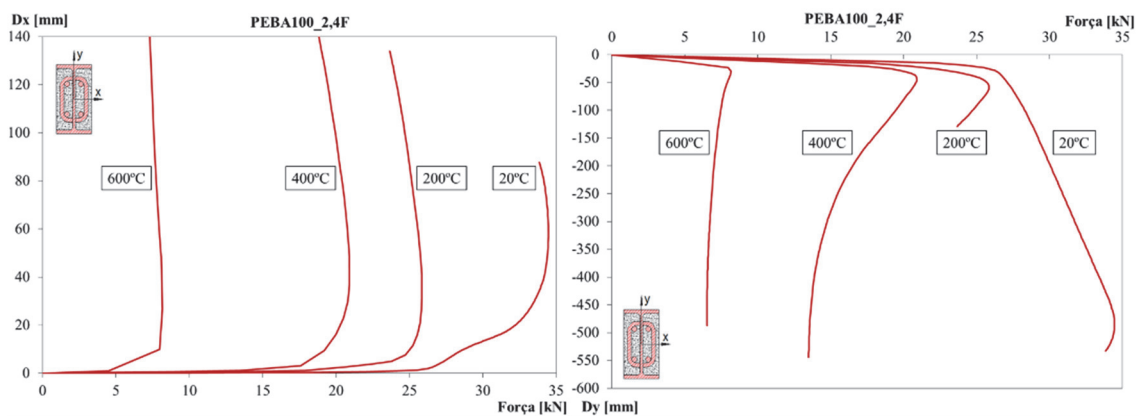
As análises à encurvadura com valores próprios predizem a resistência a encurvadura teórica de uma estrutura elástica ideal. É realizada a análise computacional estrutural dos valores próprios para o sistema de carga dado e suas restrições.

O método de comprimento de arco ajusta-se para obter soluções de equilíbrio estático de problemas instáveis. Este método utiliza iterações esféricas explícitas para manter a ortogonalidade entre o raio do comprimento de arco e as direções ortogonais conforme descrito por Forbes e Stiener. É assumido que a magnitude de todas as cargas são controladas por um parâmetro escalar singular (fator de carga total). Para a solução do método de comprimento de arco é utilizado como base o método de Newton Raphson. Para problemas de grande torção no deslocamento da curva de carga ou caminho dependente de materiais é necessário limitar o raio do comprimento de arco. O grau de variação do raio de comprimento de arco é limitado pelos multiplicadores máximo e mínimo. O método foi utilizado para determinar a carga máxima que as vigas suportam.

7.2.2. Resultados numéricos para vigas PEBA100

As figuras da 7.2 à 7.19 representam os deslocamentos obtidos após analisar as vigas em estudo submetidas a flexão em três pontos.

A figura 7.2 representa os deslocamentos laterais a) em x e verticais b) em y da viga PEBA100_2,4F.



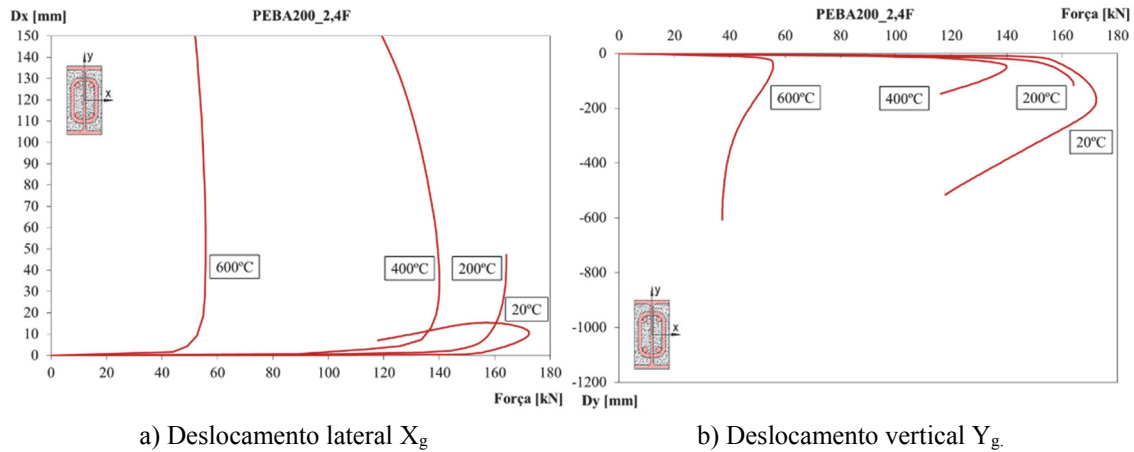
a) Deslocamento lateral X_g

b) Deslocamento vertical Y_g .

Figura 7.2 – Deslocamento da viga PEBA100_2,4F a 20, 200, 400 e 600°C.

7.3. Resultados numéricos para vigas PEBA200

A figura 7.5 representa os deslocamentos laterais a) em x e verticais b) em y da viga PEBA200_2,4F.

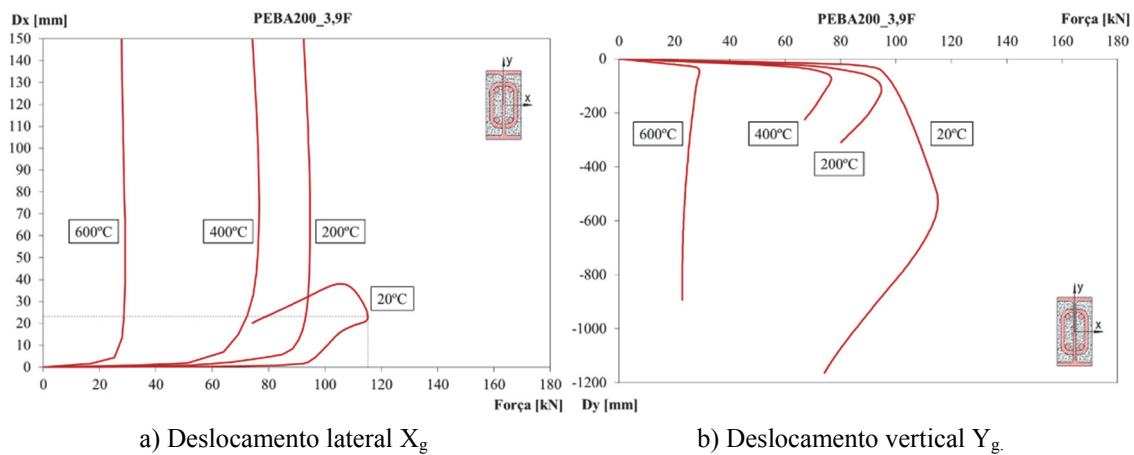


a) Deslocamento lateral X_g

b) Deslocamento vertical Y_g .

Figura 7.5 – Deslocamento da viga PEBA200_2,4F a 20, 200, 400 e 600°C.

A figura 7.6 representa os deslocamentos laterais a) em x e verticais b) em y da viga PEBA200_3,9F.



a) Deslocamento lateral X_g

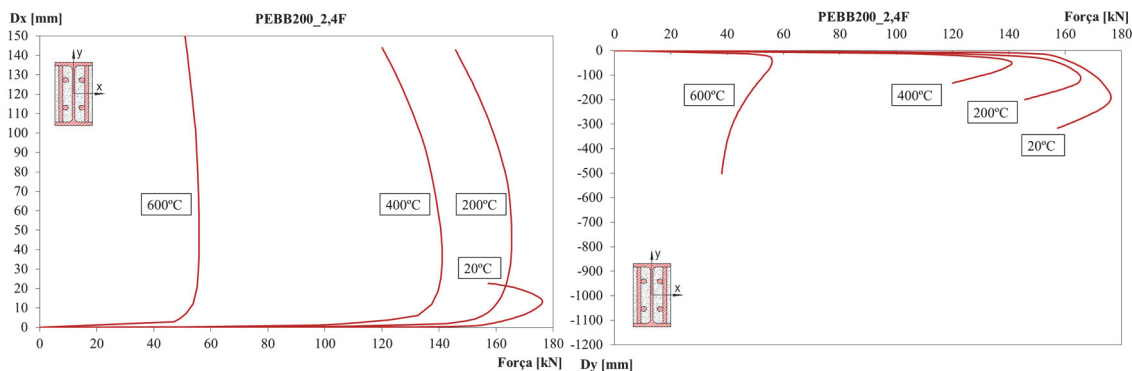
b) Deslocamento vertical Y_g .

Figura 7.6 – Deslocamento da viga PEBA200_3,9F a 20, 200, 400 e 600°C.

A figura 7.7 representa os deslocamentos laterais a) em x e verticais b) em y da viga PEBA200_5,4F.

7.6. Resultados numéricos para vigas PEBB200

A figura 7.14 representa os deslocamentos laterais a) em x e verticais b) em y da viga PEBB200_2,4F.

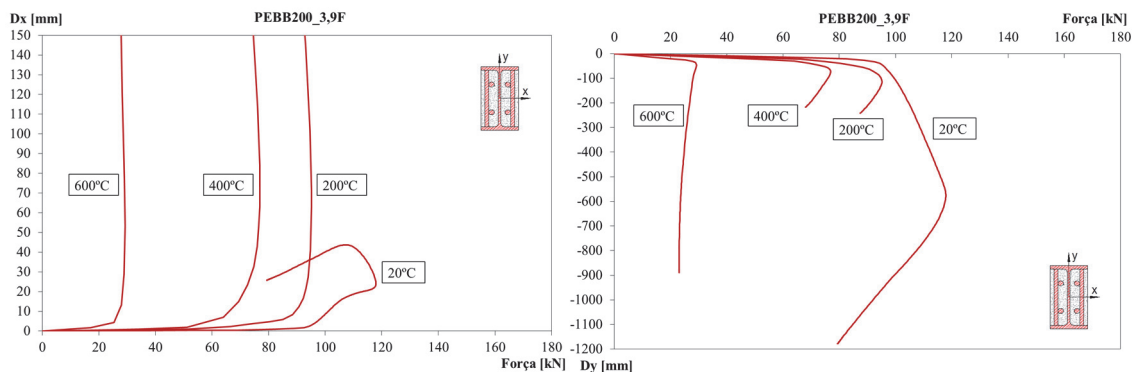


a) Deslocamento lateral X_g

b) Deslocamento vertical Y_g .

Figura 7.14 - Deslocamento da viga PEBB200_2,4F a 20, 200, 400 e 600°C.

A figura 7.15 representa os deslocamentos laterais a) em x e verticais b) em y da viga PEBB200_3,9F.



a) Deslocamento lateral X_g

b) Deslocamento vertical Y_g .

Figura 7.15 - Deslocamento da viga PEBB200_3,9F a 20, 200, 400 e 600°C.

A figura 7.16 representa os deslocamentos laterais a) em x e verticais b) em y da viga PEBB200_5,4F.

tabelas de 7.1 a 7.4 onde estão representadas as resistências para cada viga a 20, 200, 400 e 600°C respetivamente. A tabela 7.1 representa a resistência das vigas em estudo quando submetidas à flexão em 3 pontos à temperatura de 20°C.

7.8. Resumo de resultados numéricos para diferentes níveis de temperatura

Tabela 7.1 – Resistência de vigas submetidas à flexão em 3 pontos a 20°C.

Identidade	$L[m]$	$\theta[^\circ C]$	Eventos de carga				
			$F_p [kN]$	$F_y [kN]$	$F_{L/30} [kN]$	$F_{L/20} [kN]$	$F_u [kN]$
PEBA100_2,4F	2,4	20	22,00	27,05	27,88	28,69	34,47
PEBA100_3,9F	3,9	20	13,70	16,13	16,68	17,13	18,31
PEBA100_5,4F	5,4	20	8,50	11,35	11,68	11,99	12,27
PEBA200_2,4F	2,4	20	145,00	154,90	166,42	170,44	172,38
PEBA200_3,9F	3,9	20	83,00	96,30	100,90	103,98	115,22
PEBA200_5,4F	5,4	20	59,00	69,60	71,60	73,65	87,82
PEBA300_2,4F	2,4	20	390,00	433,50	462,53	457,65	463,25
PEBA300_3,9F	3,9	20	250,00	283,50	309,74	307,29	310,76
PEBA300_5,4F	5,4	20	183,00	196,50	230,86	229,72	230,97
PEBB100_2,4F	2,4	20	23,00	27,00	27,88	28,70	34,57
PEBB100_3,9F	3,9	20	13,50	16,25	16,68	17,13	18,28
PEBB100_5,4F	5,4	20	9,20	11,35	11,68	11,99	12,27
PEBB200_2,4F	2,4	20	145,00	156,00	167,67	172,23	176,29
PEBB200_3,9F	3,9	20	76,00	97,60	101,28	104,41	117,89
PEBB200_5,4F	5,4	20	56,00	69,40	71,82	73,89	89,08
PEBB300_2,4F	2,4	20	385,00	449,00	461,78	456,26	462,89
PEBB300_3,9F	3,9	20	248,00	287,00	310,26	307,54	312,04
PEBB300_5,4F	5,4	20	178,00	203,20	234,23	232,09	234,39

A tabela 7.2 representa a resistência das vigas em estudo quando submetidas a flexão em 3 pontos à temperatura de 200°C.

Tabela 7.2 - Resistência de vigas submetidas à flexão em 3 pontos a 200°C.

Identidade	$L[m]$	$\theta[^\circ C]$	Eventos de carga				
			$F_p [kN]$	$F_y [kN]$	$F_{L/30} [kN]$	$F_{L/20} [kN]$	$F_u [kN]$
PEBA100_2,4F	2,4	200	18,00	20,50	25,38	24,02	25,85
PEBA100_3,9F	3,9	200	11,20	11,58	13,91	13,10	14,30
PEBA100_5,4F	5,4	200	7,65	7,87	8,92	8,50	9,03
PEBA200_2,4F	2,4	200	130,00	151,60	161,85	-	164,20
PEBA200_3,9F	3,9	200	71,00	76,00	94,42	90,68	94,78
PEBA200_5,4F	5,4	200	48,80	50,20	63,76	60,34	64,91
PEBA300_2,4F	2,4	200	325,00	412,00	449,26	443,73	450,56
PEBA300_3,9F	3,9	200	205,00	245,40	300,21	293,75	301,07
PEBA300_5,4F	5,4	200	147,00	170,00	214,19	193,41	220,27
PEBB100_2,4F	2,4	200	19,50	21,70	25,41	24,10	25,88
PEBB100_3,9F	3,9	200	11,50	12,25	13,94	13,14	14,33
PEBB100_5,4F	5,4	200	7,60	8,16	8,94	8,52	9,04
PEBB200_2,4F	2,4	200	120,00	151,20	163,06	165,33	165,50
PEBB200_3,9F	3,9	200	71,00	91,60	94,84	91,18	95,15
PEBB200_5,4F	5,4	200	46,50	50,30	64,03	60,65	65,09
PEBB300_2,4F	2,4	200	320,00	395,00	447,44	-	448,78
PEBB300_3,9F	3,9	200	174,00	215,00	300,08	293,44	301,76
PEBB300_5,4F	5,4	200	137,50	174,70	215,73	194,06	223,78

A tabela 7.3 representa a resistência das vigas em estudo quando submetidas a flexão em 3 pontos à temperatura de 400°C.

Tabela 7.3 - Resistência de vigas submetidas à flexão em 3 pontos a 400°C.

Identidade	$L[m]$	$\theta[^\circ C]$	Eventos de carga				
			$F_p [kN]$	$F_y [kN]$	$F_{L/30} [kN]$	$F_{L/20} [kN]$	$F_u [kN]$
PEBA100_2,4F	2,4	400	18,40	18,55	20,02	18,85	20,92
PEBA100_3,9F	3,9	400	10,30	10,30	10,35	9,96	10,60
PEBA100_5,4F	5,4	400	6,30	6,30	6,24	6,15	6,49
PEBA200_2,4F	2,4	400	112,50	117,50	135,72	125,16	140,06
PEBA200_3,9F	3,9	400	64,50	66,30	73,73	69,41	76,65
PEBA200_5,4F	5,4	400	44,70	47,20	47,53	45,34	48,84
PEBA300_2,4F	2,4	400	260,00	361,00	399,26	-	407,04
PEBA300_3,9F	3,9	400	180,00	204,00	232,30	207,71	257,02
PEBA300_5,4F	5,4	400	127,00	144,00	158,37	143,08	176,00
PEBB100_2,4F	2,4	400	18,75	18,85	20,09	18,95	20,97
PEBB100_3,9F	3,9	400	10,33	10,33	10,40	10,00	10,64
PEBB100_5,4F	5,4	400	6,40	6,40	6,27	6,17	6,52
PEBB200_2,4F	2,4	400	113,50	136,20	136,78	124,35	141,09
PEBB200_3,9F	3,9	400	65,00	72,90	74,10	69,87	76,92
PEBB200_5,4F	5,4	400	44,50	47,70	47,72	45,58	49,02
PEBB300_2,4F	2,4	400	260,00	338,50	-	-	404,65
PEBB300_3,9F	3,9	400	174,00	192,50	232,00	208,02	257,92
PEBB300_5,4F	5,4	400	125,00	137,20	159,38	143,81	177,82

A tabela 7.4 representa a resistência das vigas em estudo quando submetidas a flexão em 3 pontos à temperatura de 600°C.

Tabela 7.4 - Resistência de vigas submetidas à flexão em 3 pontos a 600°C.

Identidade	$L[m]$	$\theta[^\circ C]$	Eventos de carga				
			$F_p [kN]$	$F_y [kN]$	$F_{L/30} [kN]$	$F_{L/20} [kN]$	$F_u [kN]$
PEBA100_2,4F	2,4	600	7,50	7,90	7,60	7,35	8,17
PEBA100_3,9F	3,9	600	4,02	4,02	3,77	3,66	4,02
PEBA100_5,4F	5,4	600	2,18	2,18	2,24	2,22	2,31
PEBA200_2,4F	2,4	600	50,50	54,30	54,71	52,46	55,71
PEBA200_3,9F	3,9	600	28,20	28,20	27,46	26,67	29,06
PEBA200_5,4F	5,4	600	18,33	18,33	17,07	16,57	18,33
PEBA300_2,4F	2,4	600	115,00	145,50	169,95	-	183,41
PEBA300_3,9F	3,9	600	80,00	85,80	94,89	88,53	102,30
PEBA300_5,4F	5,4	600	60,30	60,30	61,68	58,78	67,71
PEBB100_2,4F	2,4	600	8,06	8,06	7,65	7,40	8,22
PEBB100_3,9F	3,9	600	4,06	4,06	3,81	3,68	4,06
PEBB100_5,4F	5,4	600	2,20	2,20	2,26	2,24	2,34
PEBB200_2,4F	2,4	600	52,50	54,23	54,61	51,69	55,91
PEBB200_3,9F	3,9	600	28,20	28,20	27,61	26,82	29,25
PEBB200_5,4F	5,4	600	18,41	18,41	-	-	18,41
PEBB300_2,4F	2,4	600	110,00	134,00	-	-	182,98
PEBB300_3,9F	3,9	600	82,50	84,50	95,19	88,79	102,67
PEBB300_5,4F	5,4	600	59,00	61,90	62,76	59,48	67,81

Da análise das tabelas 7.1, 7.2, 7.3, 7.4 e das figuras obtidas no subcapítulo 5.5, onde se representa a resistência a encurvadura lateral torsional (método analítico), optou-se por realizar gráficos comparativos de resistência. As figuras 7.20 - 7.29 representam os gráficos de comparação entre os valores obtidos pelo método analítico e os valores obtidos pelo método numérico. Na figura 7.20 é apresentada a comparação da força última de resistência à encurvadura lateral entre os resultados numéricos e os resultados analíticos à temperatura ambiente.

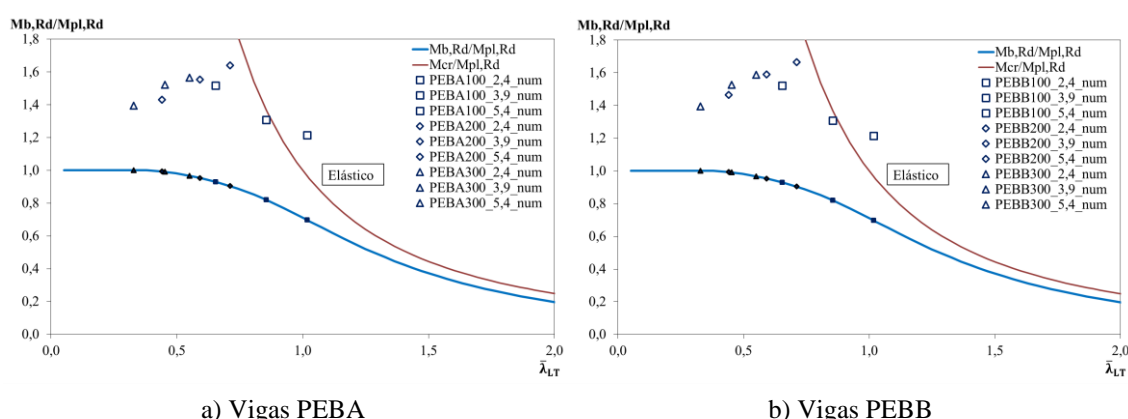
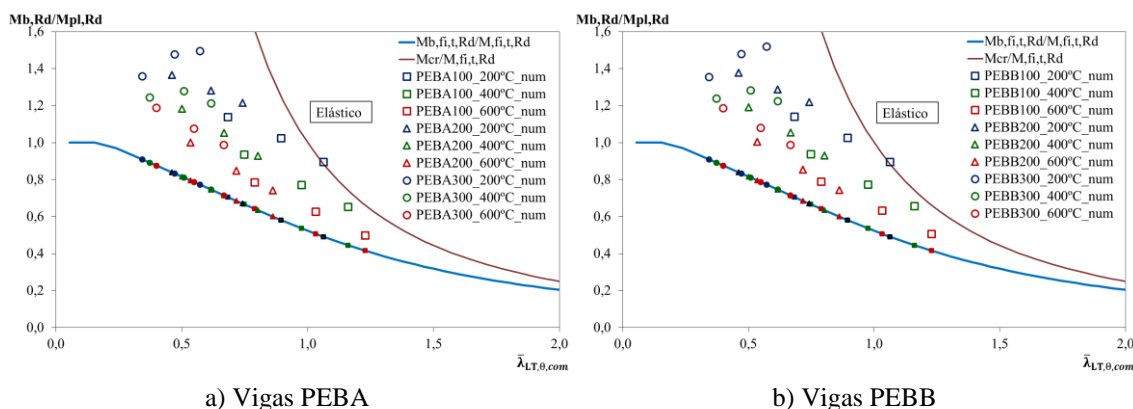


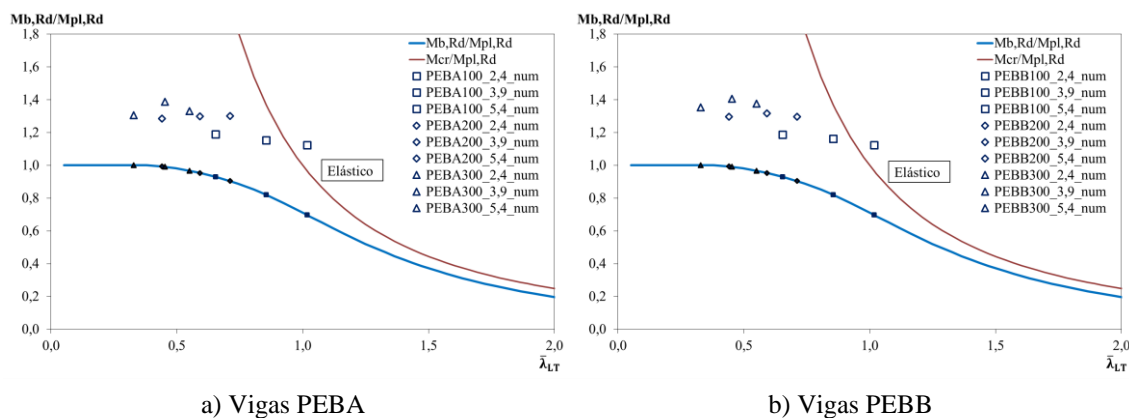
Figura 7.20 – Comparação da força última de resistência à encurvadura lateral entre os resultados numéricos e os resultados analíticos à temperatura ambiente.

Na figura 7.21 é apresentada a comparação da força última de resistência à encurvadura lateral entre os resultados numéricos e os resultados analítico a temperaturas elevadas.



a) Vigas PEBA
 b) Vigas PEBB
 Figura 7.21 - Comparação da força última de resistência à encurvadura lateral entre os resultados numéricos e os resultados analítico a temperaturas elevadas.

Na figura 7.22 é apresentada a comparação entre a força de cedência obtida pela análise dos resultados numéricos e a resistência à encurvadura obtida pelos resultados analíticos a temperatura ambiente.



a) Vigas PEBA
 b) Vigas PEBB
 Figura 7.22 - Comparação entre a força de cedência obtida pela análise dos resultados numéricos e a resistência à encurvadura obtida pelos resultados analíticos a temperatura ambiente.

Na figura 7.23 é apresentada a comparação entre a força de cedência obtida pelos resultados numéricos e a resistência à encurvadura obtida pelos resultados analíticos a temperatura elevadas.

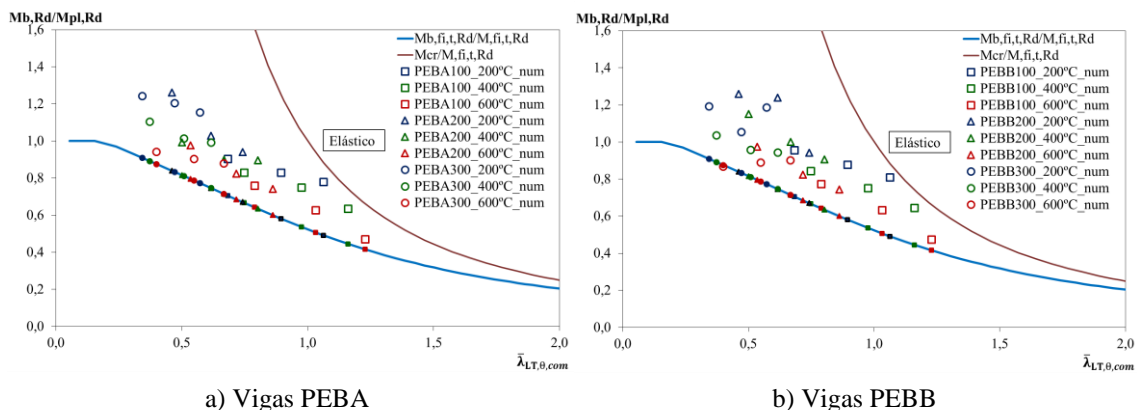


Figura 7.23 - Comparação entre a força de cedência obtida pelos resultados numéricos e a resistência à encurvadura obtida pelos resultados analíticos a temperatura elevadas.

Na figura 7.24 é feita a comparação entre a resistência à encurvadura definida pelo limite da força correspondente a um deslocamento transversal de $L/20$ e a resistência determinada pelos resultados analíticos, a temperatura ambiente.

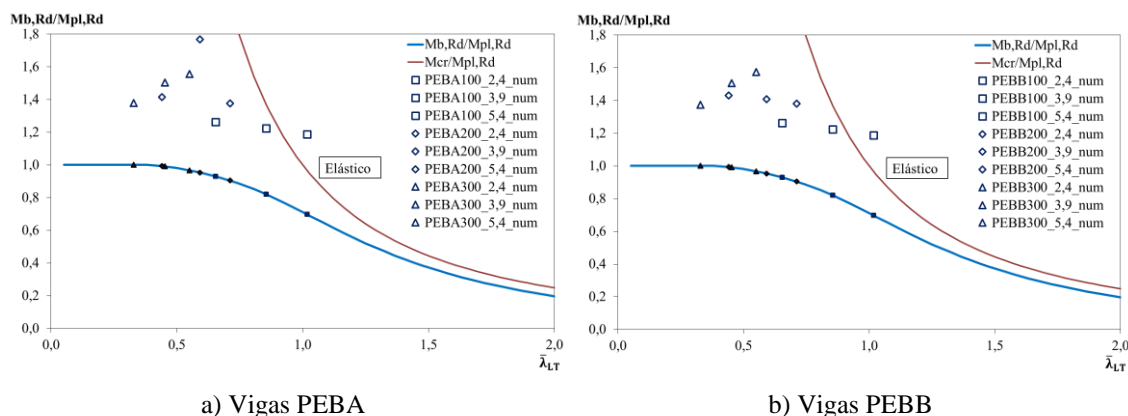
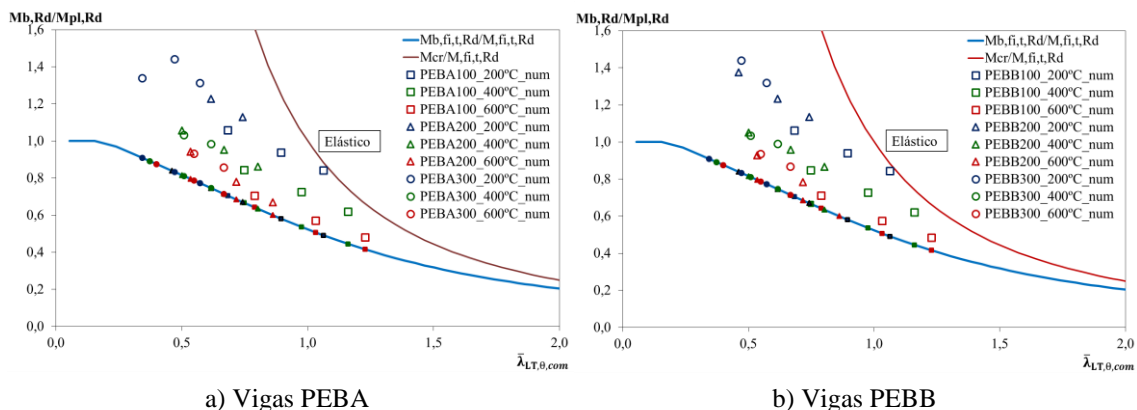


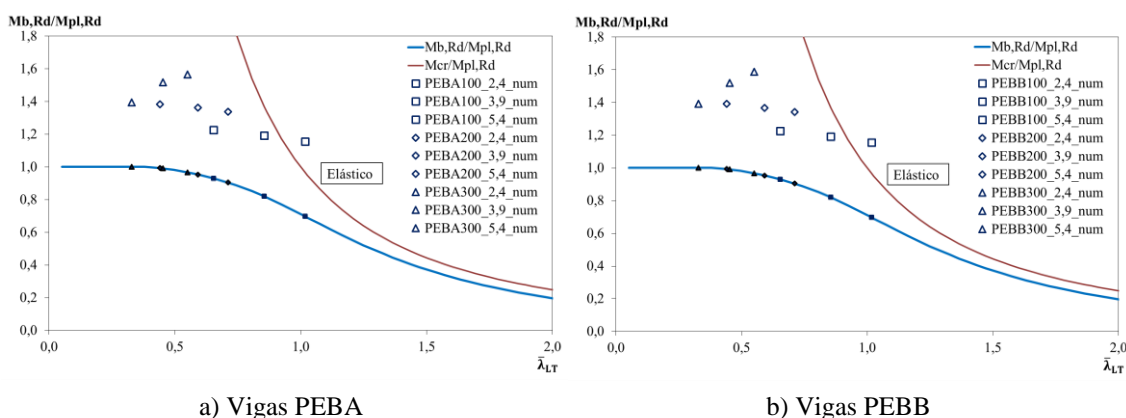
Figura 7.24 - Comparação entre a resistência à encurvadura definida pelo limite da força correspondente a um deslocamento transversal de $L/20$ e a resistência determinada pelos resultados analíticos, a temperatura ambiente.

Na figura 7.25 é feita a comparação entre a resistência à encurvadura definida pelo limite da força correspondente a um deslocamento transversal de $L/20$ e a resistência determinada pelos resultados analíticos, a temperaturas elevadas.



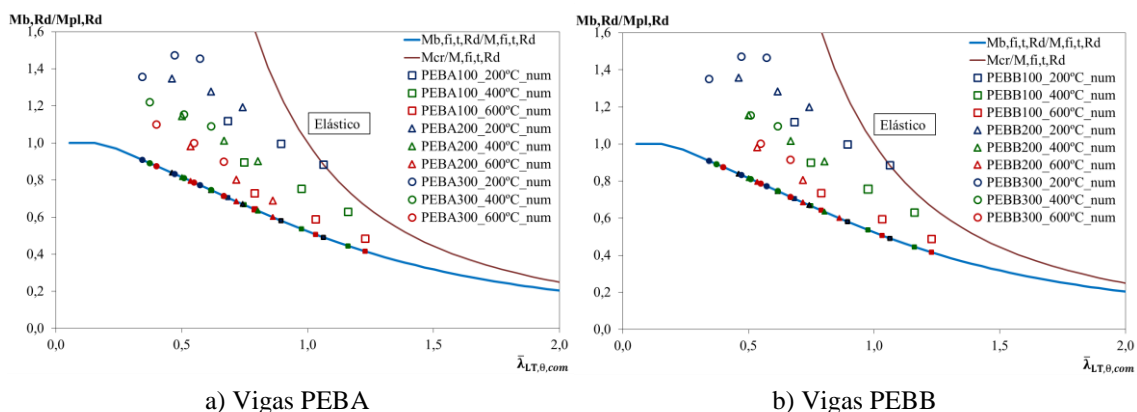
a) Vigas PEBA
 b) Vigas PEBB
 Figura 7.25 - Comparação entre a resistência à encurvadura definida pelo limite da força correspondente a um deslocamento transversal de $L/20$ e a resistência determinada pelos resultados analíticos, a temperaturas elevadas.

Na figura 7.26 está representada a comparação entre a resistência à encurvadura definida pelo limite da força correspondente a um deslocamento transversal de $L/30$ e a resistência determinada pelos resultados analíticos, a temperatura ambiente.



a) Vigas PEBA
 b) Vigas PEBB
 Figura 7.26 - Comparação entre a resistência à encurvadura definida pelo limite da força correspondente a um deslocamento transversal de $L/30$ e a resistência determinada pelos resultados analíticos, a temperatura ambiente.

Na figura 7.27 é apresentada a comparação entre a resistência à encurvadura definida pelo limite da força correspondente a um deslocamento transversal de $L/30$ e a resistência determinada pelos resultados analíticos, a temperaturas elevadas.

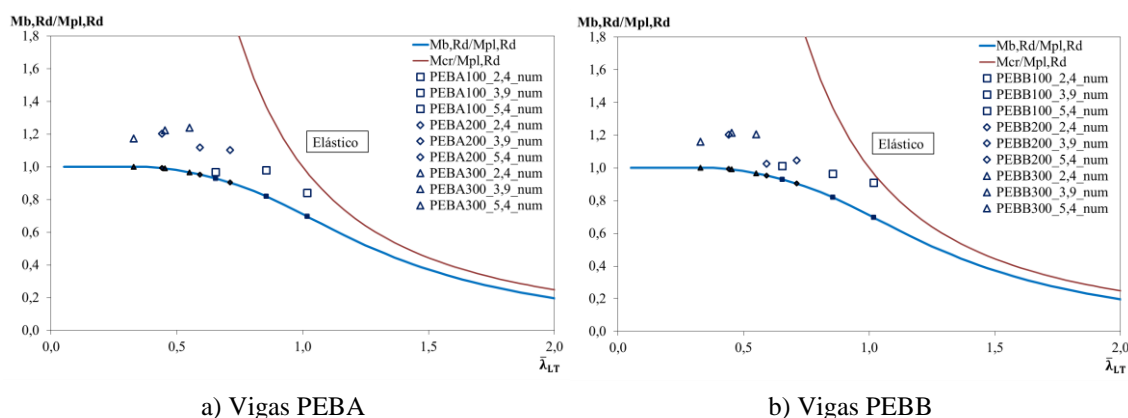


a) Vigas PEBA

b) Vigas PEBB

Figura 7.27 - Comparação entre a resistência à encurvadura definida pelo limite da força correspondente a um deslocamento transversal de $L/30$ e a resistência determinada pelos resultados analíticos, a temperaturas elevadas.

Na figura 7.28 é apresentada a comparação da resistência definida pelo limite de proporcionalidade do deslocamento transversal e a resistência à encurvadura obtida pelo método analítico, à temperatura ambiente.



a) Vigas PEBA

b) Vigas PEBB

Figura 7.28 - Comparação da resistência definida pelo limite de proporcionalidade do deslocamento transversal e a resistência à encurvadura obtida pelo método analítico, à temperatura ambiente.

Na figura 7.29 está representada a comparação da resistência definida pelo limite de proporcionalidade do deslocamento transversal e a resistência à encurvadura obtida pelo método analítico, a temperaturas elevadas.

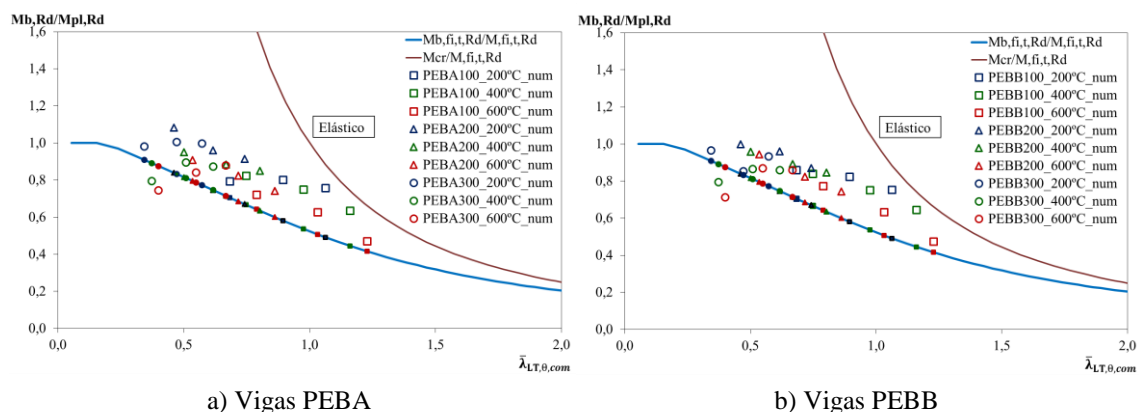


Figura 7.29 - Comparação da resistência definida pelo limite de proporcionalidade do deslocamento transversal e a resistência à encurvadura obtida pelo método analítico, a temperaturas elevadas.

Da observação das figuras anteriores verifica-se um afastamento significativo entre os valores obtidos pelo estudo analítico e os resultados numéricos. A diferença existente pode estar relacionada com as considerações utilizadas para este estudo. Não foram consideradas tensões residuais no aço do perfil, não foi considerado o modelo de dano por tração e compressão do betão, foi assumido contacto perfeito entre o aço e o betão e a resistência do betão à tração é superior no modelo considerado em relação ao comportamento real.

7.9. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

No estudo abordou-se o estudo do comportamento ao fogo de secções parcialmente embebidas em betão. São apresentados os resultados das quatro componentes (evolução da temperatura média no banzo, redução da altura da alma, temperatura média do betão e a redução da rigidez do reforço).

O método simplificado proposto no anexo G do EN1994-1-2 [1] demonstra-se inseguro em comparação com os resultados numéricos, para alguns períodos de exposição ao fogo, sendo apresentado, neste trabalho, um conjunto de propostas alternativas. Após a realização da soma pesada dos quatro componentes, constatou-se que o método simplificado de cálculo é conservador para a classe de exposição R30, sendo inseguro para as restantes classes de resistência. As novas propostas permitem obter resultados do lado da segurança.

Foi realizado um estudo analítico para definição do cálculo do momento plástico resistente, do momento crítico e do momento resistente de encurvadura lateral torsional

para elementos parcialmente embebidos em betão, tendo em consideração as normas em vigor e o estudo de autores como: Joachim Linder [6], Paulo Vila Real [10] Paulo Piloto [18]. No estudo analítico verificou-se que os elementos parcialmente embebidos em betão, quando submetidos a temperaturas elevadas chegam a ter uma resistência 100% maior que os perfis metálicos simples.

Dos resultados obtidos conclui-se que os elementos parcialmente embebidos em betão apresentam maior resistência a encurvadura lateral torsional que elementos metálicos sem betão. É apresentada ainda a comparação da resistência à encurvadura lateral torsional das vigas com estribos soldados no banzo e na alma, sendo que a diferença de resultados é quase nula. A esbelteza diminui com o aumento da secção ampliando a resistência dos elementos à encurvadura lateral torsional. A resistência à encurvadura lateral torsional diminui com o aumento da temperatura, sendo a diminuição mais significativa entre 400°C e 600°C. Neste estudo observou-se um afastamento significativo entre os valores obtidos pelo estudo analítico e os resultados numéricos. A diferença existente pode estar relacionada com as hipótese do modelo de elementos finitos, utilizadas para este estudo.

Para trabalhos futuros sugere-se fazer o mesmo estudo, utilizando o método simplificado de cálculo, com o método das zonas, em substituição do critério da isotérmica de 500°C. O método das zonas descrito no anexo B da norma EN 1992-1-2[22] consiste na divisão da secção transversal do betão, em varias zonas num número ($n \geq 3$) de elementos retangulares de igual espessura. Para cada elemento é calculada a temperatura média a resistência à compressão média e o módulo de elasticidade. Tendo em conta os valores obtidos é efetuada uma redução da secção baseando-se numa espessura “az” da zona danificada de exposição ao fogo. O método das zonas é mais trabalhoso que o método da isotérmica de 500°C, mas é considerado mais rigoroso. Para o método simplificado propõe-se avaliar a resistência da alma sem considerar a redução da secção da alma. Propõe-se ainda fazer o estudo da temperatura média aritmética da secção $h_{w,fi}$

8. REFERENCIAS

8.1. BIBLIOGRAFIA

- [1] CEN - EN 1994-1-2; “Eurocode 4 - Design of composite steel and concrete structures- Part 1-2: General rules - Structural fire design”; Brussels, August 2005.
- [2] R. Kindmann, R. Bergmann, L-G. Cajot, J. B. Seleich; “Effect of reinforced concrete between the flanges of the steel profile of partially encased composite beam”; *Journal of Constructional Steel Research*, 27, pp 107-122, 1993.
- [3] Hunaiti, Y.; Fattah, B. A.; “Design considerations of partially encased composite columns”, *Proceedings Institution of Civil Engineers Structures & Buildings*, v.106, pp.75-82, Feb. 1994.
- [4] D.Hosser, T. Dorn, O. El-Nesr, “Experimental and numerical studies of composite beams exposed to fire”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 120, No.10, pp. 2871-2892, 1994.
- [5] A. Plumier, A. Abed, B. Tiliouine, “Increase of buckling resistance and ductility of H-sections by encased concrete”, *Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas*, E & FN Spon, London, ISBN: 0419 198903, 1995.
- [6] Joachim Lindner, Nikos Budassis; “Lateral torsional buckling of partially encased composite beams without concrete slab”; *Composite construction in steel and concrete IV*, conference proceedings, May 28th to June 2nd , Banff, Alberta, Canada, pp. 117-128, 2000.
- [7] R. Maquoi, C. Heck, V. Ville de Goyet, et al, (European commission), “Lateral torsional buckling in steel and composite beams”; ISBN 92-894-6414-3; Book 1,2 and 3; *Technical steel research final report* EUR 20888 EN; August 2002.
- [8] I.M. Assi, S.M. Abed, Y.M. Hunaiti, “Flexural strength of composite beams partially encased in lightweight concrete”, *Pakistan Journal of Applied Sciences* 2(3), pp. 320-323, 2002.

- [9] Akio Kodaira, Hideo Fujinaka, Hirokazu Ohashi and Toshihiko Nishimura; “Fire Resistance of Composite Beams Composed of Rolled Steel Profile Concreted Between Flanges”; *Fire Science and Technology* Vol.23 No.3, pp. 192-208, 2004.
- [10] P.M.M. Vila Real, N. Lopes, L. Simões da Silva, J. –M. Franssen, “Lateral-torsional buckling of unrestrained steel beams under fire conditions: improvement of EC3 proposal” *Computers and Structures* 82 (2004) 1737-1744.
- [11] Brent Prickett, Robert Driver, "Behaviour of partially encased composite columns made with high performance concrete", *Structural Engineering report n° 262*, University of Alberta, Department of Civil & Environmental Engineering, 2006.
- [12] A.Y. Elghazouli, J. Treadway. “Inelastic behaviour of composite members under combined bending and axial loading”, *Journal of Constructional Steel Research*, 64, pp. 1008–1019, 2008.
- [13] Tese de Mestrado. Márcio Cláudio Viveiros Fernandes. Verificação da resistência ao fogo de estruturas de betão com base nos métodos simplificados do EC2 – parte 1-2 Fevereiro de 2008.
- [14] Silvana de Nardin, Ana Lucia H.C. El Debs, “Study of partially encased composite beams with innovative position of stud bolts”, *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 65, Issue 2, pp. 342-350, February 2009.
- [15] António J.P. Moura Correia, João Paulo C. Rodrigues, “Fire resistance of partially encased steel columns with restrained thermal elongation”, *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 67, Issue 4, pp. 93-601, April 2011.
- [16] E. G. Choi, Y. S Shin, “The structural behavior and simplified thermal analysis of normal-strength and high-strength concrete beams under fire” *Journal of Engineering Structures* 3 Feb 2011.
- [17] Cajot Louis-Guy, Gallois Louis, Debruyckere Rik, Franssen Jean-Marc, Simplified design method for slim floor beams exposed to fire, Nordic Steel Construction Conference 2012, Oslo, Norway, 5-7 September 2012.

- [18] Paulo A.G. Piloto, Ana B. R. Gavilan, Marco Zipponi, Alberto Marini, Luís M. R. Mesquita, Giovanni Plizzari; “Experimental Investigation of the Fire Resistance of Partially Encased Beams” *Journal of Constructional Steel Research* Jan2013, Vol. 80, p121-137 17p.
- [19] CEN - EN 1993-1-1; “Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules - Rules for buildings.”, *European standards*; Brussels, 2005.
- [20] CEN - EN 1993-1-2; “Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design”, *European standards*; Brussels, April 2005.
- [21] CEN - EN 1992-1-1; “Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings.”, *European standards*; Brussels, 2004.
- [22] CEN - EN 1992-1-2; “Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules structural fire design.”, *European standards*; Brussels, 2004.
- [23] ISO 834-1. “Fire-resistance tests - Elements of building construction – Part 1: general requirements”. 1999.
- [24] Vila Real, Paulo, “Incêndio em estruturas metálicas - Cálculo estrutural”, *Edições Oriom*, capítulo 2, pág. 12,18 e 19, 1ª Edição; 2003.
- [25] CEN - EN 1991-1-2; “Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions on structures exposed to fire”, *European standards*; Brussels, 2009.
- [26] ANSYS® Academic Research, Release 14.0, Help System, ANSYS, Inc.
- [27] N.S Trahair ; “Flexural—Torcional Buckling of Structures” E & FN Spon, An Imprint of Chapman & Hall, 1993.
- [28] Simões, Rui A. D., “Dimensionamento de estruturas metálicas - Eurocódigo 3: Projeto de estruturas de aço - Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios”, *Edição CMM*, capítulo 3, pp. 146, 2ª Edição; Fevereiro 2007.