

**COLUNAS MISTAS PARCIALMENTE REVESTIDAS:
EFEITO DA RESISTÊNCIA E RIGIDEZ NA
RESISTÊNCIA À FLAMBAGEM SOB AÇÃO DO FOGO**

Bruno Fortes Alfredo

Dissertação apresentada à
Escola Superior de Tecnologia e de Gestão
Instituto Politécnico de Bragança

para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Industrial
Área de Especialização de Engenharia Mecânica
No âmbito da dupla diplomação com a
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Julho 2018

Esta página foi deixada intencionalmente em branco.

**COLUNAS MISTAS PARCIALMENTE REVESTIDAS:
EFEITO DA RESISTÊNCIA E RIGIDEZ NA
RESISTÊNCIA À FLAMBAGEM SOB AÇÃO DO FOGO**

Bruno Fortes Alfredo

Dissertação apresentada à

Escola Superior de Tecnologia e de Gestão

Instituto Politécnico de Bragança

para obtenção do grau de Mestre em

Engenharia Industrial

Área de Especialização de Engenharia Mecânica

No âmbito da dupla diplomação com a

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Orientador (IPB):

Prof. Dr. Paulo Alexandre Gonçalves Piloto

Coorientador (UTFPR):

Prof. Dr. Diego Rizzotto Rossetto

Julho 2018

Esta página foi deixada intencionalmente em branco.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo cuidado e direção em todos os momentos da minha vida e pelas oportunidades que me conduziram até aqui. Ele que me proporcionou conhecimento, dedicação e discernimento, me fortalecendo nas horas difíceis deste percurso acadêmico.

Agradeço especialmente aos meus pais, Paulo e Gisa, pelo amor incondicional, pelo incentivo aos estudos e por nunca medirem esforços para me apoiar e sustentar durante toda a minha carreira acadêmica. Serei eternamente grato. Agradeço também a minha irmã, Ariane, e a toda minha família, por estarem ao meu lado, sempre torcendo por mim.

A minha namorada, Isabel, agradeço pelo seu carinho e amor, por me apoiar nas decisões e por sempre me incentivar a alcançar novos objetivos. Agradeço por todos os momentos de alegria compartilhados durante este tempo de universidade, pela compreensão e força nos momentos difíceis, até mesmo nesta etapa final à distância.

Ao meu orientador professor Dr. Paulo Piloto, que tão prontamente aceitou o desafio de me orientar durante este período no IPB, transmitindo seus conhecimentos de forma clara e precisa, estando sempre disponível e disposto a fornecer orientações para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu coorientador professor Dr. Diego Rossetto que também tão prontamente aceitou o desafio de me orientar a distância, estando sempre presente e prontamente me auxiliando durante este período de conclusão de curso.

Agradeço a minha prima, Evelyn, pela recepção tão calorosa em Portugal, pela companhia nas viagens e passeios, que além de proporcionarem um conhecimento de novos lugares foi um aprendizado para a vida, também pelo apoio e auxílio em todos os momentos.

Agradeço a todos os amigos que fiz durante o período da universidade, tanto em Pato Branco como em Bragança, mas em especial ao Gustavo, ao Lucas e ao Edson que compartilharam este tempo na universidade, sempre me apoiando e tornando esta jornada muito melhor, e que com certeza serão amigos para o resto da vida. Também aos meus amigos de infância e da igreja que estiveram ao meu lado todo este tempo, compartilhando momentos de dificuldades e alegrias, mantendo grandes amizades.

Finalmente meus sinceros agradecimentos, a todos que de alguma forma fizeram parte da minha vida durante meu período de formação acadêmica. Obrigado!

Esta página foi deixada intencionalmente em branco.

ABSTRACT

Composite columns, partially encased with concrete, present a better structural performance than bare steel columns. The concrete between the flanges, increases the fire resistance of the column, besides the strength and stiffness, being necessary to determine this property for this type of structural element. The Eurocode 4, in the annex G, presents a simplified calculation method to determine the fire resistance of the partially encased columns, calculating the buckling resistance, around the weak axis, when exposed to the standard fire curve.

Studies developed by A. Fellouh and improved by L. Calió, concluded for unsafe results when using the Eurocode, proposing new equations and parameters for the balanced summation model presented in the annex G. This study aims to propose a new improvement for the simplified calculation model, using new formulae, based on thermal transient nonlinear simulation result, developed with the software ANSYS. This investigation deals with thirty different cross sections of partially encased columns, being ten of each specified for the profile series, HEB, HD and UC. The numerical simulation results were used to improve the model, being this solution compared with the current version of Eurocode. The results obtained with the current proposal model present safer values when compared with the current version of Eurocode. There is a good agreement between the numerical results and the new proposed solution model.

KEY WORDS

Fire; Eurocode 4; Balanced summation model; Partially encased columns; Numerical simulation.

Esta página foi deixada intencionalmente em branco.

RESUMO

Colunas mistas, parcialmente revestidas com concreto, apresentam melhor desempenho estrutural que colunas apenas de aço. O concreto entre os banzos do perfil metálico, aumenta a resistência ao fogo da coluna, além da resistência e rigidez, sendo necessário determinar esta propriedade para estes elementos estruturais. O Eurocódigo 4 parte 1-2, no anexo G, apresenta um método simplificado de cálculo para determinar a resistência ao fogo das colunas mistas parcialmente revestidas, calculando a resistência à flambagem, em relação ao eixo de menor momento de segunda ordem, quando expostas a curva de incêndio padrão.

Estudos feitos por A. Fellouh e melhorados por L. Calió, determinam que a norma apresenta resultados inseguros, propondo novas equações e parâmetros para o método da soma ponderada presente no anexo G. Neste sentido, o presente trabalho visa propor um novo aprimoramento para o modelo simplificado de cálculo, utilizando novas formulações, provenientes dos resultados de simulações térmicas transientes não lineares, utilizando o programa ANSYS. Foram estudadas trinta configurações de colunas mistas parcialmente revestidas, sendo dez perfis de cada uma das seguintes séries, HEB, HD e UC. Os resultados das simulações numéricas foram usados para realizar o aprimoramento do modelo, sendo este comparado com a sua atual versão do Eurocódigo. Os resultados obtidos com a atual proposta para o modelo, apresentam valores mais seguros, quando comparados com a atual versão do Eurocódigo. Existe uma boa concordância entre os resultados numéricos e o novo modelo de solução proposto.

PALAVRAS CHAVE

Fogo; Eurocódigo 4; Modelo da soma ponderada; Colunas mistas parcialmente revestidas; Simulação numérica.

Esta página foi deixada intencionalmente em branco.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
ABSTRACT	iii
RESUMO	v
ÍNDICE.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABELAS	xiii
NOTAÇÕES.....	xxi
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - Objetivo Geral.....	2
1.2 - Objetivos Específicos.....	2
1.3 - Metodologia do Trabalho	3
1.4 - Organização da Dissertação	4
1.5 - Estado da Arte	5
CAPÍTULO 2 - AÇÕES DO FOGO E ASPECTOS NORMATIVOS	11
2.1 - Ações do Fogo.....	11
2.1.1 - Incêndio Natural.....	12
2.1.2 - Incêndio Padrão.....	13
2.2 - Aspectos Normativos	14
2.2.1 - Normas Brasileiras	15
2.2.2 - Normas Europeias	16
CAPÍTULO 3 - COLUNAS MISTAS	19
3.1 - Colunas Mistas Parcialmente Revestidas.....	19
3.2 - Definição das Seções Transversais em Análise	20
3.3 - Materiais.....	23
3.3.1 - Propriedades Mecânicas.....	25
3.3.1.1 - Aço Estrutural e de Reforço	25

3.3.1.2 - Concreto	27
3.3.2 - Propriedades Térmicas	29
3.3.2.1 - Aço Estrutural e de Reforço	29
3.3.2.2 - Concreto	31
CAPÍTULO 4 - MÉTODO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO.....	33
4.1 - Modelo da Soma Ponderada Anexo G-EN 1994-1-2.....	33
4.1.1 - Banzos	36
4.1.2 - Alma.....	38
4.1.3 - Concreto	40
4.1.4 - Reforço	41
CAPÍTULO 5 - MÉTODO AVANÇADO DE CÁLCULO	45
5.1 - Resultados do Método Avançado de Cálculo	48
CAPÍTULO 6 - NOVA PROPOSTA DE APRIMORAMENTO	51
6.1 - Banzos	52
6.2 - Alma.....	54
6.3 - Concreto	56
6.4 - Reforço	60
6.5 - Resistência e Rigidez à Temperatura Ambiente	62
CAPÍTULO 7 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS.....	65
7.1 - Banzos	65
7.2 - Alma.....	66
7.3 - Concreto	67
7.4 - Reforço	71
7.5 - Resistência à Compressão Axial e Rigidez Efetiva à Flexão.....	72
7.6 - Resistência à Flambagem	74
CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	77
REFERÊNCIAS	79

ANEXO A - MÉTODO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO - EN 1994-1-2 ANEXO G	84
A.1 - Banzos	84
A.2 - Alma	87
A.3 - Concreto	89
A.4 - Reforços	93
A.5 - Soma Ponderada	94
A.6 - Resistência Crítica.....	96
A.7 - Esbeltez Adimensional	99
A.8 - Fator de Redução.....	103
A.9 - Resistência à Flambagem	107
ANEXO B - RESULTADOS ANSYS	112
B.1 - Temperatura Média dos Banzos	112
B.2 - Temperatura Média do Alma.....	112
B.3 - Temperatura Média e Redução do Concreto	113
B.4 - Temperatura Média dos Reforços.....	115
B.5 - Distribuição da Temperatura nas Seções.....	116
B.6 - Isotérmica de 500 °C	131
ANEXO C - MÉTODO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO - APRIMORAMENTO ...	148
C.1 - Banzos	148
C.2 - Alma	151
C.3 - Concreto	154
C.4 - Reforços.....	158
C.5 - Soma Ponderada	161
C.6 - Resistência Crítica	163
C.7 - Esbeltez Adimensional	166
C.8 - Fator de Redução	170
C.9 - Resistência à Flambagem	174

Esta página foi deixada intencionalmente em branco.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Curva tempo temperatura para incêndio natural e modelo de incêndio natural [25].	12
Figura 2 – Modelo de incêndio padrão [25].	13
Figura 3 – Curva tempo-temperatura incêndio padrão.	14
Figura 4 – Códigos Europeus relacionados ao fogo.	17
Figura 5 – Métodos de cálculo para resistência ao fogo de estruturas. Adaptado de [1].	18
Figura 6 – Colunas mistas (a); Totalmente revestida; (b) Parcialmente revestida; (c-d) Preenchidas [29].	19
Figura 7 – Exemplos de colunas mistas parcialmente revestidas [30].	20
Figura 8 – Aspectos geométricos de colunas mistas parcialmente revestidas.	21
Figura 9 – Comprimentos de flambagem considerados.	23
Figura 10 – Massa específica do concreto convencional com o aumento da temperatura.	25
Figura 11 – Fatores de redução para as propriedades mecânicas dos aços.	27
Figura 12 – Relação Tensão-Deformação para os aços.	27
Figura 13 – (a) Fator de redução para a resistência a compressão e módulo de elasticidade do concreto a elevadas temperaturas. (b) Relação Tensão-Deformação para o concreto.	28
Figura 14 – Coeficiente de redução para a resistência a tração do concreto.	29
Figura 15 – Propriedades térmicas dos aços.	31
Figura 16 – Propriedades térmicas do concreto.	32
Figura 17 – Modelo da soma ponderada de acordo com anexo G da EN 1994-1-2.	34
Figura 18 – Diagrama para o método simplificado de cálculo.	36
Figura 19 – Fator de redução β para a tensão de escoamento da alma em cada resistência ao fogo.	39
Figura 20 – Temperatura média do reforço obtida indiretamente.	43
Figura 21 – Elemento PLANE 55. Adaptado de [37].	46
Figura 22 – Etapas de criação do modelo até a malha final para o perfil HEB 240. (a)Pontos; (b)Linhas; (c) Áreas; (d)Malha.	46
Figura 23 – Condições de contorno para a simulação.	47
Figura 24 – Resultados retirados das simulações numéricas.	49

Figura 25 – Evolução da temperatura para R30, R60, R90 e R120 do perfil HEB 240.	49
Figura 26 – Temperatura média do banzo para EN 1994-1-2, ANSYS e Aprimoramento. (a) HEB (b) HD (c) UC	54
Figura 27 – Temperatura média da alma para EN 1994-1-2, ANSYS e Aprimoramento. (a) HEB (b) HD (c) UC.	56
Figura 28 – Temperatura média do concreto para EN 1994-1-2, ANSYS e Aprimoramento. (a) HEB (b) HD (c) UC.....	57
Figura 29 – Redução do concreto vertical e horizontal para EN 1994-1-2, ANSYS e Aprimoramento.....	59
Figura 30 – Temperatura média do reforço para EN 1994-1-2, ANSYS e Aprimoramento. (a) HEB (b) HD (c) UC.	61
Figura 31 – Comparação entre o Anexo G (a,c,e) e o Aprimoramento (b,d,f) com os resultados numéricos para a temperatura média dos banzos.	66
Figura 32 – Comparação entre o Anexo G (a,c,e) e o Aprimoramento (b,d,f) com os resultados numéricos para a temperatura média da alma.	67
Figura 33 – Comparação entre o Anexo G (a,c,e) e o Aprimoramento (b,d,f) com os resultados numéricos para a temperatura média do concreto.	68
Figura 34 – Comparação entre o Anexo G (a,c,e) e o Aprimoramento (b,d,f) com os resultados numéricos para a redução vertical do concreto.	70
Figura 35 – Comparação entre o Anexo G (a,c,e) e o Aprimoramento (b,d,f) com os resultados numéricos para a redução horizontal do concreto.	71
Figura 36 – Comparação entre o Anexo G (a,c,e) e o Aprimoramento (b,d,f) com os resultados numéricos para a temperatura média dos reforços.	72
Figura 37 – Comparação entre o Anexo G e o Aprimoramento para a resistência plástica a compressão axial.....	73
Figura 38 – Comparação entre o Anexo G e o Aprimoramento para a rigidez efetiva à flexão.	74
Figura 39 – Curvas de flambagem para o comprimento $L= 3$ m, para os três comprimentos de flambagem, para EN 1994-1-2 (a,c,e) e o Aprimoramento realizado (b,d,f).....	75
Figura 40 – Curvas de flambagem para o comprimento $L= 4$ m, para os três comprimentos de flambagem, para EN 1994-1-2 (a,c,e) e o Aprimoramento realizado (b,d,f).....	76

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Configurações dos perfis estudados.....	22
Tabela 2 – Propriedades mecânicas do aço estrutural S355 laminado a quente.....	23
Tabela 3 – Propriedades mecânicas do aço de reforço S500 NR classe B.....	24
Tabela 4 – Propriedades mecânicas do concreto C20/25.	24
Tabela 5 – Relação tensão-deformação para o aço estrutural e de reforço a elevadas temperaturas.....	26
Tabela 6 – Fatores de redução para o aço estrutural e aço de reforço a elevadas temperaturas.....	26
Tabela 7 – Relação tensão-deformação do concreto sob compressão a elevadas temperaturas.....	27
Tabela 8 – Fatores de redução para o concreto a elevadas temperaturas.	28
Tabela 9 – Coeficiente de ponderação para rigidez efetiva à flexão.	35
Tabela 10 – Parâmetros para temperatura média dos banzos [1].	37
Tabela 11 – Parâmetros para a redução da altura da alma [1].	38
Tabela 12 – Temperatura média da alma obtida indiretamente de acordo com o Anexo G em [°C].	39
Tabela 13 – Redução da espessura da área de concreto [1].....	40
Tabela 14 – Temperatura média do concreto [1].	40
Tabela 15 – Fator de redução k_y, t para a tensão de escoamento do aço do reforço [1].	42
Tabela 16 – Fator de redução k_E, t para o módulo de elasticidade do aço do reforço [1].	42
Tabela 17 – Modelagem e definições da malha.	48
Tabela 18 – Temperatura mínima e máxima da seção transversal em [°C].	50
Tabela 19 – Comparação entre método simplificado da norma EN 1994-1-2 e aprimoramentos propostos.....	51
Tabela 20 – Parâmetros aprimorados para temperatura média do banzo.	53
Tabela 21 – Parâmetros aprimorados para temperatura média da alma.	55
Tabela 22 – Parâmetros aprimorados para temperatura média do concreto.	57
Tabela 23 – Parâmetros aprimorados para redução vertical do concreto.	58
Tabela 24 – Parâmetros aprimorados para redução horizontal do concreto.	58
Tabela 25 – Parâmetros aprimorados para temperatura média do reforço.	61

Tabela 26 – Resistência a compressão axial e Rigidez efetiva à flexão à temperatura ambiente.	63
Tabela 27 – Temperatura média dos banzos - EN1994-1-2.	84
Tabela 28 – Fatores de redução da tensão de escoamento e módulo de elasticidade do aço estrutural para o banzo - EN1994-1-2.	84
Tabela 29 – Propriedades mecânicas do aço estrutural reduzidas de acordo com a temperatura média do banzo - EN1994-1-2.	85
Tabela 30 – Resistência plástica à compressão axial dos banzos - EN1994-1-2.	85
Tabela 31 – Rigidez à flexão do banzo - EN1994-1-2.	86
Tabela 32 – Redução geométrica da alma - EN1994-1-2.	87
Tabela 33 – Tensão de escoamento da alma reduzida - EN1994-1-2.	87
Tabela 34 – Resistência plástica à compressão axial da alma - EN1994-1-2.	88
Tabela 35 – Rigidez à flexão da alma - EN1994-1-2.	88
Tabela 36 – Temperatura média do concreto - EN1994-1-2.	89
Tabela 37 – Redução do concreto para as duas direções - EN1994-1-2.	90
Tabela 38 – Fatores de redução da resistência e elasticidade do concreto - EN1994-1-2.	90
Tabela 39 – Módulo de elasticidade secante à elevadas temperaturas - EN1994-1-2.	91
Tabela 40 – Resistência plástica à compressão axial do concreto - EN1994-1-2.	91
Tabela 41 – Rigidez à flexão do concreto - EN1994-1-2.	92
Tabela 42 – Fatores de redução para a tensão de escoamento e módulo de elasticidade do aço de reforço e momento de segunda ordem para os reforços- EN1994-1-2.	93
Tabela 43 – Resistência plástica à compressão axial do reforço - EN1994-1-2.	93
Tabela 44 – Rigidez à flexão do reforço - EN1994-1-2.	94
Tabela 45 – Resistência plástica à compressão axial da seção transversal - EN1994-1-2.	94
Tabela 46 – Rigidez efetiva à flexão da seção transversal - EN1994-1-2.	95
Tabela 47 – Resistência crítica à flambagem para $L_{\theta} = 3,0$ m.	96
Tabela 48 - Resistência crítica à flambagem para $L_{\theta} = 2,1$ m.	96
Tabela 49 – Resistência crítica à flambagem para $L_{\theta} = 1,5$ m.	97
Tabela 50 – Resistência crítica à flambagem para $L_{\theta} = 4,0$ m.	97
Tabela 51 – Resistência crítica à flambagem para $L_{\theta} = 2,8$ m.	98
Tabela 52 – Resistência crítica à flambagem para $L_{\theta} = 2,0$ m.	99
Tabela 53 – Esbeltez adimensional para $L_{\theta} = 3,0$ m.	99

Tabela 54 – Esbeltez adimensional para $L_{\theta} = 2,1$ m.....	100
Tabela 55 – Esbeltez adimensional para $L_{\theta} = 1,5$ m.....	101
Tabela 56 – Esbeltez adimensional para $L_{\theta} = 4,0$ m.....	101
Tabela 57 – Esbeltez adimensional para $L_{\theta} = 2,8$ m.....	102
Tabela 58 – Esbeltez adimensional para $L_{\theta} = 2,0$ m.....	102
Tabela 59 – Fator de redução para $L_{\theta} = 3,0$ m.....	103
Tabela 60 – Fator de redução para $L_{\theta} = 2,1$ m.....	104
Tabela 61 – Fator de redução para $L_{\theta} = 1,5$ m.....	104
Tabela 62 – Fator de redução para $L_{\theta} = 4,0$ m.....	105
Tabela 63 – Fator de redução para $L_{\theta} = 2,8$ m.....	106
Tabela 64 – Fator de redução para $L_{\theta} = 2,0$ m.....	106
Tabela 65 – Resistência à flambagem da coluna para $L_{\theta} = 3,0$ m.	107
Tabela 66 – Resistência à flambagem da coluna para $L_{\theta} = 2,1$ m.	107
Tabela 67 – Resistência à flambagem da coluna para $L_{\theta} = 1,5$ m.	108
Tabela 68 – Resistência à flambagem da coluna para $L_{\theta} = 4,0$ m.	109
Tabela 69 – Resistência à flambagem da coluna para $L_{\theta} = 2,8$ m.	109
Tabela 70 – Resistência à flambagem da coluna para $L_{\theta} = 2,0$ m.	110
Tabela 71 – Temperatura média dos banzos - ANSYS.....	112
Tabela 72 – Temperatura média da alma - ANSYS.....	112
Tabela 73 – Temperatura média do concreto dentro da isotérmica de 500 °C - ANSYS.	113
Tabela 74 – Redução vertical do concreto de acordo com a isotérmica de 500 °C - ANSYS.....	114
Tabela 75 – Redução horizontal do concreto de acordo com a isotérmica de 500 °C - ANSYS.....	114
Tabela 76 – Temperatura média dos reforços - ANSYS.....	115
Tabela 77 – Temperaturas em HEB 240 e HEB 260 para R30, R60, R90 e R120.	116
Tabela 78 – Temperaturas em HEB 280 e HEB 300, para R30, R60, R90 e R120.	117
Tabela 79 – Temperaturas em HEB 340 e HEB 450, para R30, R60, R90 e R120.	118
Tabela 80 – Temperaturas em HEB 500 e HEB 600, para R30, R60, R90 e R120.	119
Tabela 81 – Temperaturas em HEB 700 e HEB 900, para R30, R60, R90 e R120.	120
Tabela 82 – Temperaturas em HD 260x54.1 e HD 260x142, para R30, R60, R90 e R120.	121

Tabela 83 – Temperaturas em HD 260x225 e HD 320x127, para R30, R60, R90 e R120.	122
Tabela 84 – Temperaturas em HD 320x300 e HD 400x237, para R30, R60, R90 e R120.	123
Tabela 85 – Temperaturas em HD 400x382 e HD 400x551, para R30, R60, R90 e R120.	124
Tabela 86 – Temperaturas em HD 400x818 e HD 400x1299, para R30, R60, R90 e R120.	125
Tabela 87 – Temperaturas em UC 254x254x73 e UC 254x254x132, para R30, R60, R90 e R120.....	126
Tabela 88 – Temperaturas em UC 305x305x97 e UC 305x305x137, para R30, R60, R90 e R120.....	127
Tabela 89 – Temperaturas em UC 305x305x198 e UC 356x368x129, para R30, R60, R90 e R120.....	128
Tabela 90 – Temperaturas em UC 356x368x177 e UC 356x406x340, para R30, R60, R90 e R120.....	129
Tabela 91 – Temperaturas em UC 356x406x744 e UC 356x406x1086, para R30, R60, R90 e R120.....	130
Tabela 92 – Isotérmica de 500 °C em HEB 240 e HEB 260, para R30, R60, R90 e R120.	131
Tabela 93 – Temperaturas em HEB 280 e HEB 300, para R30, R60, R90 e R120.	132
Tabela 94 – Temperaturas em HEB 340 e HEB 450, para R30, R60, R90 e R120.	133
Tabela 95 – Temperaturas em HEB 500 e HEB 600, para R30, R60, R90 e R120.	134
Tabela 96 – Temperaturas em HEB 700 e HEB 900, para R30, R60, R90 e R120.	135
Tabela 97 – Temperaturas em HD 260x54.1 e HD 260x142, para R30, R60, R90 e R120.	136
Tabela 98 – Temperaturas em HD 260x225 e HD 320x127, para R30, R60, R90 e R120.	137
Tabela 99 – Temperaturas em HD 320x300 e HD 400x237, para R30, R60, R90 e R120.	138
Tabela 100 – Temperaturas em HD 400x382 e HD 400x551, para R30, R60, R90 e R120.	139
Tabela 101 – Temperaturas em HD 400x818 e HD 400x1299, para R30, R60, R90 e R120.	140

Tabela 102 – Temperaturas em UC 254x254x73 e UC 254x254x132, para R30, R60, R90 e R120.....	141
Tabela 103 – Temperaturas em UC 305x305x97 e UC 305x305x137, para R30, R60, R90 e R120.....	142
Tabela 104 – Temperaturas em UC 305x305x198 e UC 356x368x129, para R30, R60, R90 e R120.....	143
Tabela 105 – Temperaturas em UC 356x368x177 e UC 356x406x340, para R30, R60, R90 e R120.....	144
Tabela 106 – Temperaturas em UC 356x406x744 e UC 356x406x1086, para R30, R60, R90 e R120.....	145
Tabela 107 – Temperatura média dos banzos - APRIMORAMENTO.....	148
Tabela 108 – Fatores de redução da tensão de escoamento e módulo de elasticidade do aço estrutural para o banzo- APRIMORAMENTO.	148
Tabela 109 – Propriedades mecânicas do aço estrutural reduzidas de acordo com a temperatura média do banzo - APRIMORAMENTO.....	149
Tabela 110 – Resistência plástica à compressão axial dos banzos - APRIMORAMENTO.	149
Tabela 111 – Rigidez à flexão do banzo - APRIMORAMENTO.....	150
Tabela 112 – Temperatura média da alma - APRIMORAMENTO.....	151
Tabela 113 – Fatores de redução da tensão de escoamento e módulo de elasticidade do aço estrutural para a alma - APRIMORAMENTO.	151
Tabela 114 – Propriedades mecânicas do aço estrutural reduzidas de acordo com a temperatura média da alma - APRIMORAMENTO.....	152
Tabela 115 – Resistência plástica à compressão axial da alma - APRIMORAMENTO.	152
Tabela 116 – Rigidez à flexão da alma - APRIMORAMENTO.....	153
Tabela 117 – Temperatura média do concreto - APRIMORAMENTO.....	154
Tabela 118 – Redução vertical do concreto - APRIMORAMENTO.....	154
Tabela 119 – Redução horizontal do concreto - APRIMORAMENTO.....	155
Tabela 120 – Fatores de redução da resistência e elasticidade do concreto - APRIMORAMENTO.....	155
Tabela 121 – Módulo de elasticidade secante à elevadas temperaturas - APRIMORAMENTO.....	156

Tabela 122 – Resistência plástica à compressão axial do concreto - APRIMORAMENTO.	157
Tabela 123 – Rigidez à flexão do concreto - APRIMORAMENTO.....	157
Tabela 124 – Temperatura média dos reforços - APRIMORAMENTO.....	158
Tabela 125 – Fatores de redução da tensão de escoamento e módulo de elasticidade do aço de reforço para os reforços - APRIMORAMENTO.	158
Tabela 126 – Propriedades mecânicas do aço de reforço reduzidas de acordo com a temperatura média do reforço - APRIMORAMENTO.	159
Tabela 127 – Momento de segunda ordem das barras de reforço em relação ao eixo Z - APRIMORAMENTO.....	160
Tabela 128 – Resistência plástica à compressão axial do reforço - APRIMORAMENTO.	160
Tabela 129 – Rigidez à flexão do reforço - APRIMORAMENTO.....	161
Tabela 130 – Resistência plástica à compressão axial da seção transversal - APRIMORAMENTO.....	161
Tabela 131 – Rigidez efetiva à flexão da seção transversal - APRIMORAMENTO... ..	162
Tabela 132 – Resistência crítica à flambagem para $L_{\theta} = 3,0$ m.	163
Tabela 133 - Resistência crítica à flambagem para $L_{\theta} = 2,1$ m.	163
Tabela 134 – Resistência crítica à flambagem para $L_{\theta} = 1,5$ m.	164
Tabela 135 – Resistência crítica à flambagem para $L_{\theta} = 4,0$ m.	164
Tabela 136 – Resistência crítica à flambagem para $L_{\theta} = 2,8$ m.	165
Tabela 137 – Resistência crítica à flambagem para $L_{\theta} = 2,0$ m.	166
Tabela 138 – Esbeltez adimensional para $L_{\theta} = 3,0$ m.....	166
Tabela 139 – Esbeltez adimensional para $L_{\theta} = 2,1$ m.....	167
Tabela 140 – Esbeltez adimensional para $L_{\theta} = 1,5$ m.....	168
Tabela 141 – Esbeltez adimensional para $L_{\theta} = 4,0$ m.....	168
Tabela 142 – Esbeltez adimensional para $L_{\theta} = 2,8$ m.....	169
Tabela 143 – Esbeltez adimensional para $L_{\theta} = 2,0$ m.....	169
Tabela 144 – Fator de redução para $L_{\theta} = 3,0$ m.....	170
Tabela 145 – Fator de redução para $L_{\theta} = 2,1$ m.....	171
Tabela 146 – Fator de redução para $L_{\theta} = 1,5$ m.....	171
Tabela 147 – Fator de redução para $L_{\theta} = 4,0$ m.....	172
Tabela 148 – Fator de redução para $L_{\theta} = 2,8$ m.....	173
Tabela 149 – Fator de redução para $L_{\theta} = 2,0$ m.....	173

Tabela 150 – Resistência à flambagem da coluna para $L_{\theta} = 3,0$ m.	174
Tabela 151 – Resistência à flambagem da coluna para $L_{\theta} = 2,1$ m.	174
Tabela 152 – Resistência à flambagem da coluna para $L_{\theta} = 1,5$ m.	175
Tabela 153 – Resistência à flambagem da coluna para $L_{\theta} = 4,0$ m.	176
Tabela 154 – Resistência à flambagem da coluna para $L_{\theta} = 2,8$ m.	176
Tabela 155 – Resistência à flambagem da coluna para $L_{\theta} = 2,0$ m.	177

Esta página foi deixada intencionalmente em branco.

NOTAÇÕES

Letras maiúsculas latinas

$(EI)_{c,z}$	Rigidez efetiva à flexão do concreto em torno do eixo Z, à 20 °C.
$(EI)_{eff,z}$	Rigidez efetiva à flexão da coluna torno do eixo Z, à 20 °C.
$(EI)_{f,z}$	Rigidez efetiva à flexão dos banzos em torno do eixo Z, à 20 °C.
$(EI)_{fi,c,z}$	Rigidez efetiva à flexão do concreto em torno do eixo Z, exposto ao fogo
$(EI)_{fi,eff,z}$	Rigidez efetiva à flexão da coluna torno do eixo Z, exposta ao fogo.
$(EI)_{fi,f,z}$	Rigidez efetiva à flexão dos banzos em torno do eixo Z, exposto ao fogo.
$(EI)_{fi,s,z}$	Rigidez efetiva à flexão dos reforços em torno do eixo Z, exposto ao fogo.
$(EI)_{fi,w,z}$	Rigidez efetiva à flexão da alma em torno do eixo Z, exposto ao fogo.
$(EI)_{s,z}$	Rigidez efetiva à flexão dos reforços em torno do eixo Z, à 20 °C.
$(EI)_{w,z}$	Rigidez efetiva à flexão da alma em torno do eixo Z, à 20 °C.
A_c	Área do concreto na seção transversal.
A_m/V	Fator de sessão.
A_s	Área dos reforços na seção transversal.
C_a	Calor específico do aço.
C_p	Calor específico do concreto seco.
$C_{p(T)}$	Calor específico do material em função da temperatura.
$C_{p,peak}$	Calor específico do concreto com determinado teor de umidade.
E_a	Módulo de elasticidade do aço estrutural à 20 °C.
$E_{a,f}$	Módulo de elasticidade do aço estrutural do banzo, à 20 °C.
$E_{a,f,t}$	Módulo de elasticidade do aço estrutural do banzo, à elevadas temperaturas.
$E_{a,w}$	Módulo de elasticidade do aço estrutural da alma, à 20 °C.
$E_{a,w,t}$	Módulo de elasticidade do aço estrutural da alma, à elevadas temperaturas.
$E_{a,\theta}$	Módulo de elasticidade do aço estrutural à elevadas temperaturas.
$E_{c,sec}$	Módulo secante de elasticidade do concreto à 20 °C.
$E_{c,sec,\theta}$	Módulo secante de elasticidade do concreto à elevadas temperaturas.
E_{cm}	Módulo de elasticidade médio do concreto à 20 °C.
E_s	Módulo de elasticidade do aço de reforço à 20 °C.
$E_{s,\theta}$	Módulo de elasticidade do aço de reforço à elevadas temperaturas.
G_a	Módulo de elasticidade transversal do aço estrutural à 20 °C.

H_t	Coefficiente empírico para redução da alma.
$I_{s,z}$	Momento de segunda ordem das barras de reforços em torno do eixo Z.
L	Comprimento da coluna.
L_θ	Comprimento de flambagem.
$N_{fi,cr,z}$	Resistência crítica da coluna, em torno do eixo Z, exposta ao fogo.
$N_{fi,pl,Rd}$	Resistência plástica à compressão axial da coluna, exposta ao fogo.
$N_{fi,pl,Rd,c}$	Resistência plástica à compressão axial do concreto, exposto ao fogo.
$N_{fi,pl,Rd,f}$	Resistência plástica à compressão axial dos banzos, exposto ao fogo.
$N_{fi,pl,Rd,s}$	Resistência plástica à compressão axial dos reforços, exposto ao fogo.
$N_{fi,pl,Rd,w}$	Resistência plástica à compressão axial da alma, exposto ao fogo.
$N_{fi,Rd,z}$	Resistência de projeto à compressão axial da coluna, exposta ao fogo.
$N_{pl,Rd}$	Resistência plástica à compressão axial da coluna, à 20 °C.
$N_{pl,Rd,c}$	Resistência plástica à compressão axial do concreto, à 20 °C.
$N_{pl,Rd,f}$	Resistência plástica à compressão axial dos banzos, à 20 °C.
$N_{pl,Rd,s}$	Resistência plástica à compressão axial dos reforços, à 20 °C.
$N_{pl,Rd,w}$	Resistência plástica à compressão axial da alma, à 20 °C.
T	Temperatura do elemento.
T_g	Temperatura do gás.

Letras minúsculas latinas

\dot{h}_{net}	Fluxo de calor total.
$\dot{h}_{net,c}$	Fluxo de calor proveniente da convecção.
$\dot{h}_{net,r}$	Fluxo de calor proveniente da radiação.
\vec{n}	Vetor direção.
b	Largura da seção transversal.
$b_{0,ch}$	Parâmetro para cálculo da redução horizontal do concreto.
$b_{0,cv}$	Parâmetro para cálculo da redução vertical do concreto.
$b_{c,fi}$	Espessura da camada de concreto negligenciada.
$b_{c,fi,h}$	Espessura da camada de concreto negligenciada na direção horizontal.
$b_{c,fi,v}$	Espessura da camada de concreto negligenciada na direção vertical.
e_f	Espessura do banzo.

e_w	Espessura da alma.
$f_{ap,\theta}$	Tensão proporcional do aço estrutural à elevadas temperaturas.
f_{au}	Tensão máxima de tração do aço estrutural à 20 °C.
f_{ay}	Tensão de escoamento do aço estrutural à 20 °C.
$f_{ay,f}$	Tensão de escoamento aço estrutural do banzo à 20 °C.
$f_{ay,f,t}$	Tensão de escoamento aço estrutural do banzo à elevadas temperaturas.
$f_{ay,w}$	Tensão de escoamento aço estrutural da alma à 20 °C.
$f_{ay,w,t}$	Tensão de escoamento aço estrutural da alma à elevadas temperaturas.
$f_{ay,\theta}$	Tensão de escoamento do aço estrutural à elevadas temperaturas.
f_c	Resistência à compressão do concreto à 20 °C.
$f_{c,\theta}$	Resistência à compressão do concreto à elevadas temperaturas.
f_{ck}	Resistência à compressão característica do concreto à 20 °C.
$f_{ck,cube}$	Resistência à compressão característica cúbica do concreto à 20 °C.
$f_{ck,\theta}$	Resistência à compressão característica do concreto à elevadas temperaturas.
f_{cm}	Resistência média à compressão do concreto à 20 °C.
f_{ctm}	Resistência média à tração do concreto à 20 °C.
f_{su}	Tensão máxima de tração do aço de reforço à 20 °C.
f_{sy}	Tensão de escoamento do aço de reforço à 20 °C.
$f_{sy,\theta}$	Tensão de escoamento do aço de reforço à elevadas temperaturas.
h	Altura da seção transversal.
$h_{w,fi}$	Redução geométrica da alma.
k	Relação entre a tensão de escoamento e máxima do aço de reforço.
$k_{c,t}$	Redução da resistência à tração do concreto à elevadas temperaturas.
$k_{c,\theta}$	Redução da resistência a compressão do concreto à elevadas temperaturas.
$k_{E,t}$	Redução do módulo de elasticidade do aço de reforço à elevadas temperaturas presente no anexo G da EN 1994-1-2.
$k_{E,\theta}$	Redução do módulo de elasticidade do aço estrutural à elevadas temperaturas.
$k_{f,cv}$	Coefficiente para cálculo da redução vertical do concreto.
$k_{f,f}$	Coefficiente para cálculo da temperatura média do banzo.

$k_{sE,\theta}$	Redução do módulo de elasticidade do aço de reforço à elevadas temperaturas.
$k_{sy,\theta}$	Redução da tensão de escoamento do aço de reforço à elevadas temperaturas.
k_t	Coeficiente para cálculo da temperatura média da flange.
$k_{t,c}$	Coeficiente para cálculo da temperatura média do concreto.
$k_{t,ch}$	Coeficiente para cálculo da horizontal vertical do concreto.
$k_{t,cv}$	Coeficiente para cálculo da redução vertical do concreto.
$k_{t,f}$	Coeficiente para cálculo da temperatura média do banzo.
$k_{t,s}$	Coeficiente para cálculo da temperatura média dos reforços.
$k_{t,w}$	Coeficiente para cálculo da temperatura média da alma.
$k_{w,c}$	Coeficiente para cálculo da temperatura média do concreto.
$k_{w,ch}$	Coeficiente para cálculo da horizontal vertical do concreto.
$k_{w,w}$	Coeficiente para cálculo da temperatura média da alma.
$k_{y,t}$	Redução da tensão de escoamento do aço de reforço à elevadas temperaturas presente no anexo G da EN 1994-1-2.
$k_{y,\theta}$	Redução da tensão de escoamento do aço estrutural à elevadas temperaturas.
t	Tempo.
u	Média geométrica entre u_1 e u_2 .
u_1	Cobrimento vertical de concreto da barra de reforço.
u_2	Cobrimento horizontal de concreto da barra de reforço.
ν	Coeficiente de Poisson.

Letras maiúsculas gregas

∇	Vetor gradiente.
Θ_g	Temperatura do gás.
Θ_m	Temperatura do material.
Θ_r	Temperatura irradiada.
Φ	Fator de vista.
Ω	Interior do domínio.

Letras minúsculas gregas

$\gamma_{M,fi,a}$	Fator de segurança parcial para o aço estrutural.
$\gamma_{M,fi,c}$	Fator de segurança parcial para o concreto.
$\gamma_{M,fi,s}$	Fator de segurança parcial para o aço de reforço.
$\bar{\lambda}_\theta$	Esbeltez adimensional.
α_c	Coefficiente de convecção.
β	Redução para a tensão de escoamento da alma à elevadas temperaturas.
ε	Deformação.
$\varepsilon_{ap,\theta}$	Deformação do aço à tensão proporcional à elevadas temperaturas.
$\varepsilon_{au,\theta}$	Deformação do aço à tensão máxima à elevadas temperaturas.
$\varepsilon_{ay,\theta}$	Deformação do aço à tensão de escoamento à elevadas temperaturas.
ε_{ce}	Deformação máxima do concreto à compressão.
$\varepsilon_{ce,\theta}$	Deformação máxima do concreto à compressão à elevadas temperaturas.
ε_{cu}	Deformação do concreto à compressão máxima.
$\varepsilon_{cu,\theta}$	Deformação do concreto à compressão máxima à elevadas temperaturas.
ε_f	Emissividade do fogo.
ε_m	Emissividade do material.
θ	Temperatura.
$\theta_{0,c}$	Parâmetro para cálculo da temperatura média do concreto, aprimorado.
$\theta_{0,f}$	Parâmetro para cálculo da temperatura média da flange, aprimorado.
$\theta_{0,s}$	Parâmetro para cálculo da temperatura média dos reforços, aprimorado.
$\theta_{0,t}$	Parâmetro para cálculo da temperatura média da flange.
$\theta_{0,w}$	Parâmetro para cálculo da temperatura média da alma, aprimorado.
$\theta_{c,t}$	Temperatura média do concreto.
$\theta_{f,t}$	Temperatura média dos banzos.
$\theta_{s,t}$	Temperatura média do aço de reforço.
$\theta_{w,t}$	Temperatura média da alma.
$\lambda_{(T)}$	Condutividade térmica do material em função da temperatura.
λ_a	Condutividade térmica do aço.
λ_c	Condutividade térmica do concreto.
$\rho_{(T)}$	Massa específica do material em função da temperatura.
ρ_a	Massa específica do aço.

ρ_c	Massa específica do concreto.
σ	Constante de <i>Stephan-Boltzmann</i> .
σ	Tensão
ϕ	Diâmetro das barras de reforço.
ϕ	Curva de flambagem “c”.
$\varphi_{c,\theta}$	Coefficiente de ponderação da rigidez efetiva à flexão para o concreto.
$\varphi_{f,\theta}$	Coefficiente de ponderação da rigidez efetiva à flexão para os banzos.
$\varphi_{s,\theta}$	Coefficiente de ponderação da rigidez efetiva à flexão para os reforços.
$\varphi_{w,\theta}$	Coefficiente de ponderação da rigidez efetiva à flexão para a alma.
χ_z	Coefficiente de redução para flambagem.
$\partial\Omega$	Fronteira do domínio.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

As colunas mistas parcialmente revestidas, são colunas compósitas, compostas pela combinação de concreto armado com um perfil metálico, onde o perfil metálico é apenas parcialmente revestido pelo concreto. Estes tipos de colunas combinam as propriedades mecânicas do aço com as propriedades mecânicas do concreto, resultando em colunas com melhor desempenho estrutural que colunas tradicionais simplesmente de perfis de aço. Por apresentarem um aumento de rigidez e resistência, é possível utilizar seções transversais de menores dimensões, quando comparadas com as colunas simples de aço, para o mesmo efeito de carga. Entretanto, estes materiais apresentam uma diminuição dos valores das suas propriedades mecânicas, quando submetidos a temperaturas elevadas, ocasionadas por situações de incêndio.

Para determinar a resistência à flambagem de colunas mistas parcialmente revestidas, existem normas (métodos simplificados) que auxiliam e determinam como o procedimento deve ser realizado. Especificamente para situações em que estas colunas são submetidas ao fogo, pode ser aplicado o modelo da soma ponderada, definido no anexo G da norma Europeia EN 1994-1-2 [1], utilizando uma soma ponderada da resistência e da rigidez das quatro componentes existentes na seção transversal das colunas (banzos, alma, concreto e reforços). Para determinar a resistência à flambagem de colunas mistas parcialmente revestidas será necessário determinar a resistência plástica à compressão axial e a rigidez efetiva à flexão. O método é designado como o modelo de soma ponderada para o cálculo da resistência ao fogo de colunas mistas com perfil de aço parcialmente embebido, para flambagem em torno do eixo mais fraco, exposto ao fogo de todos os lados (4 lados), de acordo com a curva padrão de temperatura-tempo ISO834 [2].

Também é possível determinar a resistência à flambagem em condições de incêndio, utilizando modelos de cálculo avançados, com o método de elementos finitos. Este método alternativo, permite obter resultados mais precisos e próximos da realidade, mas que requerem mais tempo e recursos computacionais. Com o intuito de verificação e aprimoramento do método simplificado, alguns estudos de comparação têm sido realizados entre os dois métodos. Abdelkadir Fellouh [3] apresentou um estudo realizando estas comparações, estudando perfis da série IPE e HEB, no total de vinte e quatro seções transversais, apresentou uma nova proposta de cálculo para método simplificado, utilizando novas equações e parâmetros que corrigem resultados inseguros e aproximam

resultados sobredimensionados da norma de acordo com os resultados obtidos em simulações numéricas. Complementando os estudos de A. Fellouh [3], foi apresentado por Leonardo J. Calió [4] um estudo com novos parâmetros aprimorados e uma alteração em uma das componentes no método simplificado de cálculo, confirmando os resultados obtidos por A. Fellouh [3].

Neste estudo será apresentado um aprimoramento no método simplificado de cálculo, estudando o comportamento de três diferentes séries de perfis, sendo HEB, HD e UC, propondo alterações nas equações e parâmetros para o cálculo da resistência plástica à compressão axial e rigidez efetiva à flexão, presentes no método simplificado. Os resultados destes métodos simplificados de cálculo são comparados com resultados de simulações numéricas térmicas transientes.

1.1 - Objetivo Geral

Este estudo tem como objetivo principal investigar a obtenção da resistência plástica à compressão axial e a rigidez efetiva à flexão de colunas mistas parcialmente revestidas submetidas a uma situação de incêndio, quando calculadas utilizando o modelo da soma ponderada presente no anexo G do Eurocódigo 4, parte 1-2 [1]. Os resultados serão ainda comparados com o aprimoramento do método simplificado. Estas novas propostas são determinadas a partir da aproximação dos resultados do método avançado de cálculo.

1.2 - Objetivos Específicos

Serão realizadas simulações térmicas computacionais com o objetivo de obter a distribuição da temperatura na seção transversal das colunas estudadas, para os tempos de resistência ao fogo de 30, 60, 90 e 120 minutos. As temperaturas obtidas serão utilizadas para aprimorar as equações que determinam a média das temperaturas dos componentes e o valor da redução da área resistente do concreto, garantindo que se apresentem resultados seguros.

Analizando os aprimoramentos realizados para o método simplificado de cálculo, propostos por A. Fellouh [3] e por L. Calió [4], será apresentado um aprimoramento

diferente para o método simplificado de cálculo. Serão desenvolvidas novas formulações e parâmetros para o cálculo da temperatura média das quatro componentes. Para a alma será apresentado um novo modelo para o cálculo da resistência à compressão axial e rigidez efetiva à flexão, não utilizando a redução geométrica da alma, presente no atual anexo G [1] e reduzindo as suas propriedades mecânicas de acordo com a nova equação para determinação da temperatura média da alma. Para a redução do concreto será proposto uma nova formulação, mas ainda considerando o critério da isotérmica de 500 °C, apresentada nos estudos anteriores.

1.3 - Metodologia do Trabalho

O estudo foi realizado a partir de 30 seções transversais de colunas mistas parcialmente revestidas, sendo 10 perfis da série HEB, 10 perfis da série HD e 10 perfis da série UC. O dimensionamento da seção transversal, como diâmetro e a posição dos reforços, e a escolha dos perfis foi realizada de acordo com o campo de aplicação do anexo G [1] presente no Eurocódigo EN 1994 parte 1-2 e ainda de modo a apresentar a maior variação de fator de seção, dentro de cada série de perfil.

Para as simulações computacionais foi utilizado o programa ANSYS – *Mechanical* APDL, versão 18.2 [5], realizando simulações térmicas bidimensionais transientes não lineares. A seção transversal foi exposta em todos os lados pelo efeito do fogo padrão ISO834 [2]. Após este processo, foram obtidas 30 simulações com resultados de distribuição de temperatura nos instantes de 1800, 3600, 5400 e 7200 segundos, para determinar a resistência ao fogo em 30, 60, 90 e 120 minutos, respectivamente. Este método permite definir a distribuição de temperatura no perfil, para 4 níveis de classificação de resistência ao fogo (R30, R60, R90 e R120), totalizando 120 resultados de perfis de distribuição de temperatura.

Utilizando os resultados da análise de temperatura, para cada componente e para cada período de resistência ao fogo, foram desenvolvidas equações para descrever a temperatura média de cada componente. Este processo foi desenvolvido para garantir que a temperatura do aprimoramento fique maior que a temperatura encontrada numericamente, de forma a garantir um nível de segurança superior a 1.

Para a determinação das funções de aproximação que descrevem a temperatura média de cada componente foram utilizadas projeções lineares ou quadráticas de

parâmetros geométricos que melhor aproximam as curvas de temperatura média para cada série de perfil. Os resultados finais da resistência e rigidez, calculados no aprimoramento, foram comparados com os resultados obtidos com o atual método simplificado presente no EN 1994-1-2 anexo G [1].

Também foram comparados os valores da resistência à flambagem sob ação do fogo. Para tal, foi determinado o comprimento das colunas de 3 m e 4 m, nas seguintes situações: Engastado-engastado, com coeficiente de flambagem 0,5; Engastado-pino, com coeficiente de flambagem 0,7; Pino-pino, com coeficiente de flambagem 1,0.

1.4 - Organização da Dissertação

A presente dissertação está organizada em oito capítulos, sendo apresentado nesta seção um resumo de cada um deles.

O Capítulo 1 apresenta uma breve introdução sobre o tema de pesquisa na dissertação, determina os objetivos a serem alcançados no final deste estudo, descreve a metodologia utilizada para a realização da pesquisa e o estado da arte, que enquadra o detalhe teórico sobre o assunto.

No Capítulo 2 são caracterizadas algumas ações do fogo, assim como algumas curvas para representação das ações do fogo e também os aspectos normativos envolvidos para a resistência ao fogo de colunas mistas parcialmente revestidas, tanto nas normas Brasileiras como nas normas Europeias.

No Capítulo 3 são apresentados conceitos de colunas mistas parcialmente revestidas, sua composição, as definições geométricas das seções transversais utilizadas no estudo, como também os seus materiais, com as devidas propriedades mecânicas e térmicas e o seu comportamento com o aumento da temperatura.

O Capítulo 4 apresenta o método de cálculo simplificado presente no anexo G da norma EN 1994-1-2, definindo o método de cálculo para cada componente da seção transversal de uma coluna mista parcialmente revestida, até a obtenção da resistência à flambagem sob ação do fogo.

No Capítulo 5 são apresentados o método avançado de cálculo e os parâmetros utilizados para as simulações numéricas com o programa ANSYS, apresentando também os resultados obtidos nas simulações.

No Capítulo 6 é desenvolvido o aprimoramento do método simplificado de cálculo, apresentando para cada componente as novas equações e parâmetros desenvolvidos, utilizando os resultados obtidos nas simulações numéricas.

O Capítulo 7 apresenta os resultados e as comparações realizadas graficamente entre o atual modelo e o aprimoramento realizado, tanto na resistência à flambagem sob ação do fogo para as colunas, como nas temperaturas médias para cada componente da seção transversal.

No Capítulo 8, sendo o capítulo final, são apresentadas as conclusões do estudo, como também as sugestões para futuros trabalhos.

1.5 - Estado da Arte

O comportamento de colunas e vigas quando submetidas a ação do fogo em incêndios, vem sendo estudado por vários autores nos últimos anos. Neste campo, os investigadores optam maioritariamente pela utilização de métodos numéricos, mas especificamente sobre colunas mistas parcialmente revestidas expostas ao fogo existem poucos estudos. A partir desta constatação, verificou-se a necessidade de dar a conhecer trabalhos que sigam esta problemática. Desta forma, serão apresentados a seguir algumas pesquisas de autores que realizaram investigações com temas relevantes a este estudo e que tem contribuído para o avanço do conhecimento neste campo.

Em 1954, H. L. Malhotra [6] apresentou um estudo sobre o efeito da temperatura no concreto na resistência ao esmagamento. Foram utilizados corpos de prova com diferentes diâmetros, com vários valores de relação entre água e cimento, para variados níveis de temperatura. Com o trabalho, a autora conseguiu demonstrar a significativa perda de resistência do concreto a temperaturas com valores acima de 600 °C, não dependendo da relação água cimento, mas sim da relação entre cimento e agregado. A autora determinou que a redução da resistência do concreto a temperaturas entre 200 °C e 450 °C é de aproximadamente 20 %.

Em 1964, R. F. Stevens e H. L. Malhotra [7] apresentaram um estudo mostrando o efeito da resistência ao fogo de colunas totalmente revestidas, levando em consideração as recomendações da norma Britânica BS 449. Os resultados dos testes forneceram dados importantes sobre o desempenho estrutural e de resistência ao fogo de colunas revestidas. Os autores concluíram, entre outras coisas, que a resistência ao fogo das colunas

revestidas é aproximadamente inversamente proporcional a carga aplicada e que o concreto com agregado leve sofre menos danos físicos quando exposto a altas temperaturas proporcionando uma melhor proteção.

Em 1984, J. C. Dotreppe, J. M. Franssen e J. B. Schleich [8] apresentaram um estudo sobre a resistência ao fogo, auxiliado por computador, para aços e estruturas mistas utilizando métodos de elementos finitos, empregando elementos de viga com subdivisão da seção transversal em uma malha de quadriláteros, submetido a um incremento de temperatura de acordo com a ISO834 e analisado incremento a incremento, com recurso ao método de *Newton-Raphson*. A comparação dos resultados teóricos e experimentais foi realizada para uma viga mista, obtendo bons resultados, em situações de baixas e médias temperaturas, necessitando de um aprimoramento no modelo para altas temperaturas.

Em 1989, K. Kordina [9] realizou um estudo onde apresentou tabelas de resistência ao fogo, de forma a serem usadas como guia para dimensionamento de colunas mistas, totalmente revestidas, parcialmente revestidas e preenchidas, quando submetidas à situações de incêndio, utilizando a curva de incêndio padrão ISO834. As tabelas para resistência ao fogo foram desenvolvidas para as colunas de acordo com o grau de utilização, levando em consideração as dimensões mínimas, percentual de reforço e distância entre reforços, para os diferentes graus de resistência ao fogo.

Em 1990, T. T. Lie e M. Chabot [10] fizeram um artigo que descreveu um modelo matemático para colunas de aço preenchidas com concreto, desenvolvido para cálculo da temperatura, deformação e resistência ao fogo. Os resultados obtidos através do modelo matemático foram comparados com resultados experimentais. Para o modelo matemático foi utilizado a curva de fogo padrão presente na ASTM-E119 e trinta modelos de colunas, sendo comparados com cinco testes experimentais. Como resultados conseguiram obter um modelo matemático que se adequava aos resultados experimentais, podendo prever a resistência ao fogo de colunas circulares de aço preenchidas com concreto.

Em 2002, S. Winter e J. Lange [11] realizaram um estudo onde foram feitos testes em colunas mistas parcialmente revestidas utilizando perfil de aço com alta resistência, submetidas a ação de altas temperaturas, como é o caso de incêndios. Os resultados foram comparados com as fórmulas de projeto das normas alemãs, mas com os dados existentes não conseguiram provar a confiabilidade das normas. Os autores chegaram à conclusão que altas temperaturas provocam um enfraquecimento extremo na resistência, reduzindo fortemente a eficiência das colunas feitas com aço de alta resistência.

Ainda em 2002, L. Han et al. [12], realizaram um estudo experimental com seis colunas retangulares preenchidas de concreto, com e sem proteção ao fogo, submetidas a carga axial ou excêntrica após serem expostas a curva de fogo padrão ISO834 de 1975. Como esperado, a perda de resistência dos modelos sem proteção térmica após a exposição a curva de temperatura foi maior, comparado com os modelos com proteção térmica. A resistência residual das colunas mistas foi determinada utilizando diferentes normas, e com modelos matemáticos, concluindo que os resultados comparados com os experimentais apresentavam valores aceitáveis.

Em 2010, M. Korzen, J. P. C. Rodrigues e A. M. Correia [13], realizaram um estudo experimental com colunas mistas parcialmente revestidas avaliando a resistência ao fogo com alongamento restringido. Os testes foram realizados em conjunto nas universidades de Portugal e da Alemanha, sendo analisado principalmente a influência da rigidez restritiva do revestimento de concreto na resistência ao fogo da coluna. Concluiu-se que quanto maior a rigidez do concreto de revestimento, maiores serão as forças axiais geradas durante o incêndio.

Ainda em 2010, António J. P. M. Correia e João P. C. Rodrigues [14], apresentaram os resultados de uma série de testes de resistência ao fogo feitos em colunas mistas de metal parcialmente revestidas com concreto, com alongamento térmico moderado. Foi utilizado para os testes, uma nova configuração experimental, feita especialmente para os testes de resistência ao fogo de elementos, de modo que a restrição axial e rotacional das colunas fosse similar as encontradas em estruturas reais. As conclusões do estudo foram que o concreto entre os banzos da coluna de metal, aumenta a resistência ao fogo das colunas, quando comparadas a colunas somente de metal, e também que o concreto de revestimento é importante para prevenir o encurvamento local dos banzos.

Em 2013, S. Huang, B. Davison e I. W. Burgess [15] apresentaram um estudo sobre conexões entre vigas de metal e colunas com perfil H, ambas sem revestimento e parcialmente revestidas com concreto, submetidas a altas temperaturas. Os testes tiveram por objetivo investigar o comportamento das conexões entre vigas e colunas, sujeitas as forças de conexão e torção em situações de incêndio, fornecendo dados para validação e desenvolvimento de modelos simplificados de conexões, baseado nos componentes.

Ainda em 2013, P. A.G. Piloto et al. [16] realizou uma investigação experimental sobre a resistência ao fogo de vigas mistas parcialmente revestidas de concreto, utilizando doze testes experimentais, de acordo com a Norma Europeia EN1363-1, submetidos a

exposição ao fogo padrão ISO834, antecedidos por três testes à temperatura ambiente para avaliar a resistência a carga das vigas parcialmente revestidas. Como o autor esperava, a resistência ao fogo diminuiu conforme o nível de carga aumentou. Os resultados obtidos forneceram dados essenciais para a validação e calibração de novos modelos simplificados, dados tabelados e métodos numéricos avançados.

Em 2014, S. Arezki e I. Said [17], mostraram um estudo sobre o projeto de resistência de uma coluna parcialmente revestida usando o método simplificado do anexo G da Norma Europeia EN 1994-1-2, utilizando um método prático baseado no critério de *Campus-Massonet*, adaptado para cálculo de resistência a flambagem de colunas com carga excêntrica. Verificou-se que a resistência ao fogo de uma coluna parcialmente revestida, submetida a uma carga excêntrica diminui gradualmente com o aumento do nível de carga, a relação de esbeltez ou a quantidade de excentricidade.

Em 2015, P. A. G. Piloto et al. [18], apresentaram um estudo sobre colunas mistas parcialmente revestidas submetidas a situações de incêndio, onde foram propostas novas equações para o cálculo da resistência plástica à compressão axial e rigidez efetiva à flexão como proposta de aprimoramento do método do cálculo simplificado presente no anexo G da EN 1994-1-2. Usando perfis da série IPE e HEB, foram realizadas simulações numéricas térmicas como método de comparação, demonstrando que existem valores inseguros na norma.

No final de 2015, M. Milanović, M. Cvetkovska e P. Knežević [19], publicaram um artigo sobre a capacidade de três configurações diferentes de colunas mistas, aço-concreto, submetidas ao fogo, comparando-as a uma coluna de concreto reforçado de referência. A pesquisa teve por objetivo comparar os três tipos de colunas mistas (totalmente revestida, parcialmente revestida e preenchida com concreto) analisando a absorção de calor quando submetidas a exposição ao fogo (ISO834) dos quatro lados, verificando a redução das capacidades de carga mostrados pela curva de tensão normal-momento. Verificou-se que as colunas parcialmente revestidas possuem a maior absorção de calor, devido o metal estar em contato direto com o fogo, o que reduz a sua capacidade de carga, diminuindo sua resistência ao fogo, mas que em situação à temperatura ambiente para as mesmas dimensões de seção transversal, é a configuração com maior resistência, devido ao grande percentual do perfil de aço na seção transversal.

Em 2016 J. Králik, M. Klabník e A. Grmanová [20], apresentaram um estudo sobre o projeto de colunas mistas submetidas ao fogo, considerando a não linearidade dos materiais e da geometria. Este estudo abordou a análise da resistência ao fogo de colunas

mistas de acordo com o Eurocódigo 4, parte 1-2. Utilizando o programa ANSYS, foi investigada a resistência ao fogo de dois tipos de colunas, uma de concreto armado e uma mista aço-concreto, com quatro configurações diferentes. O estudo apresentou a diferença entre as configurações e concluiu que a coluna mista carregada no perfil metálico possui maior resistência ao fogo.

Em 2016, J. Ahn e C. Lee [21], apresentaram um artigo sobre o comportamento do fogo e a resistência de vigas desprotegidas, parcialmente revestidas e *slim-floor*, investigadas experimental e numericamente sob condições de fogo padrão. Chegaram a várias conclusões, uma delas que as vigas parcialmente revestidas podem ser uma possível substituição para vigas simples de perfil H desprotegidas, por possuírem uma resistência ao fogo de duas horas ou mais, quando submetidas a um nível de carga de 30 %.

No mesmo ano, A. Piquer e D. Hernández-Figueirido [22] realizaram um estudo econômico comparando colunas parcialmente revestidas com concreto e colunas simples com e sem proteção térmica, comparando tamanhos, resistência e custos, para ver qual possuía o melhor desempenho, entre resistência ao fogo e economia. Dos três tipos de colunas apresentados no artigo, as parcialmente revestidas com concreto eram aquelas que apresentavam a melhor opção, tendo em conta o custo benefício.

No final de 2016, A. Fellouh et al. [3] apresentaram um estudo propondo um aprimoramento para o método do cálculo simplificado de cálculo para resistência à flambagem de colunas mistas parcialmente revestidas, submetidas a ação do fogo, presente no anexo G da Norma Europeia EN 1994-1-2. O estudo apresenta simulações numéricas com modelos tridimensionais, resolvido em duas etapas, primeiro encontrando resultados térmicos de distribuição de temperatura na seção transversal de colunas mistas, com perfis da série IPE e HEB e segundo encontrando a resistência à flambagem sob ação do fogo para tempo de resistência ao fogo de 30 e 60 minutos. Com os resultados obtidos foram propostas novas equações e parâmetros para o cálculo da resistência plástica a compressão axial e da rigidez efetiva à flexão, corrigindo alguns pontos inseguros presentes na norma quando comparados às simulações numéricas. Com os resultados das simulações para resistência à flambagem, os autores chegaram à conclusão que a curva de flambagem “c”, proposta na norma, não é adequada.

Em 2017 P. A.G. Piloto et al [23] publicaram um artigo sobre testes experimentais em vigas parcialmente revestidas submetidas a altas temperaturas, foi apresentado o desempenho de flexão lateral de vinte e sete vigas em diferentes níveis de temperatura,

usando a configuração de flexão em quatro pontos. A partir deste estudo, foi verificado que é necessário incluir o modo de falha de encurvamento torcional lateral em vigas parcialmente revestidas no Eurocódigo 4 para projetos de estruturas mistas de aço e concreto expostas ao fogo.

Ainda no ano de 2017, L. Calió, P. Piloto e R. Rigobello [4], com o intuito de aprimorar o estudo de Fellouh em 2016, estudaram os efeitos da resistência e rigidez no modelo da soma ponderada presente no anexo G da EN 1994-1-2, propondo algumas novas formulações para as componentes e novos parâmetros e limites para o cálculo simplificado de resistência ao fogo de colunas mistas parcialmente revestidas com perfis da série HEB e IPE. Concluiu-se que a norma apresenta alguns pontos inseguros e com as novas formulações propostas foram obtidos valores seguros, quando comparados com os resultados dos modelos avançados de cálculo.

Tendo em vista os trabalhos realizados anteriormente e a sua importância neste campo de pesquisa, este trabalho irá apresentar um novo estudo, sobre a resistência à flambagem de colunas mistas parcialmente revestidas, em situação de incêndio, com o objetivo de aprimorar os conhecimentos existentes na área.

CAPÍTULO 2 - AÇÕES DO FOGO E ASPECTOS NORMATIVOS

2.1 - Ações do Fogo

A partir deste estudo será determinado a resistência de colunas mistas parcialmente revestidas, quando submetidas à ação do fogo. Neste sentido, é importante conhecer as ações do fogo em incêndios, bem como seus meios de propagação de calor, que resultam em redução da resistência dos elementos estruturais.

A norma Europeia EN 1991-1-2 [24], define os modos de transferência de calor presentes em situação de incêndio, usados para o cálculo da resistência ao fogo. O fluxo de calor total é definido como sendo o fluxo de calor proveniente da convecção mais o fluxo de calor proveniente da radiação, por unidade de área, apresentado na equação (1). Sendo definida na superfície do elemento exposto ao fogo.

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (1)$$

A transferência de calor por convecção, é a energia transferida entre um elemento sólido e um fluido, criando um movimento no fluido devido a absorção de energia e expansão, se elevando e dando lugar a novas partículas do fluido para receber energia e assim sucessivamente. O fluxo de calor por convecção é dado pela diferença de temperatura entre o gás na vizinhança do membro exposto ao fogo e a temperatura superficial do elemento, multiplicado pelo coeficiente de convecção, apresentado na equação (2), também chamada de Lei de Resfriamento de Newton, com a temperatura dada em [°C].

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

O fluxo de calor por radiação é determinado na equação (3), que representa a energia transferida entre dois corpos por ondas eletromagnéticas, sem necessitar de um meio para se propagar. Todos os corpos emitem radiação, absorvendo ou cedendo calor.

$$\dot{h}_{net,r} = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (3)$$

Esta equação, também chamada de Lei de Stefan-Boltzmann, neste caso específico para colunas expostas ao fogo depende do fator de vista (Φ), que possui valor 1,0, quando todos os lados da coluna estão expostos diretamente ao fogo. A equação também depende das emissividades, tanto dos materiais como do fogo, depende da constante de Stefan-Boltzmann e da diferença das temperaturas elevadas à quarta potência, do ambiente do incêndio (θ_r) e do elemento que recebe a radiação (θ_m).

2.1.1 - Incêndio Natural

Segundo Valdir Silva [25], a principal característica de um incêndio, quando se vai analisar a sua influência em estruturas, é a curva de temperatura em função do tempo. A partir desta curva é possível determinar a temperatura máxima desenvolvida durante um incêndio, sendo possível calcular a redução das propriedades dos materiais presentes nos componentes estruturais, para obter o tempo de resistência ao fogo.

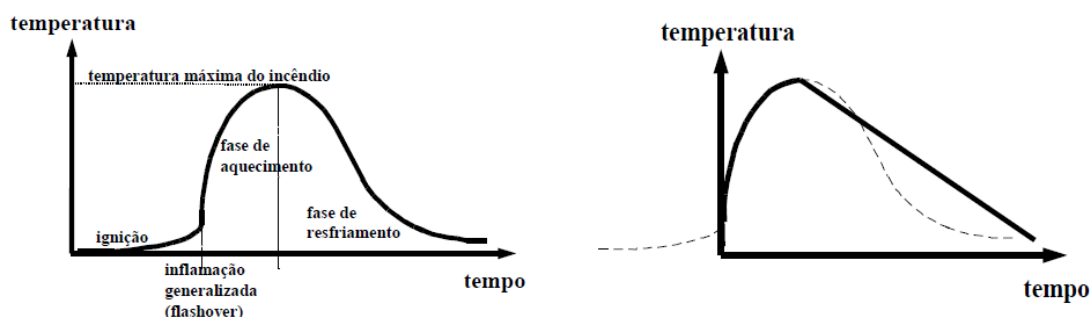


Figura 1 – Curva tempo temperatura para incêndio natural e modelo de incêndio natural [25].

Na Figura 1, é possível observar os estágios simplificados de um incêndio natural, o primeiro estágio, a ignição, é o surgimento do fogo, podendo ser totalmente controlado com os mecanismos de combate a incêndio, não apresentando riscos aos elementos estruturais que estão expostos. No instante em que ocorre a combustão generalizada, conhecida como *flashover*, a temperatura dos gases do incêndio aumenta rapidamente, a partir deste instante é necessário determinar a resistência ao fogo dos componentes estruturais, pois a temperatura elevada começa a reduzir as propriedades mecânicas da estrutura, neste caso do concreto e do aço presentes nas colunas mistas parcialmente revestidas. Considera-se que se atinge esta etapa, quando a radiação no solo do

compartimento é superior aos 20 kW/m² ou quando a temperatura dos gases quentes do compartimento atinge os 600 °C [26].

Considerando que a curva de incêndio natural é muito variável e, dependente dos materiais que estão em combustão, sendo diferente em cada situação estudada, foi convencionado uma curva de incêndio padrão, definida na norma ISO834-1 [2] de 1999, que especifica métodos de testes para determinar a resistência ao fogo de vários elementos construtivos quando expostos a esta ação.

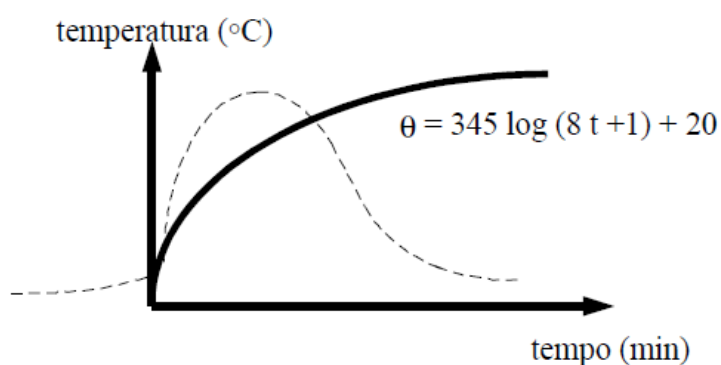


Figura 2 – Modelo de incêndio padrão [25].

A curva de incêndio padrão tem início no momento da combustão generalizada desenvolvida no compartimento, conforme exemplificado na Figura 2. Contudo, a curva padrão de incêndio pode não ser adequada para alguns casos de incêndio específicos, porém pode ser muito bem adotada para casos gerais. Além de que se decidiu utilizar curvas de incêndio padrão, para se poderem comparar os resultados dos ensaios realizados em laboratórios distintos.

2.1.2 - Incêndio Padrão

Segundo a norma Europeia EN 1991-1-2 [24] e em conformidade com a ISO834-1 [2], a curva padrão tempo temperatura, recomendada para determinação de resistência ao fogo em elementos estruturais, representando situações de incêndio, é apresentada na equação (4).

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (4)$$

Nesta equação verifica-se que θ_g é a temperatura do gás no compartimento do fogo em [°C] e t é o tempo de fogo em minutos. A evolução da temperatura com o tempo é possível visualizar na Figura 3.

No Eurocódigo 1 parte 1-2 [24] também é especificado o valor do coeficiente de convecção $\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$, para ser adotado juntamente com esta curva. A curva representa um modelo genérico para a temperatura em um compartimento ou em proximidade de um incêndio, simplificando as diversas curvas reais existentes que sofrem variações de acordo com distintos fatores presentes, e que dificilmente podem ser previstas. O modelo da curva padrão tempo temperatura, como é o adotado na norma, foi também utilizado neste trabalho para a realização das simulações computacionais.

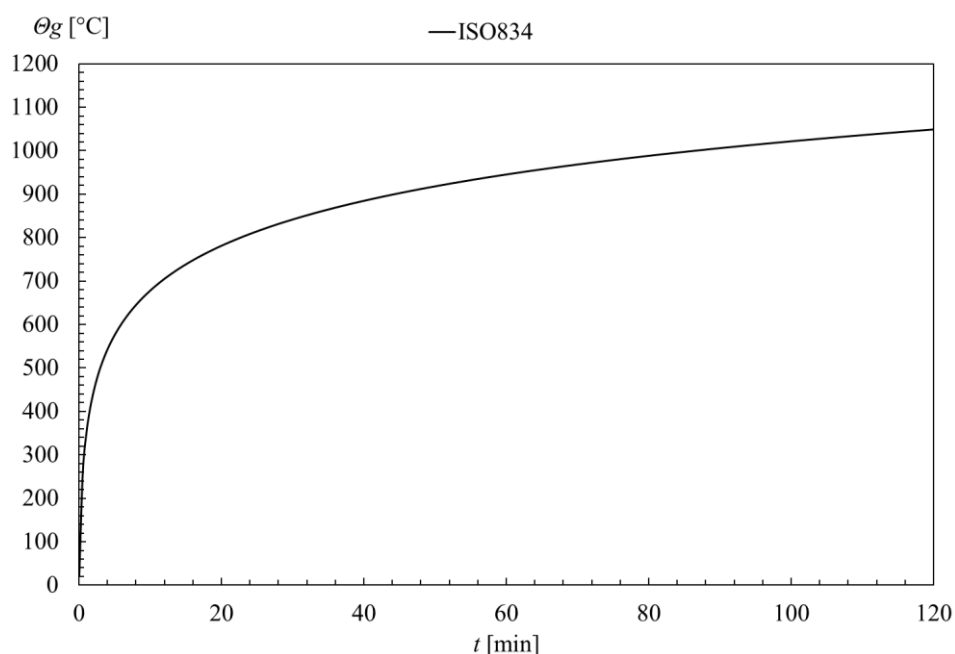


Figura 3 – Curva tempo-temperatura incêndio padrão.

2.2 - Aspectos Normativos

A preocupação com elementos estruturais e a sua resistência ao fogo é antiga, pois incidentes desastrosos são recorrentes e acarretam em muitas perdas, tanto materiais como vidas humanas. Muitos métodos e dispositivos de segurança são aplicados para a prevenção de incêndios, mas os mesmos não são infalíveis. Por este motivo é necessário conhecer a resistência ao fogo das estruturas e dimensioná-las para que o colapso ocorra

com tempo suficiente para a evacuação total e com segurança das pessoas presentes dentro da estrutura.

Para estes valores de projeto existem regras e normas específicas, que determinam a melhor forma de dimensionamento e seus passos a seguir. No caso do projeto de estruturas mistas de aço e concreto, em situações normais, pode ser utilizada a norma Europeia EN 1994-1-1 [27] e a norma Brasileira ABNT NBR 8800:2008 [28]. Estas normas apresentam os aspectos normativos que devem ser seguidos para o projeto de estruturas mistas. Em situação de incêndio, pode ser utilizada a norma Europeia EN 1994-1-2 [1] ou a norma Brasileira ABNT NBR 14323:2013 [29], que apresentam os métodos para determinação da resistência ao fogo.

Portugal adota os códigos Europeus, traduzindo-os para o português, divulgados com o prefixo de Norma Portuguesa (ex.: NP EN 1990). Os códigos Europeus traduzidos podem conter ao final anexos nacionais, que apresentam especificidades do país e são pertinentes a realidade do mesmo que não são especificadas nos códigos Europeus.

2.2.1 - Normas Brasileiras

Semelhantemente aos países Europeus, o Brasil possui suas normas técnicas que direcionam e servem como base para o desenvolvimento de projetos estruturais. A Associação Brasileira de Normas Técnicas, juntamente com os comitês Brasileiros relevantes envolvidos, são responsáveis pela elaboração das normas, nas mais variadas áreas de normatização.

Relevante a este trabalho existe a norma ABNT NBR 8800:2008 [28], para projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. No Anexo P desta norma encontram-se as especificações técnicas para o dimensionamento de colunas mistas, tanto total como parcialmente revestidas ou preenchidas de concreto, em condições normais de temperatura. Para a resistência ao fogo destes elementos estruturais, existe a norma ABNT NBR 14323:2013, que determina o dimensionamento de estruturas de aço e estruturas mistas, aço e concreto, em situações de incêndio. A norma apresenta dimensionamento em situação de incêndio como a verificação da estrutura, contendo ou não proteção contra incêndio, referente a estabilidade e a capacidade de resistir aos esforços solicitados a elevadas temperaturas, com o objetivo de evitar o seu colapso em

condições que prejudiquem a evacuação das edificações, ou quando for o caso em condições que não prejudiquem a ação de combate ao fogo [29].

No anexo B da norma Brasileira ABNT NBR 14323:2013 [29], é apresentado o mesmo método simplificado de cálculo para resistência à flambagem de colunas mistas parcialmente revestidas, em situação de incêndio, presente no anexo G da norma Europeia EN 1994-1-2 [1], portanto este estudo é igualmente aplicável ao modelo presente na norma Brasileira.

2.2.2 - Normas Europeias

A comissão da comunidade europeia em 1975 decidiu adotar um programa de ação no campo da construção, baseado em seus acordos, com o objetivo de eliminar os obstáculos técnicos ao comércio e harmonizar as especificações técnicas. Nos anos oitenta, as primeiras gerações dos códigos Europeus foram lançadas, contando com o apoio do comitê de direção com representantes dos estados membros. O programa estabilizava e harmonizava as normas técnicas para o projeto de construções, primeiramente servindo como alternativa para as regras dos países membros, até que fossem completamente substituídas [1].

Atualmente, os Códigos Europeus são divididos em dez partes, sendo eles e seus respectivos assuntos definidos em função dos materiais e ações:

- EN 1990, código Europeu: Bases para projeto de estruturas;
- EN 1991, código Europeu 1: Ações em estruturas;
- EN 1992, código Europeu 2: Projeto de estruturas de concreto;
- EN 1993, código Europeu 3: Projeto de estruturas em aço;
- EN 1994, código Europeu 4: Projeto de estruturas compósitas aço e concreto;
- EN 1995, código Europeu 5: Projeto de estruturas de madeira;
- EN 1996, código Europeu 6: Projeto de estruturas de alvenaria;
- EN 1997, código Europeu 7: Projeto geotécnico;
- EN 1998, código Europeu 8: Projeto de estruturas para resistência a sismos;
- EN 1999, código Europeu 9: Projeto de estruturas de alumínio.

Além destas divisões entre os códigos, cada código é dividido em algumas partes, sendo a parte 1-2 utilizada para o fogo, ações e resistência, ver Figura 4.

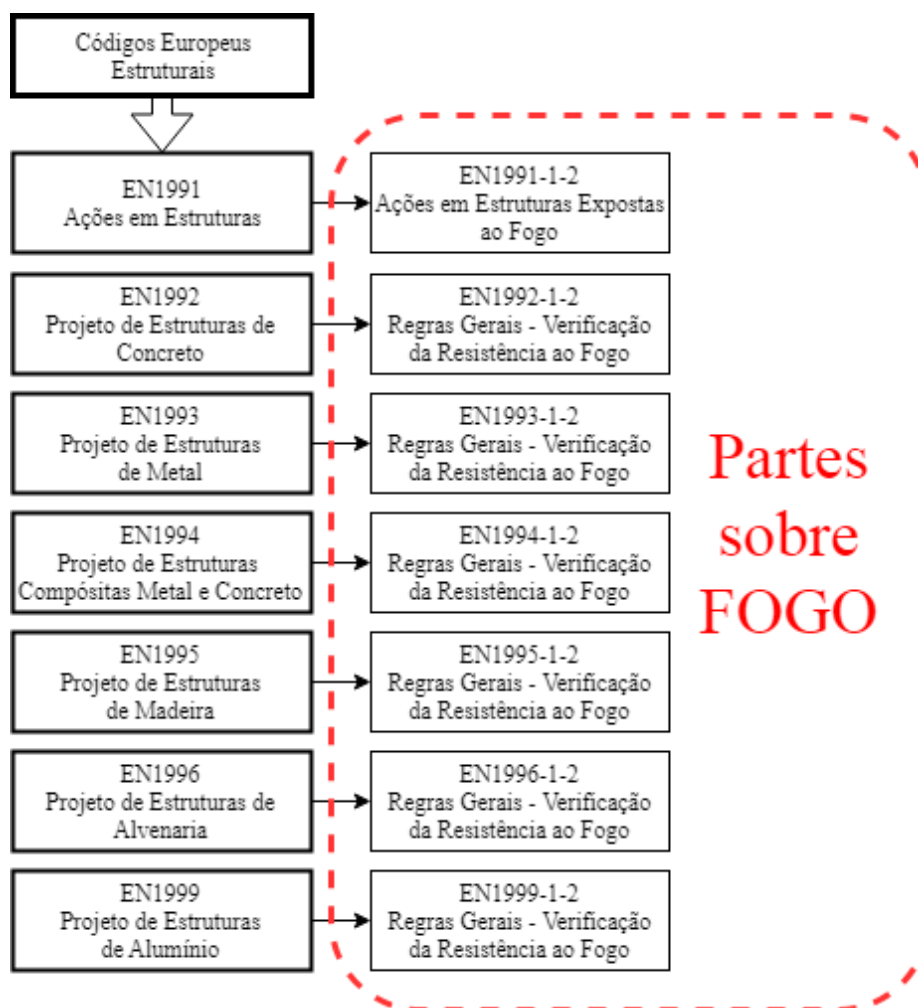


Figura 4 – Códigos Europeus relacionados ao fogo.

Tanto a norma Brasileira como as normas Europeias fornecem três métodos para o cálculo da resistência ao fogo de estruturas. Um método recorre a valores tabelados, outro método recorre a modelos simplificados de cálculos e o terceiro método permite a utilização de modelos avançados de cálculo. Na Figura 5 é apresentado um organograma presente na norma EN 1994-1-2 [1], que mostra qual modelo de cálculo é adequado, em função da análise que precisa ser feita.

Tal como referido, este trabalho irá apresentar o método simplificado de cálculo presente no anexo G da EN 1994-1-2, para a obtenção da resistência à flambagem de colunas mistas parcialmente revestidas em situações de incêndio.

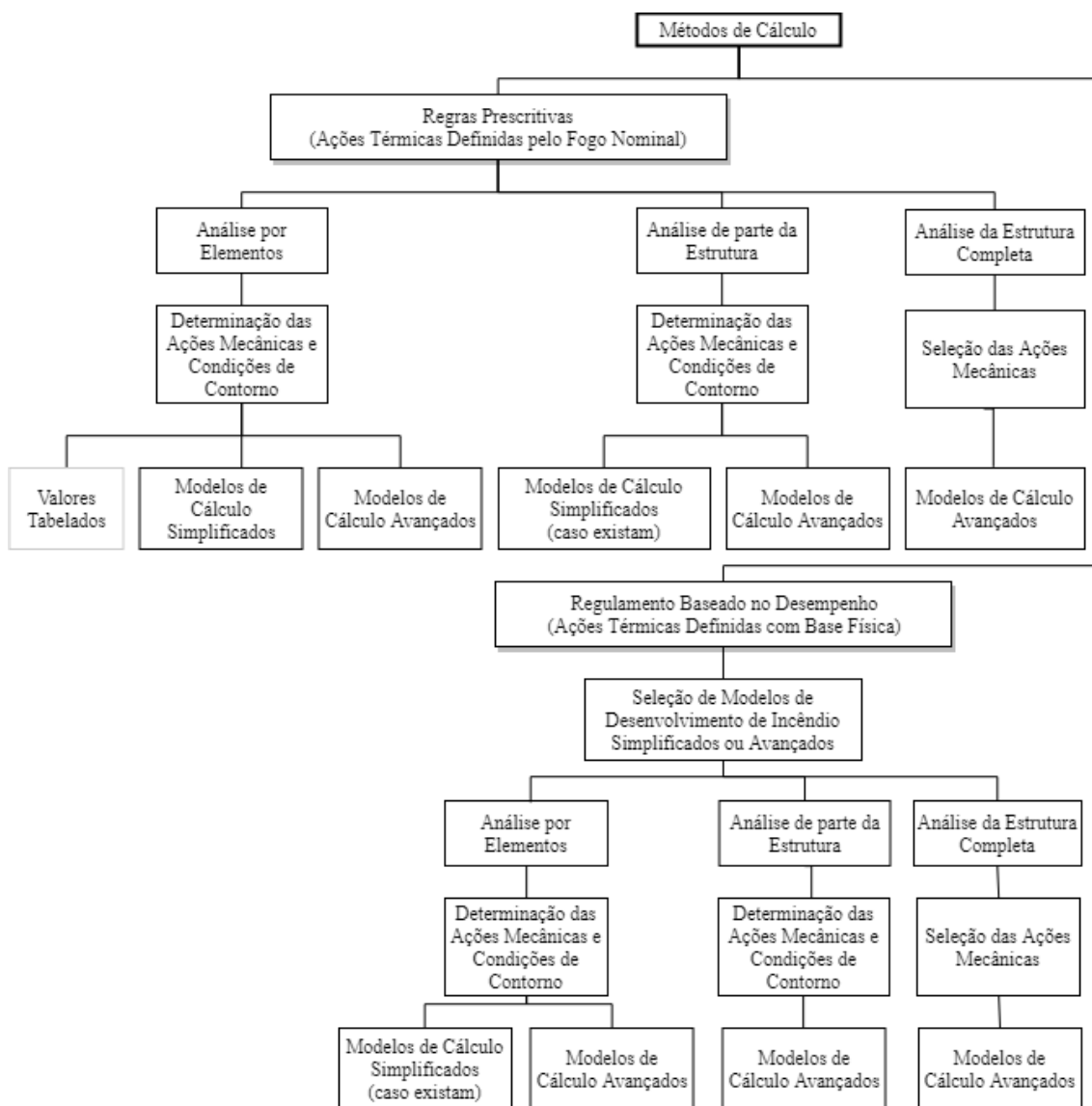


Figura 5 – Métodos de cálculo para resistência ao fogo de estruturas. Adaptado de [1].

CAPÍTULO 3 - COLUNAS MISTAS

As colunas mistas, são colunas de aço e concreto que trabalham juntos proporcionando uma elevada rigidez e resistência. No que concerne o seu aproveitamento, procura-se a utilização da melhor maneira, para potenciar as vantagens físicas e mecânicas que cada um dos componentes, aço e concreto, podem oferecer. O aço apresenta boas propriedades para os elementos estruturais, tais como: elevada resistência mecânica, ductilidade e facilidade de construção. Por outro lado, o aço não responde bem quando é submetido a altas temperaturas, por possuir elevada condutividade térmica. Esta característica é amenizada nas colunas mistas porque o concreto protege parcialmente o perfil em aço e possui menor condutividade térmica. O concreto devido a sua alta resistência a compressão, acaba fornecendo às colunas mistas maior resistência à flambagem.

A norma ABNT NBR 14323:2013 [29] classifica as colunas mistas de acordo com a posição que o concreto ocupa na seção mista, como sendo, colunas totalmente revestidas, colunas parcialmente revestidas e colunas preenchidas, representadas na Figura 6.

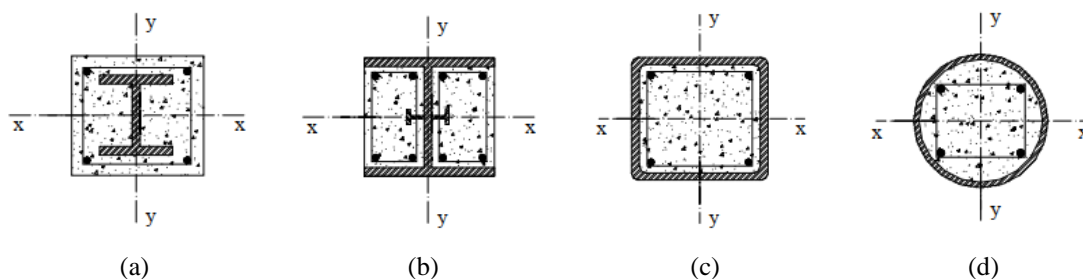


Figura 6 – Colunas mistas (a); Totalmente revestida; (b) Parcialmente revestida; (c-d) Preenchidas [29].

As colunas mistas apresentam maior capacidade de carga do que colunas simples de aço estrutural e segundo A. Piquer e D. Figueiredo [22], os elementos mistos de aço e concreto são os mais utilizados em construções de edifícios modernos no último século.

3.1 - Colunas Mistas Parcialmente Revestidas

As colunas mistas parcialmente revestidas são colunas formadas normalmente por um perfil metálico laminado a quente do tipo I ou H, com revestimento de concreto

armado entre os banzos. A seção compósita é responsável por aumentar a rigidez à flexão, comparado com as mesmas seções simples de perfil metálico. Além das vantagens mecânicas estruturais o concreto adicionado aumenta a resistência ao fogo destas estruturas. Alguns exemplos de colunas mistas parcialmente revestidas são apresentados na Figura 7.

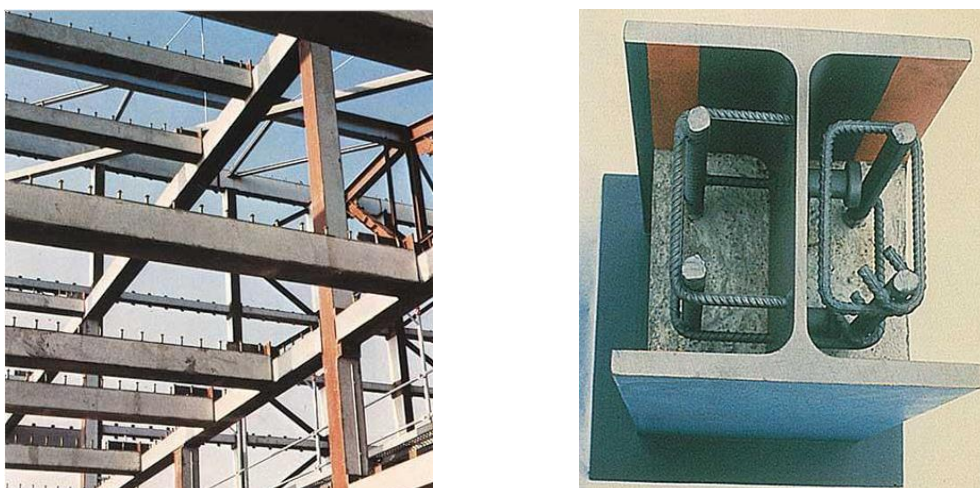


Figura 7 – Exemplos de colunas mistas parcialmente revestidas [30].

3.2 - Definição das Seções Transversais em Análise

Para este estudo, foram selecionadas trinta seções transversais, com perfis da série HEB, série HD e série UC. Para a determinação da escolha dos perfis, primeiramente foi levado em conta o método tabelar da Norma EN 1994-1-2 [1] para projeto de resistência ao fogo de colunas mistas parcialmente revestidas, buscando a maior variação de fator de seção possível. Posteriormente foram analisados os campos de aplicação do anexo G da mesma norma, e então foram definidos os perfis que estavam de acordo com o campo de aplicação, conforme a Tabela 1, podendo ser aplicado o modelo da soma ponderada nos mesmos.

O campo de aplicação do modelo restringe a escolha de perfis com uma largura (b) mínima de 230 mm e máxima de 500 mm, uma altura (h) entre 230 e 1100 mm e ainda define um percentual de reforço variável entre 1 % e 6 %. As espessuras da alma (e_w) e dos banzo (e_f) não interferem nas restrições de aplicação do modelo. Além destas restrições, para os tempos de resistência ao fogo de R90 e R120 a altura e a largura dos

perfis não devem ser inferiores a 300 mm, por este motivo as três primeiras seções transversais da série HEB e HD e as duas primeiras da série UC, para os dois últimos tempos de resistência ao fogo foram desprezadas.

O diâmetro das barras de reforço foi escolhido de maneira que o percentual de reforço, calculado utilizando a área de concreto (A_c) e a área dos reforços (A_s), se mantivesse equilibrado, de acordo com os diâmetros comerciais disponíveis, ver Figura 8. Foi utilizado uma distância u média de 50 mm, que é a média geométrica entre as distâncias de cobertura de concreto u_1 (distância entre o eixo da barra de reforço com a parte inferior do banzo) e u_2 (distância do eixo da barra de reforço com a extremidade do concreto).

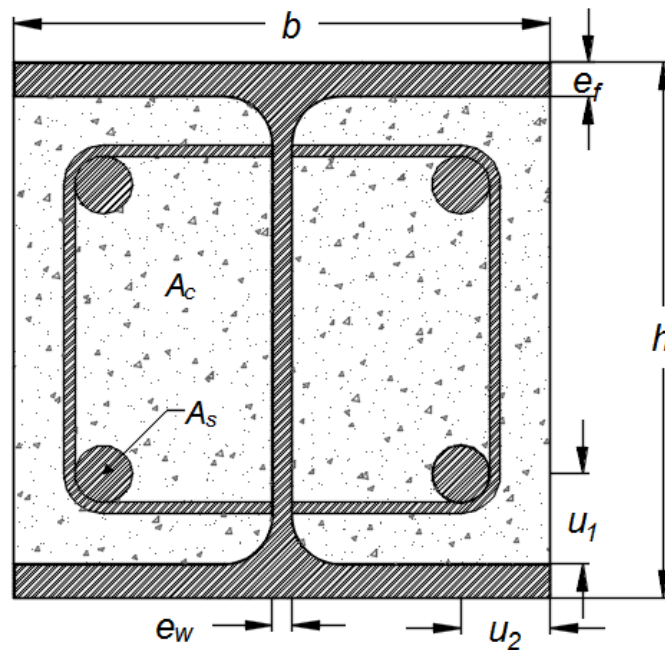


Figura 8 – Aspectos geométricos de colunas mistas parcialmente revestidas.

Para o perfil de aço foi selecionado o aço S355, com revestimento de concreto C20/25 reforçado com barras de aço B500, estes materiais terão as suas propriedades determinadas no próximo tópico deste capítulo.

A Tabela 1 apresenta as principais características geométricas e construtivas das seções transversais de colunas mistas parcialmente revestidas que foram estudadas, podendo ser observado na Figura 8, o local que cada medida é representada, sendo ϕ o diâmetro das barras de reforços.

Tabela 1 – Configurações dos perfis estudados.

Perfis	h	b	e_w	e_f	A_m/V	Nº de	ϕ	A_s	u_1	u_2	h
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[m ⁻¹]	Reforços	[mm]	A_s+A_c	[mm]	[mm]	b
HEB 240	240,0	240,0	10,0	17,0	16,67	4	20	2,67%	50	50	1,00
HEB 260	260,0	260,0	10,0	17,5	15,38	4	25	3,52%	50	50	1,00
HEB 280	280,0	280,0	10,5	18,0	14,29	4	25	3,01%	50	50	1,00
HEB 300	300,0	300,0	11,0	19,0	13,33	4	25	2,61%	50	50	1,00
HEB 340	340,0	300,0	12,0	21,5	12,55	4	32	3,79%	50	50	1,13
HEB 450	450,0	300,0	14,0	26,0	11,11	4	32	2,84%	50	50	1,50
HEB 500	500,0	300,0	14,5	28,0	10,67	4	32	2,55%	50	50	1,67
HEB 600	600,0	300,0	15,5	30,0	10,00	4	32	2,10%	50	50	2,00
HEB 700	700,0	300,0	17,0	32,0	9,52	4	32	1,79%	50	50	2,33
HEB 900	900,0	300,0	18,5	35,0	8,89	4	40	2,16%	50	50	3,00
HD 260x54,1	244,0	260,0	6,5	9,5	15,89	4	25	3,47%	50	50	0,94
HD 260x142	278,0	265,0	15,5	26,5	14,74	4	25	3,53%	50	50	1,05
HD 260x225	309,0	271,0	24,0	42,0	13,85	4	25	3,56%	50	50	1,14
HD 320x127	320,0	300,0	11,5	20,5	12,92	4	25	2,46%	50	50	1,07
HD 320x300	375,0	313,0	27,0	48,0	11,72	4	25	2,48%	50	50	1,20
HD 400x237	380,0	395,0	18,9	30,2	10,33	4	32	2,68%	50	50	0,96
HD 400x382	416,0	406,0	29,8	48,0	9,73	4	32	2,68%	50	50	1,02
HD 400x551	455,0	418,0	42,0	67,6	9,18	4	32	2,68%	50	50	1,09
HD 400x818	514,0	437,0	60,5	97,0	8,47	4	32	2,67%	50	50	1,18
HD 400x1299	600,0	476,0	100,0	140,0	7,54	4	32	2,68%	50	50	1,26
UC 254x254x73	254,1	254,6	8,6	14,2	15,73	4	25	3,55%	50	50	1,00
UC 254x254x132	276,3	261,3	15,3	25,3	14,89	4	25	3,55%	50	50	1,06
UC 305x305x97	307,9	305,3	9,9	15,4	13,05	4	25	2,40%	50	50	1,01
UC 305x305x137	320,5	309,2	13,8	21,7	12,71	4	25	2,40%	50	50	1,04
UC 305x305x198	339,9	314,5	19,1	31,4	12,24	4	25	2,40%	50	50	1,08
UC 356x368x129	355,6	368,6	10,4	17,5	11,05	4	32	2,81%	50	50	0,96
UC 356x368x177	368,2	372,6	14,4	23,8	10,80	4	32	2,81%	50	50	0,99
UC 356x406x340	406,4	403,0	26,6	42,9	9,88	4	32	2,67%	50	50	1,01
UC 356x406x744	498,0	432,0	55,6	88,9	8,65	4	32	2,67%	50	50	1,15
UC 356x406x1086	569,0	454,0	78,0	125,0	7,92	4	32	2,69%	50	50	1,25

As dimensões das seções transversais em estudo apresentadas na Tabela 1 foram utilizadas para realizar os cálculos do método simplificado de cálculo, tanto o atual modelo presente no anexo G da EN 1994-1-2 [1], como no modelo proposto de aprimoramento. Para a realização do método avançado de cálculo foi necessário apenas um ajuste na geometria, aproximando as barras de reforço como quadriláteros com a mesma área equivalente.

Para o cálculo da resistência a flambagem das colunas em estudo, é necessário determinar o comprimento das mesmas, que será, $L = 3$ e 4 m, levando em consideração as restrições do anexo G da Norma EN 1994-1-2 [1] que é válido somente para comprimento de flambagem L_θ menor que $13,5b$. Serão considerados os três comprimentos de flambagem, ver Figura 9, sendo: $L_\theta = 1,0 \times L$; $L_\theta = 0,7 \times L$; $L_\theta = 0,5 \times L$. Para as condições de pino-pino, pino-engaste e engaste-engaste, respectivamente.

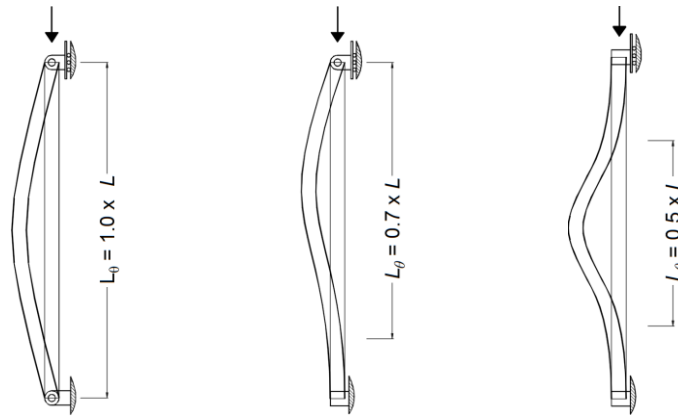


Figura 9 – Comprimentos de flambagem considerados.

3.3 - Materiais

Os materiais escolhidos para compor as colunas mistas serão aqui apresentados, além das suas propriedades, à temperatura ambiente serão apresentadas as propriedades a temperaturas elevadas. É possível consultar na norma EN 1993-1-1 [31] as propriedades de alguns tipos de aço estrutural à temperatura ambiente, e na norma EN 1993-1-2 [32], é possível consultar os fatores de redução para as propriedades dos aços a temperaturas elevadas. O aço estrutural em questão é o S355 laminado a quente, que apresenta as propriedades mecânicas listadas na Tabela 2.

O aço apresenta uma redução da tensão de escoamento conforme a sua espessura, de acordo com o catálogo da *ArcelorMittal* [33] para perfis e aços comerciais. O aço S355 de acordo com a norma EN 10025-2: 2004 apresenta as tensões de escoamento em função da espessura também na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas do aço estrutural S355 laminado a quente.

	E_a [MPa]	f_{ay} [MPa]	f_{au} [MPa]	G_a [GPa]	ν	
	210	355	510	81	0,3	
Espessura nominal [mm]	≤ 16	>16 ≤ 40	>40 ≤ 63	>63 ≤ 80	>80 ≤ 100	>100 ≤ 140
f_y [MPa]	355	345	335	325	315	295

As propriedades mecânicas do aço de reforço foram obtidas na norma EN 1992-1-1 [34] e no anexo C da mesma, onde a norma trata sobre projetos de estruturas de concreto e apresenta os valores de referência para os aços de reforço. O aço em questão

é o S500 NR classe B trabalhado a frio e apresenta suas propriedades mecânicas à temperatura ambiente na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas do aço de reforço S500 NR classe B.

f_{sy} [MPa]	f_{su} [MPa]	E_s [GPa]	k
500	540	210	1,08

As características dos concretos são encontradas na norma EN 1992-1-1 [34]. Na Tabela 4 são apresentadas as propriedades do concreto C20/25, à temperatura ambiente.

Tabela 4 – Propriedades mecânicas do concreto C20/25.

f_{ck} [MPa]	$f_{ck,cube}$ [MPa]	f_{cm} [MPa]	f_{ctm} [MPa]	E_{cm} [GPa]	ε_{cu} [%]	ε_{ce} [%]	ν
20	25	28	2,2	30	2,0	3,5	0,2

Com o aumento da temperatura, as propriedades, tanto mecânicas como térmicas dos materiais, tendem a alterar os valores, afetando a resistência e a rigidez dos componentes. Portanto é necessário a análise das propriedades dos materiais, para conhecer o seu comportamento quando são submetidos à altas temperaturas.

De acordo com a norma EN 1994-1-2 [1] a massa específica do aço ρ_a não varia com a temperatura, assumindo um valor constante.

$$\rho_a = 7850 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (5)$$

De acordo com o Eurocódigo 2 [35], a massa específica do concreto, ρ_c , varia em função da elevação da temperatura, sendo influenciada pela perda de água presente no concreto. A variação da massa específica do concreto é definida de acordo com as equações (7) a (10), todas em função da massa específica do concreto à temperatura ambiente ($\rho_c(20\text{ °C})$) determinado em (6) de acordo com a norma EN 1994-1-2 [1], para um concreto convencional sem reforço a temperatura ambiente. A variação desta propriedade está representada na Figura 10.

$$\rho_c(20\text{ °C}) = 2300 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (6)$$

$$20\text{ °C} \leq \theta_c \leq 115\text{ °C:}$$

$$\rho_c = \rho_c(20\text{ °C}) \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (7)$$

$115\text{ °C} < \theta_c \leq 200\text{ °C}$:

$$\rho_c = \rho_c(20\text{ °C})(1 - 0,02(\theta_c - 115)/85) \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (8)$$

$200\text{ °C} < \theta_c \leq 400\text{ °C}$:

$$\rho_c = \rho_c(20\text{ °C})(0,98 - 0,03(\theta_c - 200)/200) \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (9)$$

$400\text{ °C} < \theta_c \leq 1200\text{ °C}$:

$$\rho_c = \rho_c(20\text{ °C})(0,95 - 0,07(\theta_c - 400)/800) \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (10)$$

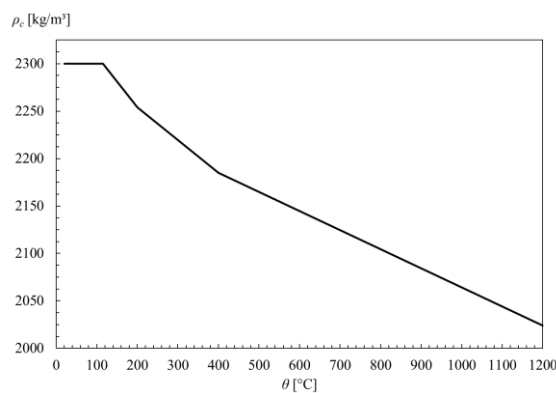


Figura 10 – Massa específica do concreto convencional com o aumento da temperatura.

3.3.1 - Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas determinam o comportamento da estrutura de acordo com o material, pois são elas que concedem rigidez e resistência aos componentes. É necessário analisar as propriedades mecânicas juntamente com a temperatura, pois o aumento da temperatura implica em uma redução das propriedades mecânicas dos materiais.

3.3.1.1 - Aço Estrutural e de Reforço

Com o aumento da temperatura os valores de tensão e deformação dos aços sofrem alteração (Figura 12). A norma EN 1994-1-2 [1] define os valores para o aço estrutural,

de acordo com a norma, podendo ser aplicado da mesma forma para o aço de reforço, apenas trocando o subíndice “a” (aço estrutural) por “s” (aço de reforço).

Tabela 5 – Relação tensão-deformação para o aço estrutural e de reforço a elevadas temperaturas.

Faixa de deformação	Tensão σ (θ)	Módulo de Elasticidade
$\varepsilon \leq \varepsilon_{ap,\theta}$	$\varepsilon_{a,\theta} E_{a,\theta}$	$E_{a,\theta}$
$\varepsilon_{ap,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{ay,\theta}$	$f_{ap,\theta} - c + (b/a)[a^2 - (\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{a,\theta})^2]^{0,5}$	$\frac{b(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{a,\theta})}{a[a^2 - (\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{a,\theta})^2]^{0,5}}$
$\varepsilon_{ay,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{au,\theta}$	$f_{ay,\theta}$	0
Parâmetros	$\varepsilon_{ap,\theta} = f_{ap,\theta}/E_{a,\theta}$ $\varepsilon_{ay,\theta} = 0,02$	
Funções	$a^2 = (\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{ap,\theta})(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{ap,\theta} + c/E_{a,\theta})$ $b^2 = c(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{ap,\theta})E_{a,\theta} + c^2$ $c = \frac{(f_{ay,\theta} - f_{ap,\theta})^2}{(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{ap,\theta})E_{a,\theta} - 2(f_{ay,\theta} - f_{ap,\theta})}$	

Na norma EN 1994-1-2 [1] também são determinados os fatores de redução para as propriedades mecânicas do aço estrutural laminado a quente e do aço de reforço trabalhado a frio em função do aumento da temperatura, tendo as principais propriedades apresentadas na Tabela 6. Para valores intermediários é possível determinar o valor utilizando interpolação linear.

Tabela 6 – Fatores de redução para o aço estrutural e aço de reforço a elevadas temperaturas.

Temperatura do aço $\theta_{a/s}$ [°C]	Fatores de redução a temperatura $\theta_{a/s}$ relativos a valores de $f_{ay/sy}$ ou $E_{a/s}$ a 20 °C			
	Aço Estrutural		Aço de Reforço	
	$k_{y,\theta} = f_{ay,\theta}/f_{ay}$	$k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$	$k_{sy,\theta} = f_{sy,\theta}/f_{sy}$	$k_{sE,\theta} = E_{s,\theta}/E_s$
20	1,00	1,0000	1,00	1,00
100	1,00	1,0000	1,00	1,00
200	1,00	0,9000	1,00	0,87
300	1,00	0,8000	1,00	0,72
400	1,00	0,7000	0,94	0,56
500	0,78	0,6000	0,67	0,40
600	0,47	0,3100	0,40	0,24
700	0,23	0,1300	0,12	0,08
800	0,11	0,0900	0,11	0,06
900	0,06	0,0675	0,08	0,05
1000	0,04	0,0450	0,05	0,03
1100	0,02	0,0225	0,03	0,02
1200	0,00	0,0000	0,00	0,00

É possível representar graficamente os fatores de redução para o aço estrutural e o aço de reforço, tal como representado na Figura 11.

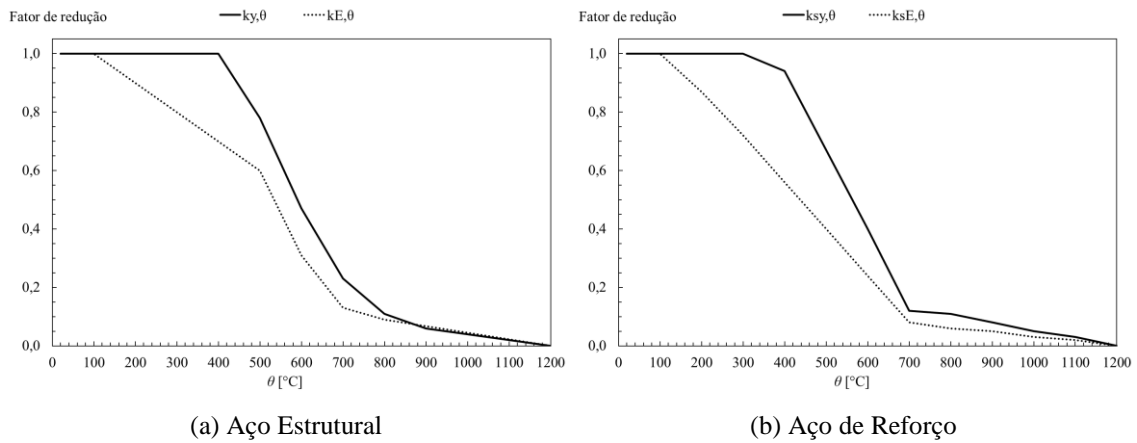


Figura 11 – Fatores de redução para as propriedades mecânicas dos aços.

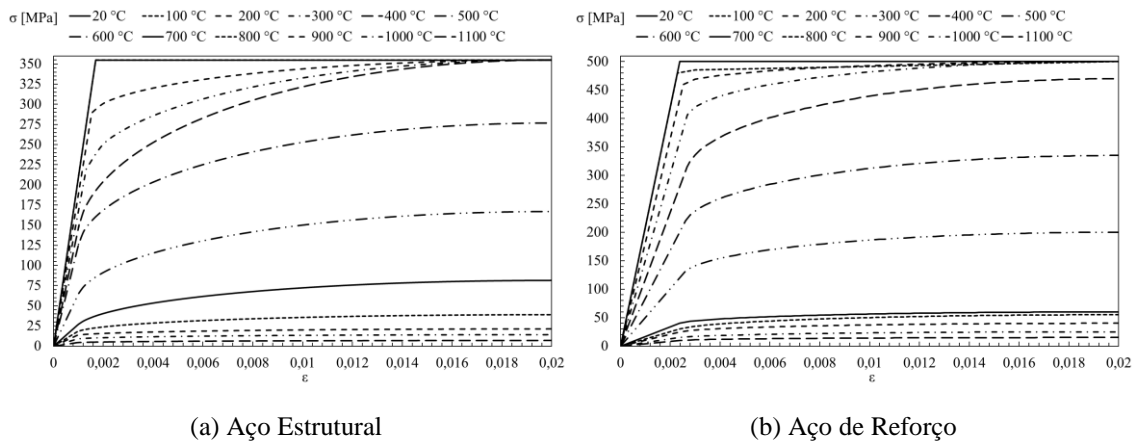


Figura 12 – Relação Tensão-Deformação para os aços.

3.3.1.2 - Concreto

Quando o concreto é submetido a elevadas temperaturas, o Eurocódigo 4 parte 1-2[1], define os valores de tensão deformação, conforme a Tabela 7, na qual apresenta as expressões da norma, representada graficamente na Figura 13 (b).

Tabela 7 – Relação tensão-deformação do concreto sob compressão a elevadas temperaturas.

Faixa de deformação	Tensão $\sigma(\theta)$
$\varepsilon \leq \varepsilon_{cu,\theta}$	$f_{c,\theta} [3(\varepsilon_{c,\theta}/\varepsilon_{cu,\theta}) / \{2 + (\frac{\varepsilon_{c,\theta}}{\varepsilon_{cu,\theta}})^3\}]$
$\varepsilon_{cu,\theta} < \varepsilon \leq \varepsilon_{ce,\theta}$	Em modelagens numéricas o ramo descendente deve ser adotado. Modelos lineares e não-lineares são permitidos.

São definidos também os fatores de redução para suas características mecânicas, como pode ser observado na Tabela 8, para um concreto convencional com agregado de sílica.

Não é apresentado nas normas um fator de redução para o módulo de elasticidade do concreto, mas de forma indireta utilizando a equação (44), que é a forma em que o anexo G da norma EN 1994-1-2 [1] determina a redução do módulo de elasticidade, é possível determinar um coeficiente de redução ($k_{E,\theta}$).

Tabela 8 – Fatores de redução para o concreto a elevadas temperaturas.

Temperatura do concreto θ_c [°C]	$k_{c,\theta} = f_{ck,\theta} / f_{ck}$	$k_{E,\theta} = E_{c,sec,\theta} / E_{c,sec}$	$\varepsilon_{cu,\theta}$
20	1,00	1,0000	0,0025
100	1,00	0,6250	0,0040
200	0,95	0,4318	0,0055
300	0,85	0,3036	0,0070
400	0,75	0,1875	0,0100
500	0,60	0,1000	0,0150
600	0,45	0,0450	0,0250
700	0,30	0,0300	0,0250
800	0,15	0,0150	0,0250
900	0,08	0,0080	0,0250
1000	0,04	0,0040	0,0250
1100	0,01	0,0010	0,0250
1200	0,00	-	-

A Figura 13 (a) representa graficamente o fator de redução da resistência à compressão e do módulo de elasticidade do concreto conforme a temperatura se eleva.

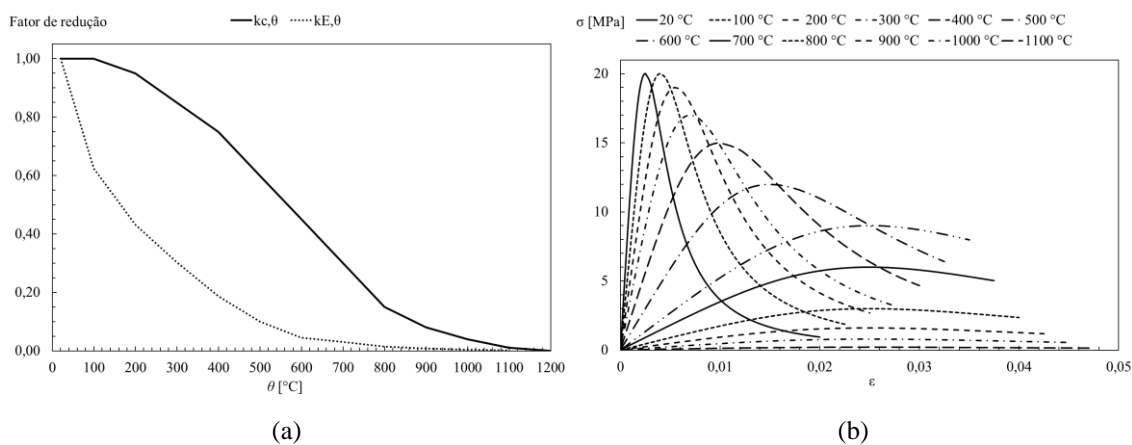


Figura 13 – (a) Fator de redução para a resistência a compressão e módulo de elasticidade do concreto a elevadas temperaturas. (b) Relação Tensão-Deformação para o concreto.

O Eurocódigo 2-1-2 [35] determina o coeficiente de redução para a resistência a tração do concreto ($k_{c,t}$) representada na Figura 14, utilizando as seguintes equações.

$$20\text{ °C} \leq \theta_c \leq 100\text{ °C:}$$

$$k_{c,t}(\theta_c) = 1,0 \quad (11)$$

$$100\text{ °C} < \theta_c \leq 600\text{ °C:}$$

$$k_{c,t}(\theta_c) = 1,0 - 1,0(\theta - 100)/500 \quad (12)$$

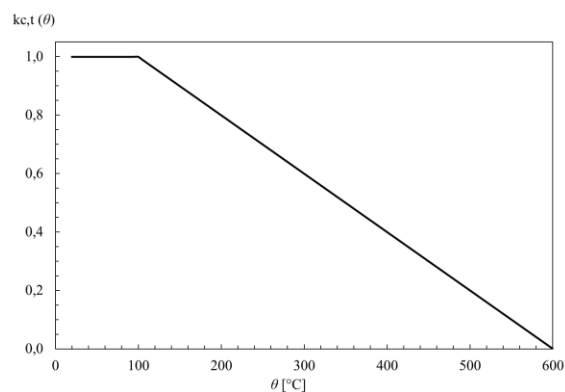


Figura 14 – Coeficiente de redução para a resistência a tração do concreto.

3.3.2 - Propriedades Térmicas

As propriedades térmicas mostram como o material interage com o calor recebido e elas também sofrem alteração conforme a temperatura aumenta. As normas Europeias, apresentam as propriedades térmicas dos materiais e também as suas variações com a temperatura.

3.3.2.1 - Aço Estrutural e de Reforço

O calor específico do aço estrutural, C_a é valido também para o aço de reforço, conforme o Eurocódigo 4 parte 1-2 [1] e é determinado através das seguintes equações em função da temperatura θ_a dada em [°C].

$20\text{ °C} \leq \theta_a < 600\text{ °C}$:

$$C_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1}\theta_a - 1,69 \times 10^{-3}\theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6}\theta_a^3 \text{ [J/kgK]} \quad (13)$$

$600\text{ °C} \leq \theta_a < 735\text{ °C}$:

$$C_a = 666 + 13002/738 - \theta_a \text{ [J/kgK]} \quad (14)$$

$735\text{ °C} \leq \theta_a < 900\text{ °C}$:

$$C_a = 545 + 17820/\theta_a - 731 \text{ [J/kgK]} \quad (15)$$

$900\text{ °C} \leq \theta_a \leq 1200\text{ °C}$:

$$C_a = 650 \text{ [J/kgK]} \quad (16)$$

Por último a condutividade térmica do aço estrutural e de reforço (λ_a) é determinada através das equações (17) e (18), em que θ_a representa a temperatura do aço em [°C].

$20\text{ °C} \leq \theta_a < 800\text{ °C}$:

$$\lambda_a = 54 - 3,33 \times 10^{-2}\theta_a \text{ [W/mK]} \quad (17)$$

$800\text{ °C} \leq \theta_a \leq 1200\text{ °C}$:

$$\lambda_a = 27,3 \text{ [W/mK]} \quad (18)$$

Graficamente as propriedades térmicas dos aços são representadas na Figura 15. Será importante referir que a variação das propriedades térmicas dos aços está relacionada com a transformação alotrópica da fase ferrítica em fase austenítica.

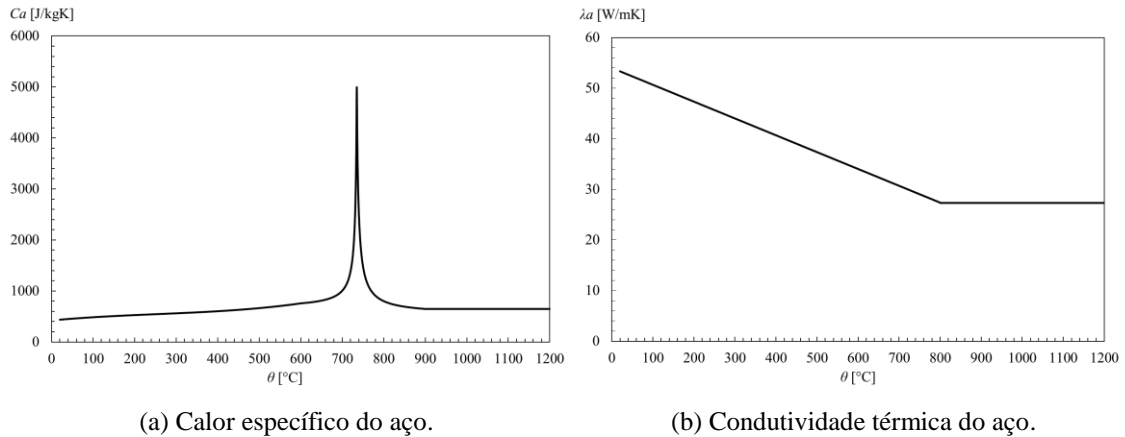


Figura 15 – Propriedades térmicas dos aços.

3.3.2.2 - Concreto

De acordo com o Eurocódigo EN 1994-1-2 [1], o calor específico do concreto convencional seco (C_p), para concreto com agregados, de sílica ou de calcário, pode ser determinado através das equações seguintes na qual θ_c representa a temperatura do concreto em [°C].

$$20 \text{ °C} \leq \theta_c \leq 100 \text{ °C:}$$

$$C_p = 900 \text{ [J/kgK]} \quad (19)$$

$$100 \text{ °C} < \theta_c \leq 200 \text{ °C:}$$

$$C_p = 900 + (\theta_c - 100) \text{ [J/kgK]} \quad (20)$$

$$200 \text{ °C} < \theta_c \leq 400 \text{ °C:}$$

$$C_p = 1000 + (\theta_c - 200)/2 \text{ [J/kgK]} \quad (21)$$

$$400 \text{ °C} < \theta_c \leq 1200 \text{ °C:}$$

$$C_p = 1100 \text{ [J/kgK]} \quad (22)$$

Se o teor de umidade do concreto não for considerado explicitamente no método de cálculo, a função dada para o calor específico do concreto, utilizando tanto agregado de sílica como de calcário, pode ser modelada por um valor constante $C_{p,peak}$, situado entre

100 °C e 115 °C e decrescendo linearmente entre 115 °C e 200 °C, aqui apresentado apenas para 3 %, pois é o teor de umidade determinado do caso em estudo.

$$C_{p,peak} = 2020 \text{ [J/kgK]} \text{ (teor de umidade 3,0 \% do peso do concreto)} \quad (23)$$

A condutividade térmica do concreto (λ_c) deve ser determinada entre os seus limites inferior e superior em função da elevação da temperatura. Seguindo a recomendação da norma EN 1994-1-2 [1], será utilizado o limite superior para a realização dos cálculos.

O limite superior é determinado pela seguinte equação:

$$20 \text{ °C} \leq \theta_c \leq 1200 \text{ °C:}$$

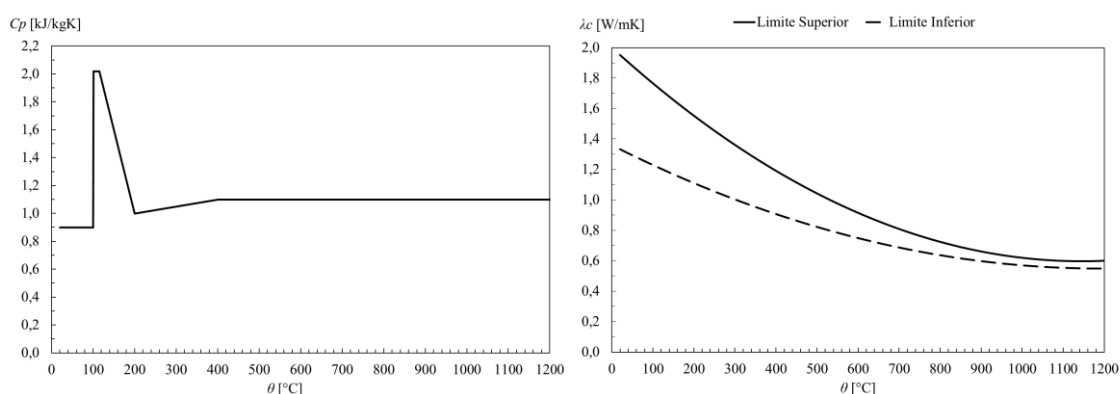
$$\lambda_c = 2 - 0,2451(\theta_c/100) + 0,0107(\theta_c/100)^2 \text{ [W/mK]}. \quad (24)$$

Já o limite inferior é determinado pela equação:

$$20 \text{ °C} \leq \theta_c \leq 1200 \text{ °C:}$$

$$\lambda_c = 1,36 - 0,136(\theta_c/100) + 0,0057(\theta_c/100)^2 \text{ [W/mK]}. \quad (25)$$

Onde θ_c é a temperatura do concreto em [°C].



(a) Calor específico para o concreto com umidade de 3%. (b) Limites superior e inferior da condutividade térmica do concreto.

Figura 16 – Propriedades térmicas do concreto.

CAPÍTULO 4 - MÉTODO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO

A norma Europeia EN 1994-1-2 [1] apresenta diferentes formas para o cálculo da resistência à flambagem para vários tipos de colunas mistas sob ação do fogo padrão ISO834 [2]. O primeiro e o mais simplificado de todos é o método tabelar, que apresenta uma tabela com valores empíricos, para determinar a geometria mínima necessária para resistir ao incêndio de acordo com fatores de carga de projeto. Este método é utilizado apenas para dimensionamentos iniciais de projeto, pois é um método muito genérico e pode acabar em estruturas sobredimensionadas.

No anexo G da EN 1994-1-2 [1] é possível encontrar a segunda forma presente na norma para o cálculo da resistência à flambagem, em relação ao eixo com menor momento de segunda ordem, sob ação do fogo, aplicado especificamente para colunas mistas parcialmente revestidas. O anexo G apresenta o modelo da soma ponderada, que foi desenvolvido originalmente por O. Jungbluth [36] em 1982, com o objetivo de determinar a capacidade de resistência de colunas mistas parcialmente revestidas em situação de incêndio.

Estudos realizados anteriormente [3] [4], concluíram que o método simplificado de cálculo, para colunas parcialmente revestidas [1], apresenta pontos inseguros, determinando uma resistência à flambagem em situação de incêndio maior do que valores obtidos por meio de simulações computacionais. Nos próximos tópicos deste capítulo o método simplificado de cálculo, de acordo com o anexo G da EN 1994-1-2 [1], será abordado e serão realizados os cálculos para os perfis em estudo, disponíveis da Tabela 27 à Tabela 70 do Anexo A.

4.1 - Modelo da Soma Ponderada Anexo G-EN 1994-1-2

O modelo da soma ponderada consiste na separação da seção transversal de uma coluna mista parcialmente revestida, em quatro componentes (ver Figura 17), que são eles: os banzos do perfil metálico; a alma do perfil; o concreto de revestimento e as barras de reforço do concreto de revestimento.

Os banzos são representados por “*f*” (*flanges*), a alma por “*w*” (*web*), o concreto por “*c*” (*concrete*) e o reforço por “*s*” (*reinforcing bars*). Cada componente possui uma forma específica de cálculo para a resistência plástica à compressão axial e para a rigidez

efetiva à flexão, de forma a que todos possam ser somados de maneira ponderada no intuito de ser determinada a resistência à flambagem em situação de incêndio.

De forma a verificar o cálculo da resistência plástica à compressão axial ao fogo ($N_{fi,pl,Rd}$) e para a rigidez efetiva à flexão sob fogo ($(EI)_{fi,eff,z}$), são utilizadas as equações (26) e (27), de acordo com a norma EN 1994-1-2 Anexo G [1].

$$N_{fi,pl,Rd} = N_{fi,pl,Rd,f} + N_{fi,pl,Rd,w} + N_{fi,pl,Rd,c} + N_{fi,pl,Rd,s} \quad (26)$$

$$(EI)_{fi,eff,z} = \varphi_{f,\theta}(EI)_{fi,f,z} + \varphi_{w,\theta}(EI)_{fi,w,z} + \varphi_{c,\theta}(EI)_{fi,c,z} + \varphi_{s,\theta}(EI)_{fi,s,z} \quad (27)$$

Para cada componente da seção transversal é realizado o cálculo da resistência e rigidez em função do tempo de resistência ao fogo padrão de 30, 60, 90 e 120 minutos, representados respectivamente por R30, R60, R90 e R120.

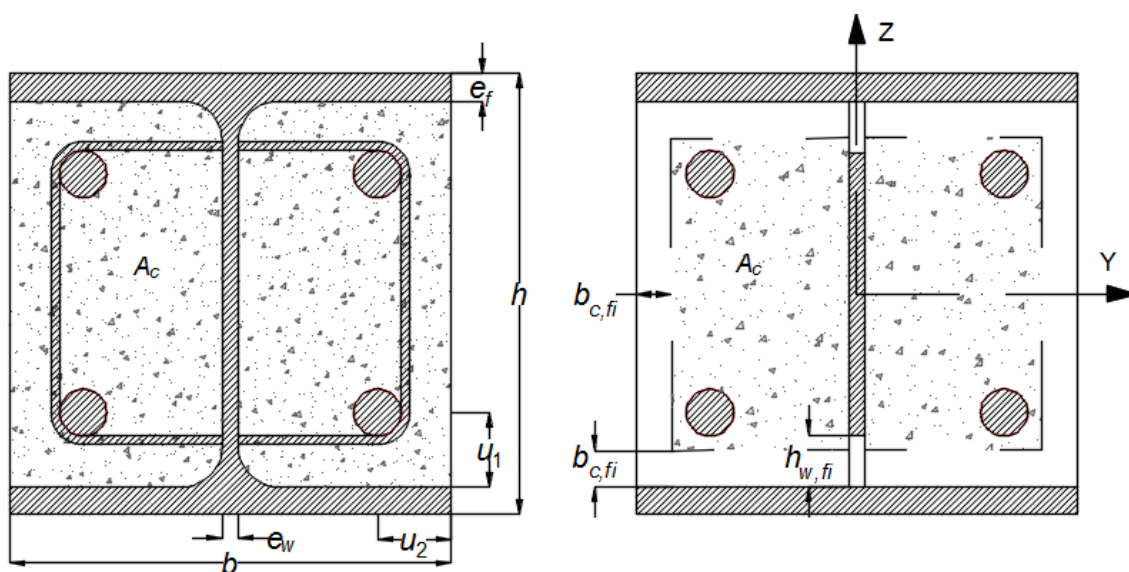


Figura 17 – Modelo da soma ponderada de acordo com anexo G da EN 1994-1-2.

A rigidez à flexão é calculada levando em conta coeficientes de ponderação para cada componente, de acordo com a classe da resistência ao fogo padrão, encontrados na Tabela 9.

Tabela 9 – Coeficiente de ponderação para rigidez efetiva à flexão.

Resistência ao Fogo Padrão	$\varphi_{f,\theta}$	$\varphi_{w,\theta}$	$\varphi_{c,\theta}$	$\varphi_{s,\theta}$
R30	1,0	1,0	0,8	1,0
R60	0,9	1,0	0,8	0,9
R90	0,8	1,0	0,8	0,8
R120	1,0	1,0	0,8	1,0

Após a determinação da resistência plástica à compressão axial e a rigidez efetiva à flexão para cada componente e ter utilizado as equações (26) e (27), é necessário calcular a resistência à compressão axial crítica ou carga crítica de Euler ($N_{fi,cr,z}$) utilizando a equação (28). Esta equação utiliza o comprimento de flambagem (L_θ), que depende das condições de vinculação adotadas (Figura 9).

Com a carga crítica de Euler, calculada em torno do eixo Z, e com a resistência plástica à compressão axial, ambas para resistência ao fogo, é utilizada a equação (29) para determinação da esbelteza adimensional ($\bar{\lambda}_\theta$) da coluna mista parcialmente revestida.

A partir desta fase de projeto, será necessário recorrer à curva de flambagem “c”, presente na norma Europeia EN 1993-1-1 [31], utilizando o valor da esbelteza adimensional, ver as equações (30) e (31), que descrevem o comportamento da curva “c” (representado por ϕ), quando $\alpha = 0,49$. No final é determinado o fator de redução (χ_z). Na equação (32) ao multiplicar o fator de redução, pela resistência plástica à compressão axial, resulta no valor de projeto para resistência à flambagem ($N_{fi,Rd,z}$) para determinado tempo de exposição ao fogo, ou para cada classe de resistência considerada.

$$N_{fi,cr,z} = \frac{\pi^2(EI)_{fi,eff,z}}{L_\theta^2} \quad (28)$$

$$\bar{\lambda}_\theta = \sqrt{\frac{N_{fi,pl,Rd}}{N_{fi,cr,z}}} \quad (29)$$

$$\phi = 0,5 \times [1 + \alpha \times (\bar{\lambda}_\theta - 0,2) + \bar{\lambda}_\theta^{-2}], \text{ com } \alpha = 0,49 \quad (30)$$

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_\theta^2}} \quad (31)$$

$$N_{fi,Rd,z} = \chi_z N_{fi,pl,Rd} \quad (32)$$

Na Figura 18 é apresentado um diagrama, que resume o modelo da soma ponderada, desde o cálculo da resistência e rigidez para cada componente até a resistência à flambagem das colunas mistas parcialmente revestidas, para determinado tempo de exposição ao fogo.

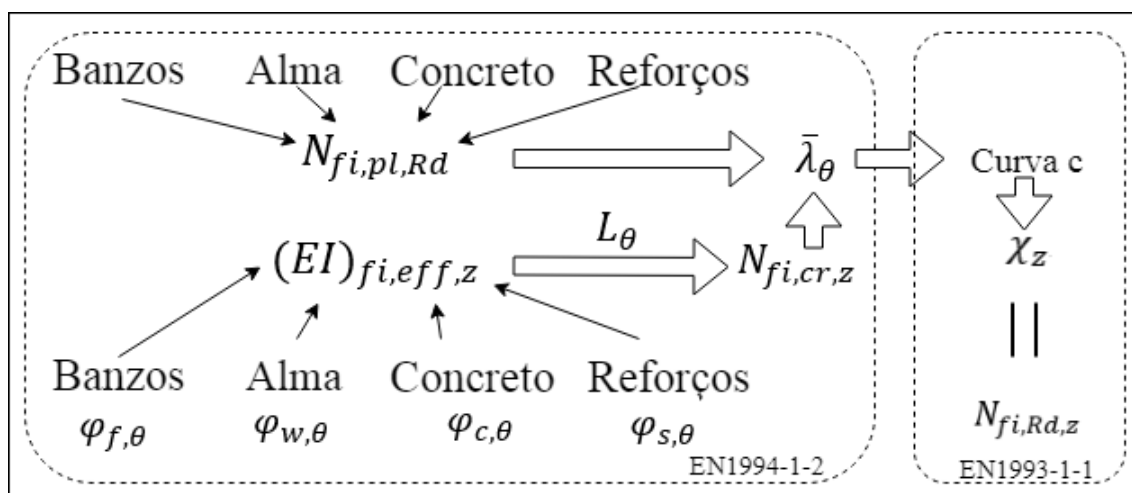


Figura 18 – Diagrama para o método simplificado de cálculo.

Em cada componente é utilizado um fator de segurança parcial do material, $\gamma_{M,fi,a}$ para o aço, $\gamma_{M,fi,c}$ para o concreto e $\gamma_{M,fi,s}$ para o aço de reforço, numericamente igual a 1,0. Nos próximos tópicos serão apresentados os métodos utilizados pela norma para o cálculo de cada componente de seção transversal.

4.1.1 - Banzos

Segundo a EN 1994-1-2 anexo G [1] a temperatura média dos banzos ($\theta_{f,t}$), em função do tempo de resistência ao fogo será determinada com a seguinte equação.

$$\theta_{f,t} = \theta_{0,t} + k_t(A_m/V) \quad (33)$$

Tendo como significado cada elemento da equação: $\theta_{f,t}$ representa a temperatura média no banzo para um determinado tempo de resistência ao fogo, $\theta_{0,t}$ representa um valor de referência em [°C] encontrada na Tabela 10, k_t representa um coeficiente empírico definido na Tabela 10, (A_m/V) é o fator de seção. Este fator depende dos lados expostos ao fogo de uma coluna, pode ser calculado com a área superficial da coluna exposta ao fogo dividido pelo seu volume, ou de uma forma equivalente pelo quociente definido pelo perímetro da seção transversal exposta ao fogo e a área da seção reta, ver equação (34). O cenário de incêndio considera a exposição ao fogo em quatro lados.

$$(A_m/V) = \frac{2(h + b)}{h b} \text{ [m}^{-1}\text{]} \quad (34)$$

Tabela 10 – Parâmetros para temperatura média dos banzos [1].

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

Levando em consideração a redução das propriedades mecânicas dos materiais de acordo com o aumento da temperatura, é possível determinar os fatores de redução para tensão de escoamento e módulo de elasticidade, $k_{y,\theta}$ e $k_{E,\theta}$ respectivamente, utilizando a Tabela 6 das propriedades dos materiais. Conhecendo estes parâmetros, é possível determinar a tensão de escoamento e o módulo de elasticidade do aço dos banzos de acordo com o incremento da temperatura dos mesmos.

$$f_{ay,f,t} = f_{ay,f} k_{y,\theta} \quad (35)$$

$$E_{a,f,t} = E_{a,f} k_{E,\theta} \quad (36)$$

Finalmente a resistência plástica à compressão axial e a rigidez efetiva à flexão do primeiro componente, os banzos, podem ser determinadas através das seguintes equações (37) e (38). Assim é possível adicionar estes dois valores provenientes dos banzos na soma ponderada.

$$N_{fi,pl,Rd,f} = 2(b e_f f_{ay,f,t})/\gamma_{M,fi,a} \quad (37)$$

$$(EI)_{fi,f,z} = E_{a,f,t}(e_f b^3)/6 \quad (38)$$

4.1.2 - Alma

Para o cálculo da resistência e rigidez da alma, uma parte da alma deve ser desprezada, representada por $h_{w,fi}$. Esta distância pode ser determinada pela equação (39), utilizando a altura total do perfil (h) o parâmetro (H_t) a espessura do banzo (e_f):

$$h_{w,fi} = 0,5(h - 2e_f)(1 - \sqrt{1 - 0,16(H_t/h)}) \quad (39)$$

Neste contexto, o H_t é um parâmetro determinado na Tabela 11. Este mesmo parâmetro é utilizado para o cálculo do fator que realiza a redução da tensão de escoamento, de acordo com a temperatura na equação (40).

Tabela 11 – Parâmetros para a redução da altura da alma [1].

Resistência ao Fogo Padrão	H_t [mm]
R30	350
R60	770
R90	1100
R120	1250

$$f_{ay,w,t} = f_{ay,w}\sqrt{1 - (0,16 H_t/h)} \quad (40)$$

Considerando o fator que multiplica $f_{ay,w}$ como sendo um fator de redução (β) e considerando a Tabela 11, é possível desenhar o comportamento da redução da tensão de escoamento para diferentes níveis de resistência ao fogo padrão em função da altura h , ver Figura 19.

$$\beta = \sqrt{1 - (0,16 H_t/h)} \quad (41)$$

Utilizando o coeficiente β e comparando com a Tabela 6 com os coeficientes de redução para a tensão de escoamento para o aço estrutural, é possível inferir uma temperatura média para a alma, as quais podem ser observadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Temperatura média da alma obtida indiretamente de acordo com o Anexo G em [°C].

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	456,5	526,6	585,0	625,7
HEB 260	15,38	451,9	517,6	568,3	596,7
HEB 280	14,29	448,0	510,2	555,0	579,2
HEB 300	13,33	444,6	504,0	544,2	565,4
HEB 340	12,55	439,1	491,6	527,6	544,6
HEB 450	11,11	429,2	467,2	499,9	511,2
HEB 500	10,67	426,2	460,0	488,6	501,7
HEB 600	10,00	421,7	449,3	472,4	483,4
HEB 700	9,52	418,6	441,9	461,3	470,4
HEB 900	8,89	414,4	432,3	446,9	453,7
HD 260x54,1	15,89	455,6	524,6	581,3	618,9
HD 260x142	14,74	448,4	510,9	556,2	580,7
HD 260x225	13,85	443,2	501,5	540,0	560,0
HD 320x127	12,92	441,7	498,1	535,2	554,1
HD 320x300	11,72	435,3	482,1	516,6	531,2
HD 400x237	10,33	434,8	480,9	515,3	529,6
HD 400x382	9,73	431,7	473,2	506,6	519,2
HD 400x551	9,18	428,9	466,4	498,6	510,1
HD 400x818	8,47	425,5	458,2	485,9	499,3
HD 400x1299	7,54	421,7	449,3	472,4	483,4
UC 254x254x73	15,73	453,2	520,1	572,8	603,6
UC 254x254x132	14,89	448,7	511,5	557,3	582,1
UC 305x305x97	13,05	443,4	501,8	540,5	560,7
UC 305x305x137	12,71	441,6	497,9	535,0	553,8
UC 305x305x198	12,24	439,1	491,6	527,6	544,7
UC 356x368x129	11,05	437,3	487,1	522,4	538,2
UC 356x368x177	10,80	436,0	483,8	518,6	533,6
UC 356x406x340	9,88	432,5	475,1	508,7	521,7
UC 356x406x744	8,65	426,3	460,2	489,0	502,1
UC 356x406x1086	7,92	422,9	452,2	476,8	488,5

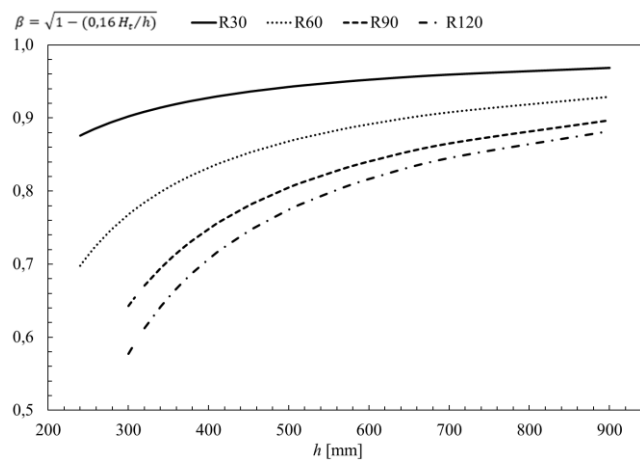


Figura 19 – Fator de redução β para a tensão de escoamento da alma em cada resistência ao fogo.

Os valores da resistência plástica à compressão axial e a rigidez efetiva à flexão para o segundo componente da soma ponderada podem ser determinados com as equações (42) e (43), sendo que, de acordo com a norma, o módulo de elasticidade não sofre redução com o aumento de temperatura.

$$N_{fi,pl,Rd,w} = [e_w(h - 2e_f - 2h_{w,fi})f_{ay,w,t}]/\gamma_{M,fi,a} \quad (42)$$

$$(EI)_{fi,w,z} = [E_{a,w}(h - 2e_f - 2h_{w,fi})e_w^3]/12 \quad (43)$$

4.1.3 - Concreto

A EN 1994-1-2 [1] determina a redução de uma camada externa de concreto com espessura $b_{c,fi}$, igual na direção vertical e horizontal, como consequência da ação do fogo. Esta camada pode ser definida através de uma fórmula empírica, ver Tabela 13, onde o fator de seção deve ser utilizado nas unidades $[m^{-1}]$.

Tabela 13 – Redução da espessura da área de concreto [1].

Resistência ao Fogo Padrão	$b_{c,fi}$ [mm]
R30	4
R60	15
R90	$0,5(A_m/V) + 22,5$
R120	$2,0(A_m/V) + 24,0$

A temperatura média no concreto $\theta_{c,t}$, para cada tempo de resistência ao fogo é dada pela Tabela 14, sendo função do fator de seção calculado com a equação (34), de acordo com cada classe de resistência ao fogo padrão.

Tabela 14 – Temperatura média do concreto [1].

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

O módulo de elasticidade secante do concreto deverá ser afetado pelo efeito da temperatura, utilizando o fator de redução para a resistência à compressão do concreto $k_{c,\theta}$ e determinado com o valor da deformação $\varepsilon_{cu,\theta}$, ver Tabela 8.

$$E_{c,sec,\theta} = f_{c,\theta} / \varepsilon_{cu,\theta} = f_c k_{c,\theta} / \varepsilon_{cu,\theta} \quad (44)$$

Com estes dados é possível calcular a resistência plástica à compressão axial e a rigidez efetiva à flexão do concreto.

$$N_{fi,pl,Rd,c} = 0,86 \left\{ \left((h - 2e_f - 2b_{c,fi})(b - e_w - 2b_{c,fi}) \right) - A_s \right\} f_{c,\theta} / \gamma_{M,fi,c} \quad (45)$$

$$(EI)_{fi,c,z} = E_{c,sec,\theta} \left[\left\{ (h - 2e_f - 2b_{c,fi}) \left((b - 2b_{c,fi})^3 - e_w^3 \right) / 12 \right\} - I_{s,z} \right] \quad (46)$$

Onde A_s é a área da seção transversal das quatro barras de reforço e 0,86 é o fator de calibração. $I_{s,z}$ é o momento de segunda ordem das barras de reforço em relação ao eixo Z da seção transversal da coluna. A_s e $I_{s,z}$ só devem ser levados em consideração se os reforços estiverem dentro da área considerada de concreto.

4.1.4 - Reforço

Para determinação da capacidade resistente à compressão e o valor da rigidez efetiva à flexão, é necessário determinar um parâmetro geométrico relacionado com a posição deste componente. O parâmetro u , representa a média geométrica das distâncias dos eixos u_1 e u_2 e pode ser calculado de acordo com a equação (47).

$$u = \sqrt{u_1 \cdot u_2} \text{ [mm]} \quad (47)$$

Onde u_1 é o cobrimento de concreto vertical, representado pela distância do eixo da barra de reforço externa até a borda interna do banzo e u_2 é o cobrimento de concreto

horizontal, representado pela distância do eixo da barra de reforço externa até a superfície do concreto. Algumas condições especiais devem ser consideradas:

$$\text{se } (u_1 - u_2) > 10 \text{ mm, então } u = \sqrt{u_2(u_2 + 10)} \quad (48)$$

$$\text{ou } (u_2 - u_1) > 10 \text{ mm, então } u = \sqrt{u_1(u_1 + 10)} \quad (49)$$

O fator de redução $k_{y,t}$ para a tensão de escoamento e o fator de redução $k_{E,t}$ para o módulo de elasticidade das barras de reforço, são função da resistência ao fogo padrão e da média geométrica u , ver Tabela 15 e Tabela 16.

Tabela 15 – Fator de redução $k_{y,t}$ para a tensão de escoamento do aço do reforço [1].

Resistência ao Fogo Padrão	u [mm]	40	45	50	55	60
R30		1	1	1	1	1
R60	$k_{y,t}$	0,789	0,883	0,976	1	1
R90		0,314	0,434	0,572	0,696	0,822
R120		0,170	0,223	0,288	0,367	0,436

Tabela 16 – Fator de redução $k_{E,t}$ para o módulo de elasticidade do aço do reforço [1].

Resistência ao Fogo Padrão	u [mm]	40	45	50	55	60
R30		0,830	0,865	0,888	0,914	0,935
R60	$k_{E,t}$	0,604	0,647	0,689	0,729	0,763
R90		0,193	0,283	0,406	0,522	0,619
R120		0,110	0,128	0,173	0,233	0,285

A temperatura das barras reforço podem ser determinadas de forma indireta, utilizando os fatores de redução da Tabela 15 e da Tabela 16, comparando com os coeficientes de redução para o aço de reforço apresentados na Tabela 6. O resultado deste procedimento para os perfis em análise, permite determinar as temperaturas médias, ver Figura 20. Estes valores são constantes pelo fato de se ter adotado o mesmo parâmetro geométrico para a posição dos reforços.

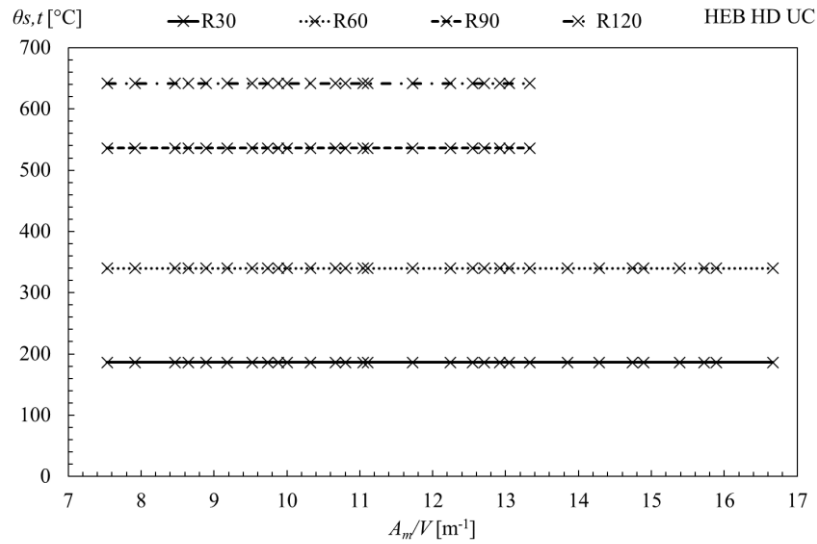


Figura 20 – Temperatura média do reforço obtida indiretamente.

A resistência plástica à compressão axial e a rigidez efetiva à flexão do quarto componente (reforços) podem ser obtidos com as seguintes equações.

$$N_{fi,pl,Rd,s} = A_s k_{y,t} f_{sy} / \gamma_{M,fi,s} \quad (50)$$

$$(EI)_{fi,s,z} = k_{E,t} E_s I_{s,z} \quad (51)$$

Onde $I_{s,z}$ é calculado com a equação (52), utilizando o teorema dos eixos paralelos, para as quatro barras de reforço.

$$I_{s,z} = 4 * \left[\frac{\pi(\phi/2)^4}{4} + \pi(\phi/2)^2 * \left(\frac{b}{2} - u_2 \right)^2 \right] \quad (52)$$

Esta página foi deixada intencionalmente em branco.

CAPÍTULO 5 - MÉTODO AVANÇADO DE CÁLCULO

Para a realização do método avançado de cálculo foi utilizado o programa ANSYS – *Mechanical APDL* [5], no qual se desenvolveu um modelo de simulação térmica transiente não linear, na seção transversal das colunas em estudo. O estudo bidimensional foi desenvolvido com o objetivo de determinar a distribuição da temperatura, em toda seção transversal, para cada tempo de resistência ao fogo (30, 60, 90 e 120 minutos). O programa utiliza o método de elementos finitos, resolvendo a equação (53) para os nós do domínio (Ω) da seção transversal e a equação (54) para a fronteira ($\partial\Omega$) que é exposta nas condições de incêndio.

$$\nabla(\lambda_{(T)} \cdot \nabla T) = \rho_{(T)} \cdot C_{p(T)} \cdot \partial T / \partial t \rightarrow (\Omega) \quad (53)$$

$$\lambda_{(T)} \cdot \nabla T \cdot \vec{n} = \alpha_c (T_g - T) + \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot (T_g^4 - T^4) \rightarrow (\partial\Omega) \quad (54)$$

Tendo como significado cada elemento da equação: T representa a temperatura de cada nó da seção transversal; $\rho_{(T)}$ representa a massa específica de cada nó, diferente para cada tipo de material e dependente da temperatura; $C_{p(T)}$ representa o calor específico para cada material e dependente da temperatura; $\lambda_{(T)}$ representa a condutividade térmica para cada material, dependente da temperatura; α_c representa o coeficiente de convecção; T_g define a temperatura dos gases do compartimento de incêndio, de acordo com a curva ISO834 [2]; Φ representa o fator de vista; ε_m define a emissividade dos materiais; ε_f representa a emissividade do incêndio; σ representa a constante de *Stefan-Boltzmann* com valor de $5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-2}$.

Para a criação da malha imposta sobre o modelo da seção transversal aproximado, ver Figura 22, foi utilizado o elemento PLANE 55 [37], apresentado na Figura 21. Este elemento é composto por quatro nós, com um único grau de liberdade em cada nó, a temperatura. Este elemento apresenta a capacidade de condução térmica transiente, permitindo o contato perfeito entre os materiais. O elemento utiliza funções de interpolação linear entre os nós e um esquema de integração completo de Gauss (2x2).

Para a definição dos modelos das seções transversais, foi necessário realizar uma simplificação, para que a malha se mantivesse toda com elementos quadrangulares uniformes. A seção transversal da barra de reforço foi convertida em um quadrilátero

equivalente, de lados iguais, mantendo o valor da área original, com os valores apresentados na Tabela 17.

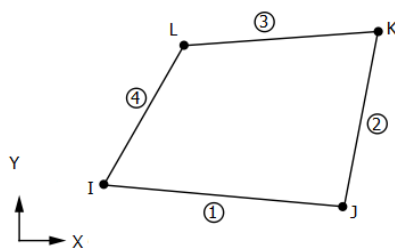


Figura 21 – Elemento PLANE 55. Adaptado de [37].

Não foi necessário efetuar um teste de convergência da solução para determinação do tamanho da malha. Neste trabalho, quanto menor for a dimensão dos elementos, mais rigorosa será a determinação da posição da isotérmica de 500 °C do concreto.

A malha foi definida sobre o modelo geométrico criado, ver Figura 22, com elementos quadrangulares com uma dimensão máxima aproximada de 1,67 mm, sendo os elementos da malha apresentados na Tabela 17.

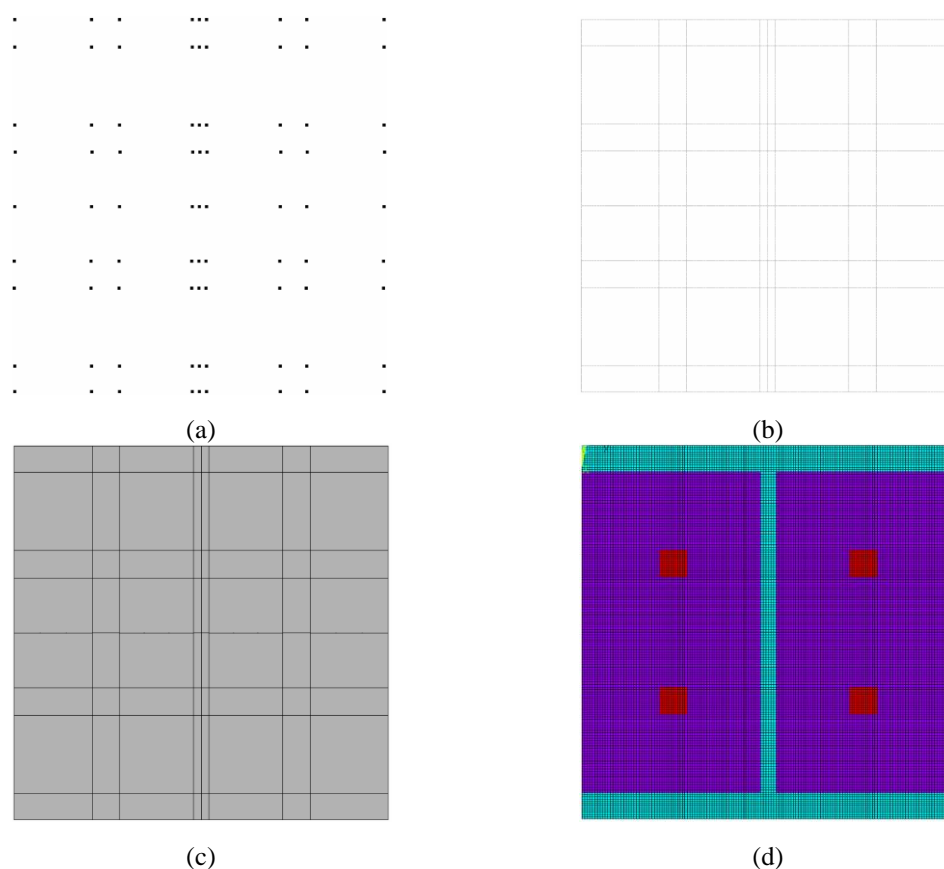


Figura 22 – Etapas de criação do modelo até a malha final para o perfil HEB 240. (a)Pontos; (b)Linhas; (c) Áreas; (d)Malha.

As propriedades térmicas para os três materiais (aço do perfil, concreto e aço do reforço) foram adicionadas, de acordo com o tópico dos materiais, apresentado no Capítulo 3, sendo dependentes da temperatura. A emissividade para concreto e para o aço, tem valor 0,7 de acordo com a norma EN 1994-1-2 [1] e para o fogo 1,0, de acordo com EN 1991-1-2 [24].

Foi aplicado uma condição inicial de temperatura de 20 °C, em todos os nós da seção transversal. Para as condições de contorno, o coeficiente de convecção utilizado foi 25 W/m²K, de acordo como é orientado na norma EN 1991-1-2 [24], fator de vista 1,0 e a temperatura do gás (T_g), tanto para convecção como para radiação de acordo com a curva de incêndio padrão ISO834 [2].

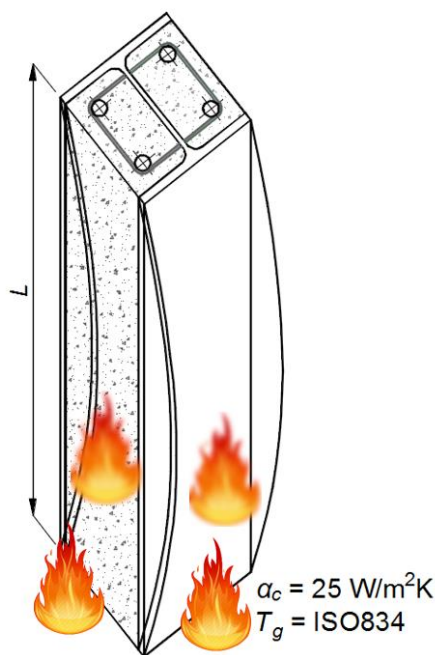


Figura 23 – Condições de contorno para a simulação.

O tipo da solução foi determinado como transiente, com um tempo total de simulação de 7200 s, com incremento de 60 s, podendo ser reduzido até 1 s, com o máximo de 60 s, para cada incremento. Para o critério de convergência da solução foi utilizado um valor de referência mínimo de fluxo de calor com 1×10^{-6} e com tolerância de 0,001.

Tabela 17 – Modelagem e definições da malha.

Perfis	A_m/V [m ⁻¹]	A_s [mm x mm]	Nº de Nós	Nº de elementos		
				e_f	e_w	s
HEB 240	16,67	17,72 x 17,72	23103	12	6	12
HEB 260	15,38	22,16 x 22,16	25599	12	6	14
HEB 280	14,29	22,16 x 22,16	29929	12	8	14
HEB 300	13,33	22,16 x 22,16	34225	12	8	14
HEB 340	12,55	28,36 x 28,36	39405	14	8	18
HEB 450	11,11	28,36 x 28,36	51799	16	10	18
HEB 500	10,67	28,36 x 28,36	57783	18	10	18
HEB 600	10,00	28,36 x 28,36	68255	18	10	18
HEB 700	9,52	28,36 x 28,36	78625	20	12	18
HEB 900	8,89	35,45 x 35,45	100825	22	12	22
HD 260x54,1	15,89	22,16 x 22,16	24633	6	4	14
HD 260x142	14,74	22,16 x 22,16	28199	16	10	14
HD 260x225	13,85	22,16 x 22,16	32617	26	16	14
HD 320x127	12,92	22,16 x 22,16	37185	14	8	14
HD 320x300	11,72	22,16 x 22,16	45435	30	18	14
HD 400x237	10,33	28,36 x 28,36	57117	20	12	18
HD 400x382	9,73	28,36 x 28,36	63479	30	18	18
HD 400x551	9,18	28,36 x 28,36	71655	42	26	18
HD 400x818	8,47	28,36 x 28,36	84639	60	38	18
HD 400x1299	7,54	28,36 x 28,36	105485	84	60	18
UC 254x254x73	15,73	22,16 x 22,16	25599	10	6	14
UC 254x254x132	14,89	22,16 x 22,16	28199	16	10	14
UC 305x305x97	13,05	22,16 x 22,16	35343	10	6	14
UC 305x305x137	12,71	22,16 x 22,16	37627	14	10	14
UC 305x305x198	12,24	22,16 x 22,16	40337	20	12	14
UC 356x368x129	11,05	28,36 x 28,36	50609	12	8	18
UC 356x368x177	10,80	28,36 x 28,36	52899	16	10	18
UC 356x406x340	9,88	28,36 x 28,36	61005	26	16	18
UC 356x406x744	8,65	28,36 x 28,36	80215	54	34	18
UC 356x406x1086	7,92	28,36 x 28,36	96673	76	48	18

5.1 - Resultados do Método Avançado de Cálculo

Após a solução de todas as simulações, foram retirados os resultados para quatro instantes de tempo, 1800, 3600, 5400 e 7200 segundos, que representam respectivamente os campos de temperatura para a classificação de resistência ao fogo de 30, 60, 90 e 120 minutos.

Para a obtenção da temperatura média de cada componente, foi retirada, separadamente, a temperatura de cada região. Com a temperatura de cada nó foi determinado o valor da temperatura, utilizando média aritmética. Para se poder aplicar o critério da isotérmica de 500°C, necessária para determinar a redução do concreto, foi determinada a curva que limita os nós com esse valor de temperatura. Na Figura 24 é possível observar, de uma maneira genérica, quais foram os resultados considerados.

As distribuições de temperaturas para cada seção reta de cada perfil e para cada tempo de resistência, são apresentados de maneira gráfica, ver Tabela 77 a Tabela 106 do Anexo B. A curva que define a linha da isotérmica de 500 °C também é apresentada para cada perfil. Na Figura 25 está representado a evolução da temperatura para os quatro tempos de resistência ao fogo, considerando o perfil HEB 240, exposto à ação do fogo pelos quatro lados.

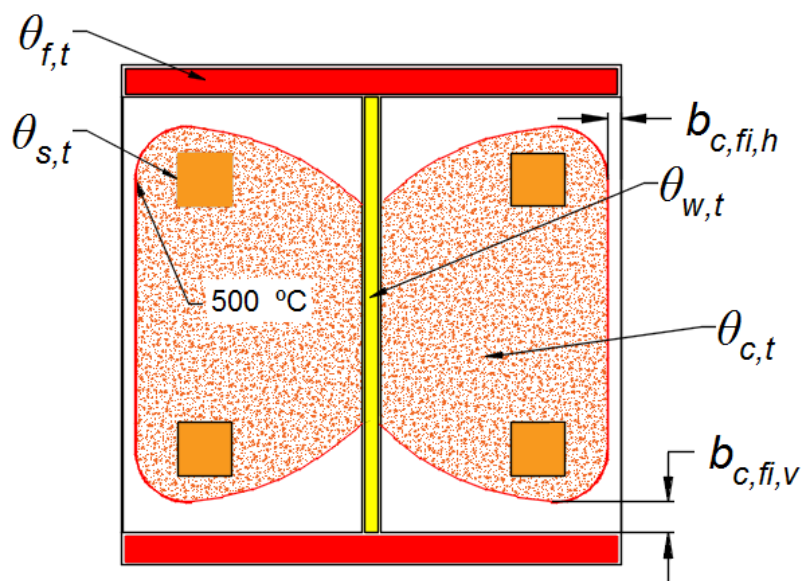


Figura 24 – Resultados retirados das simulações numéricas.

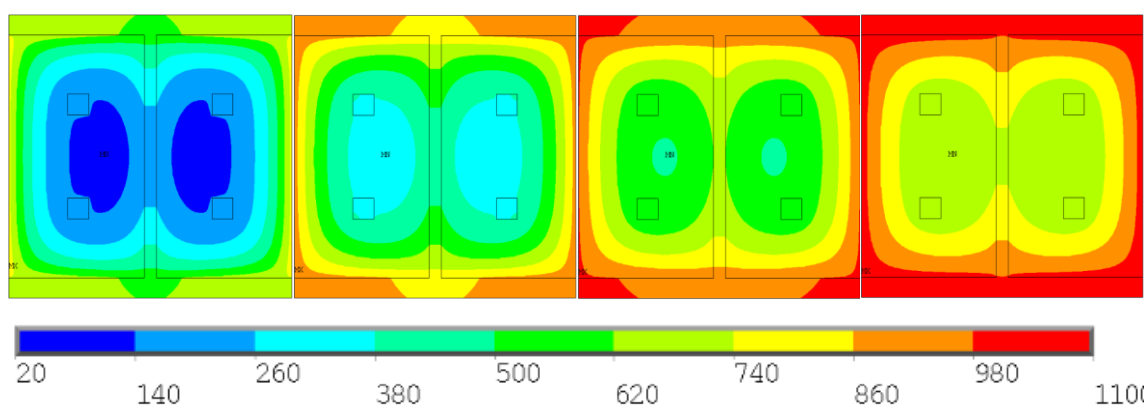


Figura 25 – Evolução da temperatura para R30, R60, R90 e R120 do perfil HEB 240.

Todos os resultados obtidos nas simulações são apresentados em anexo da Tabela 71 a Tabela 76 no Anexo B. Na Tabela 18 são apresentados apenas os resultados das temperaturas mínimas e máximas que se verificam em cada perfil e para cada tempo de resistência ao fogo.

Tabela 18 – Temperatura mínima e máxima da seção transversal em [°C].

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	102,9 – 801,3	316,5 – 934,7	492,3 – 1001,0	624,9 – 1045,3
HEB 260	15,38	92,2 – 801,0	261,3 – 934,5	431,3 – 1000,8	562,3 – 1045,3
HEB 280	14,29	64,5 – 799,8	194,2 – 934,1	369,8 – 1000,6	500,0 – 1045,1
HEB 300	13,33	64,8 – 799,9	157,1 – 934,0	326,2 – 1000,5	451,0 – 1045,5
HEB 340	12,55	57,8 – 797,3	136,2 – 932,9	291,4 – 1000,0	412,5 – 1044,8
HEB 450	11,11	44,2 – 793,1	110,1 – 930,8	210,3 – 999,4	325,1 – 1044,4
HEB 500	10,67	39,7 – 791,4	104,0 – 930,0	179,2 – 999,1	293,1 – 1044,1
HEB 600	10,00	33,2 – 790,0	93,3 – 929,1	142,2 – 998,8	239,8 – 1044,5
HEB 700	9,52	29,2 – 788,4	79,9 – 928,1	123,9 – 998,5	200,9 – 1043,6
HEB 900	8,89	24,7 – 786,4	60,7 – 926,9	104,1 – 997,9	150,0 – 1044,0
HD 260x54,1	15,89	89,8 – 809,4	248,7 – 937,3	415,6 – 1001,8	543,9 – 1046,0
HD 260x142	14,74	92,8 – 792,3	266,0 – 930,6	437,5 – 999,6	570,0 – 1044,7
HD 260x225	13,85	92,0 – 782,5	264,2 – 924,7	436,6 – 997,4	569,6 – 1043,4
HD 320x127	12,92	60,9 – 798,3	144,4 – 933,4	306,7 – 1000,2	429,8 – 1045,0
HD 320x300	11,72	61,1 – 779,9	150,1 – 922,8	317,5 – 996,1	443,0 – 1043,0
HD 400x237	10,33	34,6 – 790,2	98,5 – 929,4	164,3 – 999,1	288,8 – 1043,9
HD 400x382	9,73	33,9 – 780,1	97,8 – 922,8	162,9 – 996,2	288,0 – 1042,9
HD 400x551	9,18	32,8 – 774,6	96,1 – 918,7	157,9 – 992,7	282,5 – 1041,1
HD 400x818	8,47	31,1 – 770,7	92,4 – 915,1	148,2 – 988,8	270,1 – 1038,8
HD 400x1299	7,54	29,0 – 769,1	86,8 – 911,2	137,1 – 985,3	252,3 – 1035,5
UC 254x254x73	15,73	93,6 – 804,1	264,4 – 935,6	433,7 – 1001,2	563,8 – 1045,8
UC 254X254X132	14,89	94,4 – 793,3	271,3 – 931,1	443,0 – 999,8	575,4 – 1044,9
UC 305x305x97	13,05	58,8 – 803,3	138,4 – 935,3	297,2 – 1001,0	419,0 – 1045,1
UC 305x305x137	12,71	60,0 – 797,1	143,1 – 932,9	306,0 – 1000,1	429,6 – 1044,8
UC 305X305X198	12,24	59,6 – 788,8	144,3 – 928,6	308,9 – 998,9	433,8 – 1043,9
UC 356X368X129	11,05	36,6 – 801,8	100,0 – 934,7	170,5 – 1000,7	292,8 – 1045,5
UC 356X368X177	10,80	37,2 – 795,5	101,2 – 932,2	179,4 – 999,8	302,9 – 1044,4
UC 356X406X340	9,88	34,1 – 782,4	98,0 – 924,4	163,2 – 997,1	288,1 – 1043,2
UC 356X406X744	8,65	31,5 – 771,4	93,4 – 916,0	150,7 – 989,7	273,4 – 1039,5
UC 356X406X1086	7,92	29,8 – 769,1	89,1 – 912,4	141,2 – 986,3	259,5 – 1036,6

CAPÍTULO 6 - NOVA PROPOSTA DE APRIMORAMENTO

Nos últimos anos, vários estudos vem sendo realizados com o objetivo de revisar e propor melhorias para EN 1994-1-2 [1], mais especificamente ao Anexo G onde é apresentado o método simplificado de cálculo para a obtenção da resistência à flambagem em colunas mistas parcialmente revestidas em situação de incêndio. Analisando o trabalho de A. Fellouh [3], seguido pelo trabalho de L. Calió [4], aqui será proposto um aprimoramento diferente e complementar para o método simplificado de cálculo. A comparação entre as propostas de aperfeiçoamento do modelo presente no anexo G é apresentada na Tabela 19 abaixo, onde se apresentam sublinhadas as alterações em relação ao aperfeiçoamento anterior.

Tabela 19 – Comparação entre método simplificado da norma EN 1994-1-2 e aprimoramentos propostos.

	EN 1994-1-2 Anexo G [1]	Proposta A. Fellouh [3]	Proposta L. Calió [4]	Proposta Atual
Banzos	Área não reduzida; Temperatura linear; Propriedade <i>E</i> (elevada); Propriedade <i>f_y</i> (elevada).	Área não reduzida; <u>Temperatura bi linear (novos parâmetros);</u> Propriedade <i>E</i> (elevada); Propriedade <i>f_y</i> (elevada).	Área não reduzida; Temperatura bi linear (novos parâmetros); Propriedade <i>E</i> (elevada); Propriedade <i>f_y</i> (elevada).	Área não reduzida; <u>Temperatura linear (três novos parâmetros);</u> Propriedade <i>E</i> (elevada); Propriedade <i>f_y</i> (elevada).
Alma	Área reduzida; Redução da alma: equação empírica (classe de resist. ao fogo, geometria); Temperatura não calculada; Propri. <i>E</i> (temp. ambiente); Propri. <i>f_y</i> (elevada).	Área reduzida; Redução da alma: <u>equação paramétrica (fator de seção, classe de resist. ao fogo), baseado no critério 400 °C;</u> Temperatura não calculada; Propri. <i>E</i> (temp. ambiente); Propri. <i>f_y</i> (temp. ambiente).	Área reduzida; Redução da alma: equação paramétrica (fator de seção, classe de resist. ao fogo), baseado no critério 400 °C; <u>Temperatura calculada, bi linear;</u> Propri. <i>E</i> (elevada); Propri. <i>f_y</i> (temp. ambiente).	<u>Área não reduzida;</u> <u>Temperatura calculada, linear (três novos parâmetros);</u> Propri. <i>E</i> (elevada); Propri. <i>f_y</i> (elevada).
Concreto	Área reduzida da mesma maneira em ambas as direções (depende do fator de seção para maiores classificações de resistência ao fogo); Temperatura não uniforme; Propri. <i>E_{sec}</i> (temp. elevada); Propri. <i>f_c</i> (temp. elevada).	<u>Área reduzida de maneira diferente em ambas as direções, baseado no critério da isotérmica de 500 °C (depende do fator de seção), nova equação: parâmetros e limites;</u> <u>Temperatura não uniforme inferior a 500 °C;</u> Propri. <i>E_{sec}</i> (temp. elevada); Propri. <i>f_c</i> (temp. elevada).	Área reduzida de maneira diferente em ambas as direções, baseado no critério da isotérmica de 500 °C (depende do fator de seção), nova equação: <u>novos parâmetros e limites;</u> Temperatura não uniforme inferior a 500 °C; Propri. <i>E_{sec}</i> (temp. elevada); Propri. <i>f_c</i> (temp. elevada).	Área reduzida de maneira diferente em ambas as direções, baseado no critério da isotérmica de 500 °C (<u>fator de seção e geometria</u>), <u>nova equação: novos parâmetros e limites;</u> Temperatura <u>nova equação</u> inferior a 500 °C; Propri. <i>E_{sec}</i> (temp. elevada); Propri. <i>f_c</i> (temp. elevada).
Reforços	Área não reduzida; Temperatura inferida; Propri. <i>E</i> (elevada); Propri. <i>f_y</i> (elevada).	Área não reduzida; <u>Temperatura nova equação paramétrica (dependente do fator de seção);</u> Propri. <i>E</i> (elevada); Propri. <i>f_y</i> (elevada).	Área não reduzida; Temperatura nova equação paramétrica (dependente do fator de seção); Propri. <i>E</i> (elevada); Propri. <i>f_y</i> (elevada).	Área não reduzida; <u>Temperatura linear (fator de seção);</u> Propri. <i>E</i> (elevada); Propri. <i>f_y</i> (elevada).

A atual proposta de aprimoramento para o modelo, presente neste estudo, apresenta novas equações para o cálculo da temperatura média para os quatro

componentes presentes na seção transversal das colunas mistas parcialmente revestidas, junto com seus parâmetros, diferentes para cada série de perfil aqui estudadas, tendo em consideração a variação da geometria das séries dos perfis.

Para a componente alma, é proposto que seja ignorada a redução da área resistente, mas que ao contrário do presente anexo G, utilize a temperatura média da mesma para calcular os coeficientes de redução para a tensão de escoamento e módulo de elasticidade e sejam aplicados no cálculo da resistência plástica à compressão axial e da rigidez efetiva à flexão.

O critério da isotérmica de 500 °C para procedimentos de projeto do concreto em condições incêndio, presente na EN 1992-1-2 [35], sugere um método simplificado onde pode ser negligenciado o concreto com mais de 500 °C para o cálculo da capacidade de carga.

Todos os aprimoramentos foram baseados nos resultados obtidos através das simulações numéricas descritas e apresentadas no capítulo anterior. Para todas as configurações de colunas e em todas as classes de resistência ao fogo, a atual proposta de aprimoramento apresenta temperaturas ligeiramente superiores às obtidas com o programa ANSYS, com o intuito de apresentar resultados termicamente mais seguros para projeto.

O aprimoramento foi realizado apenas no cálculo da resistência plástica e rigidez à flexão dos quatro componentes, permanecendo todo o resto da formulação de acordo com a norma Europeia. Devido a esta caracterização, na sequência não será repetido a etapa final do método simplificado. Todos os cálculos do aprimoramento são apresentados no Anexo C, da Tabela 107 a Tabela 155.

6.1 - Banzos

Utilizando a temperatura média dos banzos de cada seção transversal, obtidas por simulação numérica no programa ANSYS, presente na Tabela 71, foi possível determinar a nova equação (55) para o cálculo da temperatura média desta componente. Com o objetivo de determinar uma equação mais parecida possível com a original, contida na norma EN 1994-1-2, e que se adequasse para as três séries de perfis, foi acrescentado um termo a mais, que relaciona a espessura do banzo com um parâmetro obtido para cada tempo de resistência ao fogo.

$$\theta_{f,t} = \theta_{0,f} + k_{f,f}(e_f) + k_{t,f}(A_m/V) \quad (55)$$

Os coeficientes e parâmetros são definidos na Tabela 20: $\theta_{f,t}$ representa a temperatura média do banzo para um determinado tempo de resistência ao fogo; $\theta_{0,f}$ representa um parâmetro de referência dado em [°C]; $k_{f,f}$ representa um coeficiente empírico afetado pela espessura do banzo; e_f representa a espessura do banzo do perfil, em [mm]; $k_{t,f}$ representa um coeficiente empírico que é afetado pelo fator de seção; (A_m/V) representa o fator de seção em [m⁻¹], ver equação (34).

Tabela 20 – Parâmetros aprimorados para temperatura média do banzo.

Resistência ao Fogo Padrão	HEB			HD			UC		
	$\theta_{0,f}$ [°C]	$k_{f,f}$ [mm ⁻¹ °C]	$k_{t,f}$ [m°C]	$\theta_{0,f}$ [°C]	$k_{f,f}$ [mm ⁻¹ °C]	$k_{t,f}$ [m°C]	$\theta_{0,f}$ [°C]	$k_{f,f}$ [mm ⁻¹ °C]	$k_{t,f}$ [m°C]
R30	687	-4,50	3,43	463	-2,00	16,91	659	-2,89	4,07
R60	909	-3,76	2,06	785	-1,90	8,73	887	-2,42	2,10
R90	971	-1,38	1,42	965	-1,80	3,29	995	-2,06	1,25
R120	1018	-0,89	1,37	1063	-1,55	0,53	1058	-1,51	0,06

Para cada série de perfil foi necessário a utilização de parâmetros e coeficientes diferentes, mas foi possível manter a mesma equação. Na Figura 26 é possível analisar graficamente o comportamento das temperaturas médias calculadas pela norma, pelo ANSYS e pelo aprimoramento.

Depois de calculado o valor das temperaturas médias é possível determinar os fatores de redução $k_{y,\theta}$ e $k_{E,\theta}$, utilizando a Tabela 6. Aplicando as equações (56) e (57), determina-se o valor da tensão de escoamento do banzo afetada pela temperatura e o módulo de elasticidade também afetado pela temperatura.

$$f_{ay,f,t} = f_{ay,f} k_{y,\theta} \quad (56)$$

$$E_{a,f,t} = E_{a,f} k_{E,\theta} \quad (57)$$

Finalmente a resistência plástica à compressão axial e a rigidez efetiva à flexão dos banzos, podem ser determinados através das equações (58) e (59).

$$N_{fi,pl,Rd,f} = 2(b e_f f_{ay,f,t})/\gamma_{M,fi,a} \quad (58)$$

$$(EI)_{fi,f,z} = E_{a,f,t}(e_f b^3)/6 \quad (59)$$

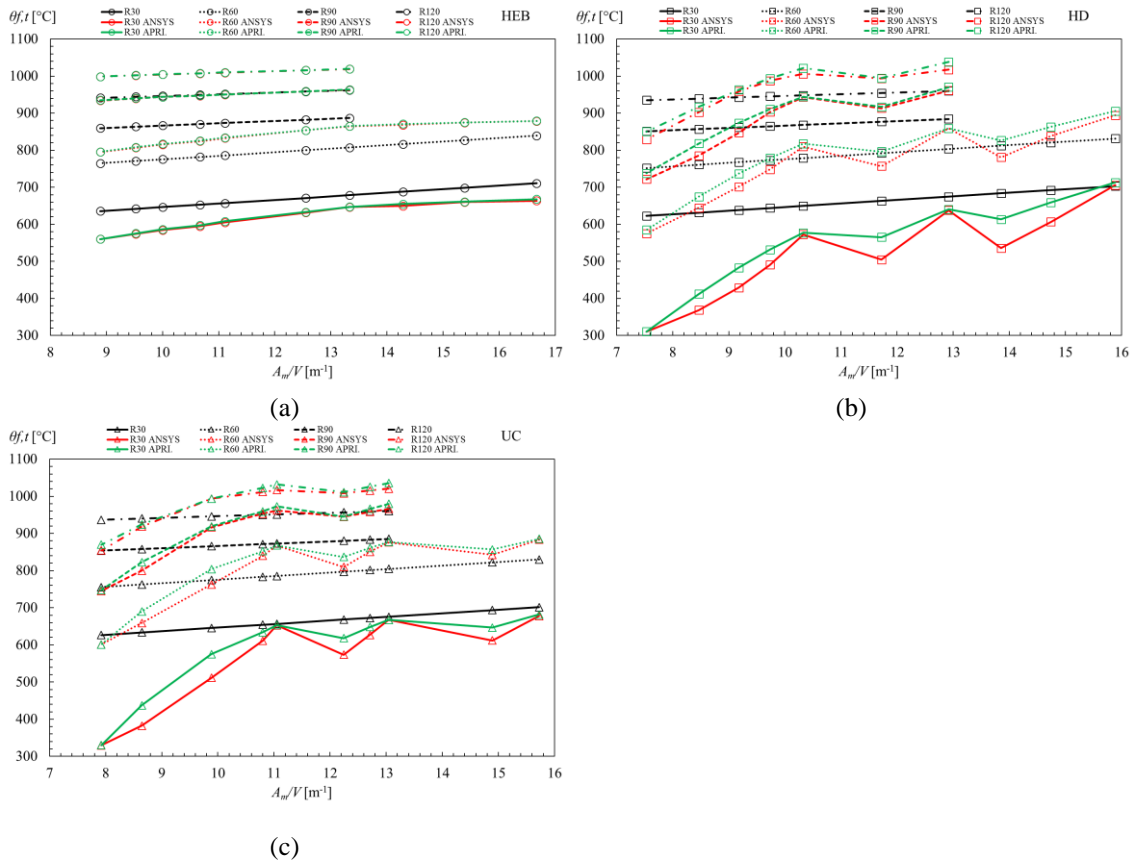


Figura 26 – Temperatura média do banço para EN 1994-1-2, ANSYS e Aprimoramento. (a) HEB (b) HD (c) UC

6.2 - Alma

Desprezando a redução geométrica da alma, como está no atual modelo do anexo G do Eurocódigo 4 parte 1.2 [1], e considerando toda a área como resistente, é necessário outro método para representar o efeito que o aumento da temperatura provoca neste componente. Portanto analogamente ao tratamento da componente do banço, a alma terá suas propriedades mecânicas afetadas pela ação da temperatura com os mesmos coeficientes de redução utilizados para o banço. A partir desta hipótese, neste aprimoramento é necessário determinar a temperatura média dos nós da alma. Os resultados numéricos das temperaturas médias da alma são apresentados na Tabela 72 no Anexo B. Foi decidido utilizar uma equação semelhante à utilizada no banço, mas desta

vez com o efeito da espessura da alma, que melhor caracteriza a evolução da temperatura nos perfis, ver equação (60).

$$\theta_{w,t} = \theta_{0,w} + k_{w,w}(1/e_w) + k_{t,w}(A_m/V) \quad (60)$$

Os parâmetros e coeficientes utilizados para o cálculo da temperatura média da alma possuem o mesmo significado que foi apresentado para os banzos, mas desta vez aplicado à alma, sendo a unidade da espessura da alma definida em [mm].

Tabela 21 – Parâmetros aprimorados para temperatura média da alma.

Resistência ao Fogo Padrão	HEB			HD			UC		
	$\theta_{0,w}$ [°C]	$k_{w,w}$ [mm°C]	$k_{t,w}$ [m°C]	$\theta_{0,w}$ [°C]	$k_{w,w}$ [mm°C]	$k_{t,w}$ [m°C]	$\theta_{0,w}$ [°C]	$k_{w,w}$ [mm°C]	$k_{t,w}$ [m°C]
R30	-159	2500	14	-83	-480	30	-60	-170	26
R60	-233	4170	23	15	-810	40	47	-850	37
R90	-221	4900	29	126	-1120	44	127	-1160	44
R120	-186	5500	31	233	-1100	45	239	-1300	45

Utilizando os coeficientes de redução para o aço estrutural na Tabela 6, determina-se a tensão de escoamento afetada pela temperatura e o módulo de elasticidade também afetado pela temperatura, de acordo com as equações (61) e (62). As equações para o cálculo da resistência plástica e para o cálculo da rigidez efetiva à flexão também foram alteradas, pois não existe mais redução da área resistente da alma e as propriedades mecânicas são afetadas pela temperatura, ver as equações propostas (63) e (64).

$$f_{ay,w,t} = f_{ay,w} k_{y,\theta} \quad (61)$$

$$E_{a,w,t} = E_{a,w} k_{E,\theta} \quad (62)$$

$$N_{fi,pl,Rd,w} = [e_w(h - 2e_f)f_{ay,w,t}]/\gamma_{M,fi,a} \quad (63)$$

$$(EI)_{fi,w,z} = [E_{a,w,t}(h - 2e_f)e_w^3]/12 \quad (64)$$

Representam-se graficamente uma comparação dos resultados das temperaturas médias obtidas com o aprimoramento, em relação ao valor das temperaturas obtidas numericamente e ao valor das temperaturas definidas com a norma atual, na Figura 27.

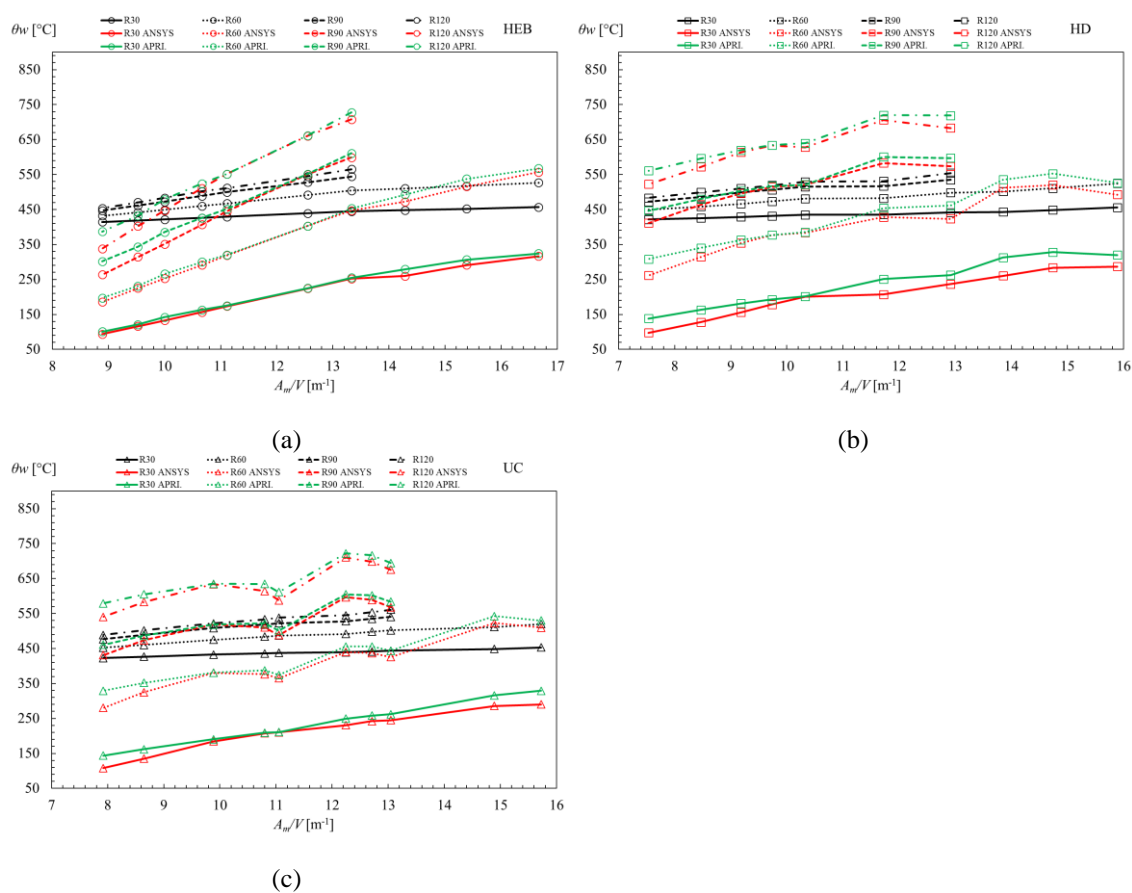


Figura 27 – Temperatura média da alma para EN 1994-1-2, ANSYS e Aprimoramento. (a) HEB (b) HD (c) UC.

6.3 - Concreto

No componente concreto, continua havendo uma redução da sua área de acordo com o tempo de resistência ao fogo, mas agora, apresentando uma redução específica na direção vertical e outra redução na horizontal, sendo utilizado o critério da isotérmica de 500 °C para determinar as reduções. Os dados obtidos numericamente, para a redução do concreto vertical e horizontal, utilizados para determinar as equações são apresentados na Tabela 74 e na Tabela 75 respectivamente, ver Anexo B.

Toda a seção resistente do concreto deverá possuir uma temperatura inferior a 500 °C, pelo fato deste material se encontrar no interior da isotérmica. A equação proposta para determinação da temperatura do concreto no interior desta região poderá ser determinada pela equação (65).

$$\theta_{c,t} = \theta_{0,c} + k_{w,c}(1/e_w) + k_{t,c}(A_m/V) \quad (65)$$

Os parâmetros e coeficientes, são análogos aos utilizados para as componentes da alma, mas aplicados ao concreto e são apresentados na Tabela 22. A Figura 28 apresenta graficamente a variação das temperaturas médias para cada série de perfil.

Tabela 22 – Parâmetros aprimorados para temperatura média do concreto.

Resistência ao Fogo Padrão	HEB			HD			UC		
	$\theta_{0,c}$ [°C]	$k_{w,c}$ [mm°C]	$k_{t,c}$ [m°C]	$\theta_{0,c}$ [°C]	$k_{w,c}$ [mm°C]	$k_{t,c}$ [m°C]	$\theta_{0,c}$ [°C]	$k_{w,c}$ [mm°C]	$k_{t,c}$ [m°C]
R30	29	-230	14,8	4	-255	16,8	9	-154	15,9
R60	-6	-950	30,5	20	-600	27,3	16	-660	27,5
R90	-3	1355	22,2	60	-700	32,5	54	-822	32,8
R120	35	2140	19,4	129	-1077	33,8	134	-867	31,9

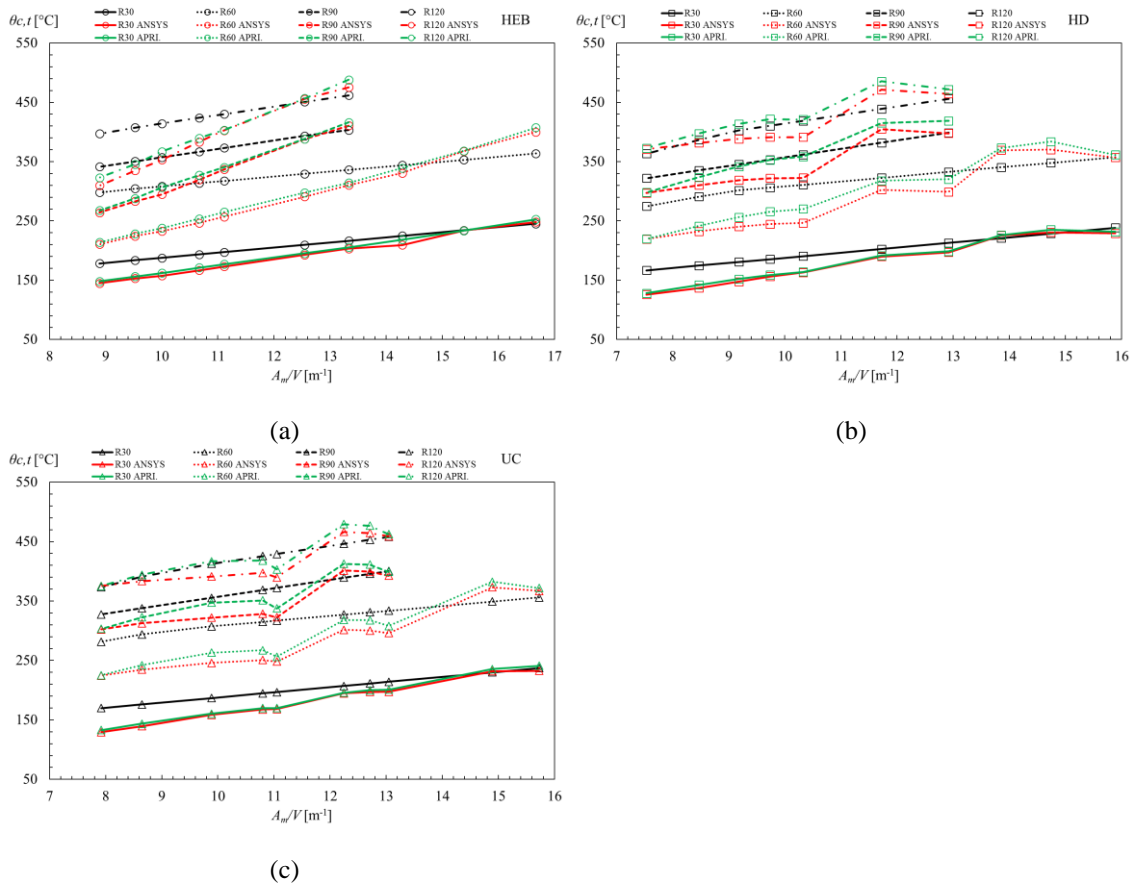


Figura 28 – Temperatura média do concreto para EN 1994-1-2, ANSYS e Aprimoramento. (a) HEB (b) HD (c) UC.

Foi necessário determinar uma equação para cada redução, vertical e horizontal, semelhantes à da temperatura, mas com o termo do fator de seção quadrático, devido ao comportamento dos valores fornecidos numericamente. Para a redução vertical é utilizada

a influência da espessura do banzo e da redução horizontal com a influência da espessura da alma, mostrados nas equações (66) e (67) respectivamente, e os parâmetros e coeficientes na Tabela 23 e Tabela 24.

Se o perfil possuir temperaturas médias superiores a 500 °C, ou seja, não apresentar isotérmica de 500 °C, a redução vertical e horizontal do concreto deve ser total, o concreto não deve ser considerado.

$$b_{c,fi,v} = b_{0,cv} + k_{f,cv}(e_f) + k_{t,cv}(A_m/V)^2 \quad (66)$$

$$b_{c,fi,h} = b_{0,ch} + k_{w,ch}(1/e_w) + k_{t,ch}(A_m/V) \quad (67)$$

Tabela 23 – Parâmetros aprimorados para redução vertical do concreto.

Resistência ao Fogo Padrão	HEB			HD			UC		
	$b_{0,cv}$ [mm]	$k_{f,cv}$	$k_{t,cv}$ [m ² mm]	$b_{0,cv}$ [mm]	$k_{f,cv}$	$k_{t,cv}$ [m ² mm]	$b_{0,cv}$ [mm]	$k_{f,cv}$	$k_{t,cv}$ [m ² mm]
R30	-0,96	0,08	0,025	-1,45	0,01	0,045	3,40	-0,03	0,022
R60	12,46	0,06	0,062	14,11	-0,10	0,068	17,50	-0,13	0,061
R90	-75,80	2,39	0,435	19,00	-0,10	0,200	13,00	-0,10	0,250
R120	-208,00	5,40	1,120	-11,00	0,04	0,650	25,00	-0,09	0,380

Tabela 24 – Parâmetros aprimorados para redução horizontal do concreto.

Resistência ao Fogo Padrão	HEB			HD			UC		
	$b_{0,ch}$ [mm]	$k_{w,ch}$	$k_{t,ch}$ [m ² mm]	$b_{0,ch}$ [mm]	$k_{w,ch}$	$k_{t,ch}$ [m ² mm]	$b_{0,ch}$ [mm]	$k_{w,ch}$	$k_{t,ch}$ [m ² mm]
R30	11,68	0	0,000	11,68	0	0,000	11,68	0	0,000
R60	25,40	-102	0,050	22,00	-10	0,026	21,90	-13	0,026
R90	43,10	-636	0,300	26,60	-85	0,135	26,60	-60	0,120
R120	39,60	-1000	0,690	26,60	-189	0,300	29,80	-114	0,240

O módulo de elasticidade secante do concreto varia de acordo com a temperatura e pode ser obtido com a equação (69), onde $k_{c,\theta}$, ver equação (68), e $\varepsilon_{cu,\theta}$ podem ser encontrados na Tabela 8, relativa às propriedades mecânicas do concreto.

$$f_{c,\theta} = f_c k_{c,\theta} \quad (68)$$

$$E_{c,sec,\theta} = f_{c,\theta} / \varepsilon_{cu,\theta} \quad (69)$$

As espessuras das camadas de concreto desprezadas nas colunas podem ser analisadas graficamente na Figura 29.

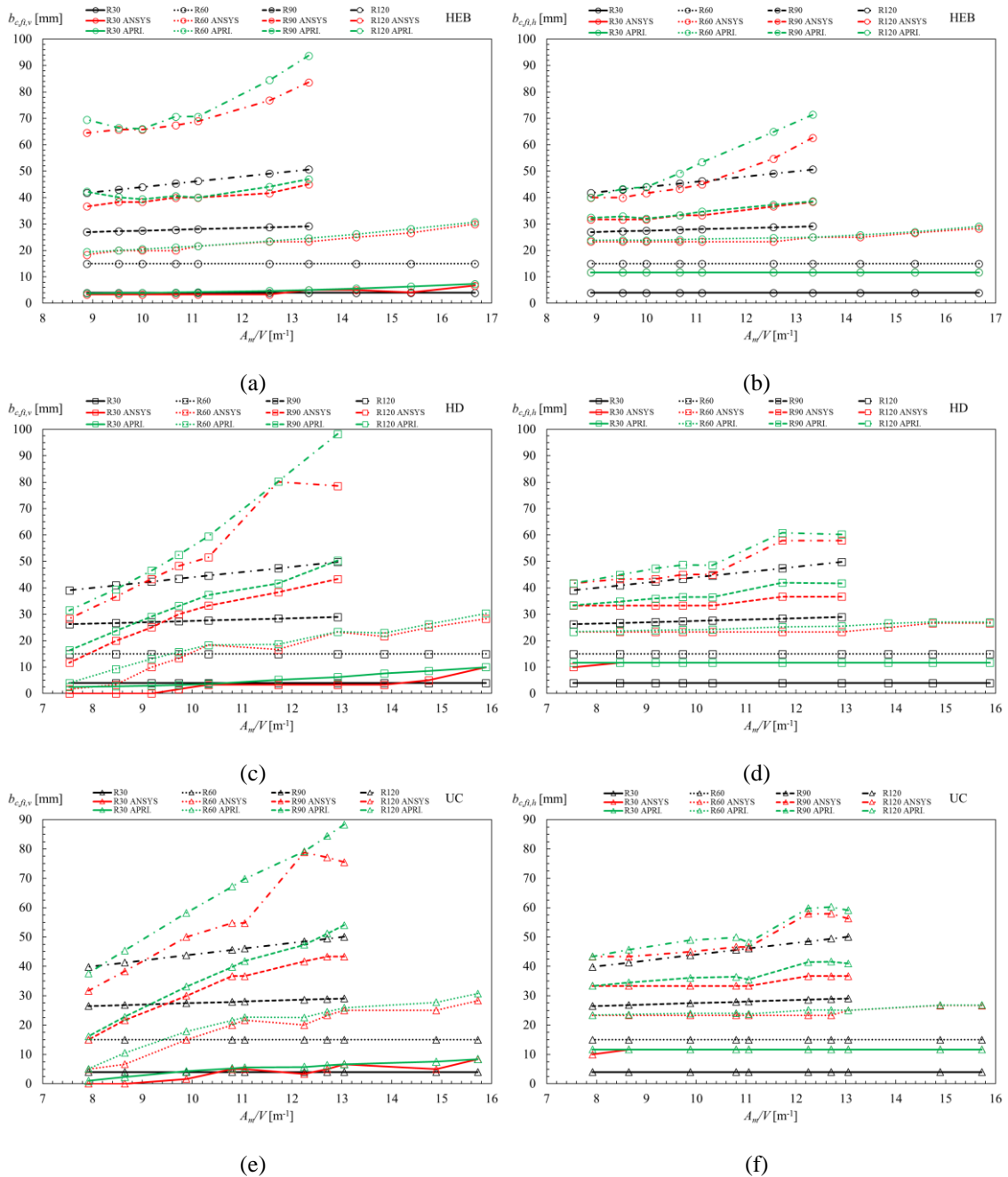


Figura 29 – Redução do concreto vertical e horizontal para EN 1994-1-2, ANSYS e Aprimoramento. (a-b) HEB; (c-d) HD; (e-f) UC.

As equações de resistência plástica à compressão axial, equação (70), e da rigidez efetiva à flexão, equação (71), sofreram alterações. Nestas equações A_s representa a seção transversal das barras de reforço, 0,86 é o fator de calibração e $I_{s,z}$ é o momento de segunda ordem da área das barras de reforço no eixo Z da seção transversal compósita.

A_s e $I_{s,z}$ só devem ser considerados, no caso do reforço se encontrar dentro da área não reduzida do concreto.

$$N_{fi,pl,Rd,c} = 0,86\left\{\left((h - 2e_f - 2b_{c,fi,v})(b - e_w - 2b_{c,fi,h})\right) - A_s\right\} f_{c,\theta} / \gamma_{M,fi,c} \quad (70)$$

$$(EI)_{fi,c,z} = E_{c,sec,\theta} \left[\left\{ (h - 2e_f - 2b_{c,fi,v}) \left((b - 2b_{c,fi,h})^3 - e_w^3 \right) / 12 \right\} - I_{s,z} \right] \quad (71)$$

6.4 - Reforço

O parâmetro u , define a média geométrica entre os comprimentos u_1 e u_2 e pode ser definido de acordo com a equação (72), mantendo-se da mesma forma que na norma.

$$u = \sqrt{u_1 \cdot u_2} \quad (72)$$

Onde u_1 é a distância do eixo da barra de reforço externa ao limite interno do banzo e u_2 é a distância do eixo da barra de reforço externa até a superfície exterior do concreto. Tendo como restrição as seguintes condições:

$$\text{se } (u_1 - u_2) > 10 \text{ mm, então } u = \sqrt{u_2(u_2 + 10)} \quad (73)$$

$$\text{ou } (u_2 - u_1) > 10 \text{ mm, então } u = \sqrt{u_1(u_1 + 10)} \quad (74)$$

Na proposta de aprimoramento será calculado o valor da temperatura média do reforço (Figura 30), utilizando a equação (75). Posteriormente deverão ser aplicados os valores dos fatores de redução para o aço de reforço, presentes na Tabela 6. Neste caso, foi apresentado apenas uma equação que serve para os três tipos de perfis, variando os parâmetros e coeficientes para cada tempo de resistência ao fogo, mas com uma restrição de projeto inicial para $u = 50$ mm.

$$\theta_{s,t} = \theta_{0,s} + k_{t,s}(A_m/V), \text{ para } u = 50 \text{ mm} \quad (75)$$

Tabela 25 – Parâmetros aprimorados para temperatura média do reforço.

HEB – HD – UC para u=50

Resistência ao Fogo Padrão	$\theta_{0,s}$ [°C]	$k_{t,s}$ [m°C]
R30	67	5,19
R60	151	14,23
R90	250	18,53
R120	336	20,82

A resistência plástica à compressão axial e a rigidez efetiva à flexão do último componente pode ser obtido com as seguintes equações:

$$N_{fi,pl,Rd,s} = A_s k_{sy,\theta} f_{sy} / \gamma_{M,fi,s} \quad (76)$$

$$(EI)_{fi,s,z} = k_{sE,\theta} E_s I_{s,z} \quad (77)$$

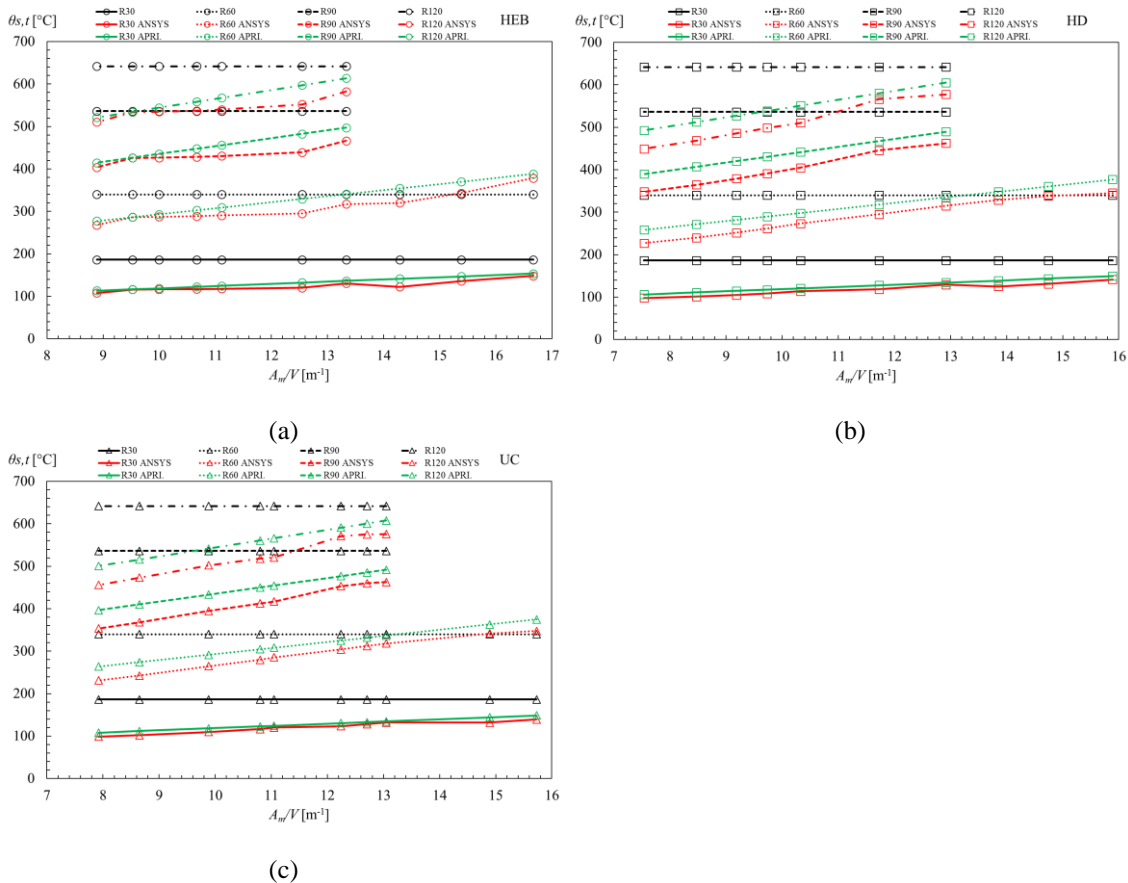


Figura 30 – Temperatura média do reforço para EN 1994-1-2, ANSYS e Aprimoramento. (a) HEB (b) HD (c) UC.

6.5 - Resistência e Rigidez à Temperatura Ambiente

Com o intuito de melhorar as análises e comparações dos valores da resistência plástica a compressão axial e da rigidez efetiva à flexão, também foram calculados os seus valores à temperatura ambiente, sem a influência da redução das propriedades provenientes do calor recebido em situações de incêndio. A seguir serão descritas e expostas as formulações utilizadas para a obtenção da resistência e rigidez das colunas mistas parcialmente revestidas à temperatura ambiente.

Para a comparação, foi utilizada a mesma formulação do anexo G, sendo retiradas as reduções de propriedades e geometria provenientes do aumento de temperatura, as equações (78) e (79) para o cálculo da resistência plástica à compressão axial e rigidez efetiva à flexão respectivamente para os banzos, (80) e (81) para a alma, (82) e (83) para o concreto e (84) e (85) para os reforços.

$$N_{pl,Rd,f} = 2(b e_f f_{ay,f}) \quad (78)$$

$$(EI)_{f,z} = E_{a,f}(e_f b^3)/6 \quad (79)$$

$$N_{pl,Rd,w} = e_w(h - 2e_f)f_{ay,w} \quad (80)$$

$$(EI)_{w,z} = [E_{a,w}(h - 2e_f)e_w^3]/12 \quad (81)$$

$$N_{pl,Rd,c} = 0,86\{[(h - 2e_f)(b - e_w)] - A_s\}f_c \quad (82)$$

$$(EI)_{c,z} = E_{c,sec}\{[(h - 2e_f)((b)^3 - e_w^3)/12] - I_{s,z}\} \quad (83)$$

$$N_{pl,Rd,s} = A_s f_{sy} \quad (84)$$

$$(EI)_{s,z} = E_s I_{s,z} \quad (85)$$

Para a soma dos componentes foram utilizadas as equações (86) e (87), de acordo com as orientações presentes na EN 1994-1-1 [27], utilizam um fator de 0,6 para a componente da rigidez efetiva à flexão para o concreto.

$$N_{pl,Rd} = N_{pl,Rd,f} + N_{pl,Rd,w} + N_{pl,Rd,c} + N_{pl,Rd,s} \quad (86)$$

$$(EI)_{eff,z} = (EI)_{f,z} + (EI)_{w,z} + 0,6(EI)_{c,z} + (EI)_{s,z} \quad (87)$$

Os valores obtidos que foram utilizados para as comparações dos resultados estão presentes na Tabela 26.

Tabela 26 – Resistência a compressão axial e Rigidez efetiva à flexão à temperatura ambiente.

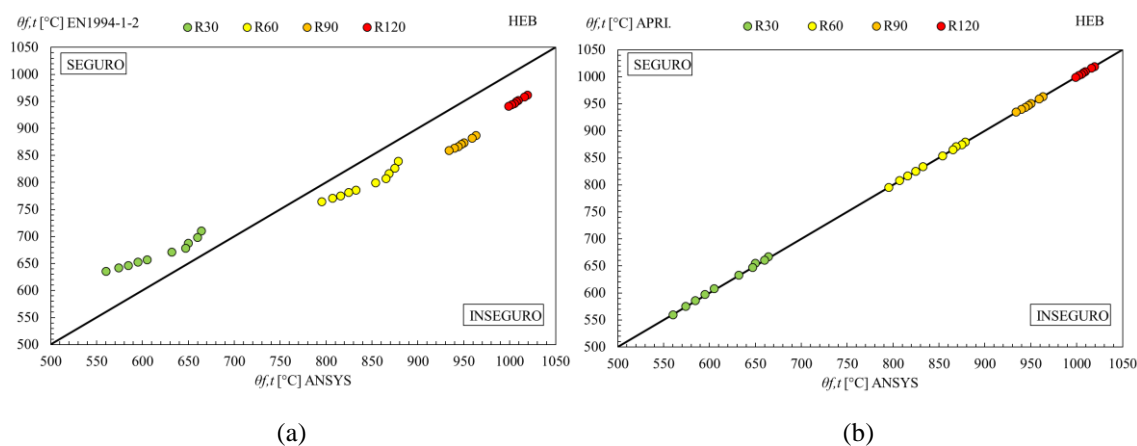
Perfis	$\frac{Am}{V}$ [m ⁻¹]	$N_{pl,Rd}$ [N]	$(EI)_{eff,z}$ [Nm ²]
HEB 240	16,67	4947619	10637870
HEB 260	15,38	5831276	14945345
HEB 280	14,29	6440554	19256409
HEB 300	13,33	7177666	24835394
HEB 340	12,55	8704370	30177389
HEB 450	11,11	10815253	35530588
HEB 500	10,67	11750487	37921860
HEB 600	10,00	13293157	40859900
HEB 700	9,52	15003005	43805745
HEB 900	8,89	18987915	52546487
HD 260x54,1	15,89	4201959	10021275
HD 260x142	14,74	7962304	21707661
HD 260x225	13,85	11338856	34062211
HD 320x127	12,92	7682912	26437787
HD 320x300	11,72	14910118	59617696
HD 400x237	10,33	13935500	87462564
HD 400x382	9,73	19875196	136637495
HD 400x551	9,18	26353472	199278592
HD 400x818	8,47	36428797	314002988
HD 400x1299	7,54	52380175	571116445
UC 254x254x73	15,73	5158947	12117849
UC 254X254X132	14,89	7655879	20059106
UC 305x305x97	13,05	6667956	22757927
UC 305x305x137	12,71	8304863	30164567
UC 305X305X198	12,24	10995845	42318068
UC 356X368X129	11,05	9129458	49051182
UC 356X368X177	10,80	11239878	62045595
UC 356X406X340	9,88	18068957	121964650
UC 356X406X744	8,65	33429078	280353827
UC 356X406X1086	7,92	44438798	444650273

Esta página foi deixada intencionalmente em branco.

CAPÍTULO 7 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

7.1 - Banzos

Para a classe de resistência ao fogo R30, com exceção de apenas um perfil da série HD e de acordo com a norma, todos apresentaram valores maiores que os encontrados numericamente, sendo assim classificados mais seguros, garantindo assim um resultado de resistência à flambagem mais seguro, ou seja, menor do que a capacidade resistente real. Para os demais tempos de resistência ao fogo, a temperatura apresenta valores inseguros, para todos os perfis da série HEB. Para os restantes perfis HD e UC, os resultados variam entre seguro e inseguro, sendo que os perfis com maior fator de seção apresentam resultados inseguros. Comparando os resultados das temperaturas médias para os banzos, obtidas por cálculos avançados, com a nova formulação proposta, todos os valores de temperaturas médias para os banzos estão seguros e próximos aos valores numéricos, ver Figura 31, na esquerda a comparação com os resultados numéricos para o modelo de acordo com a norma (EN 1994-1-2) e na direita a comparação, para o modelo de acordo com o Aprimoramento (APRI.).



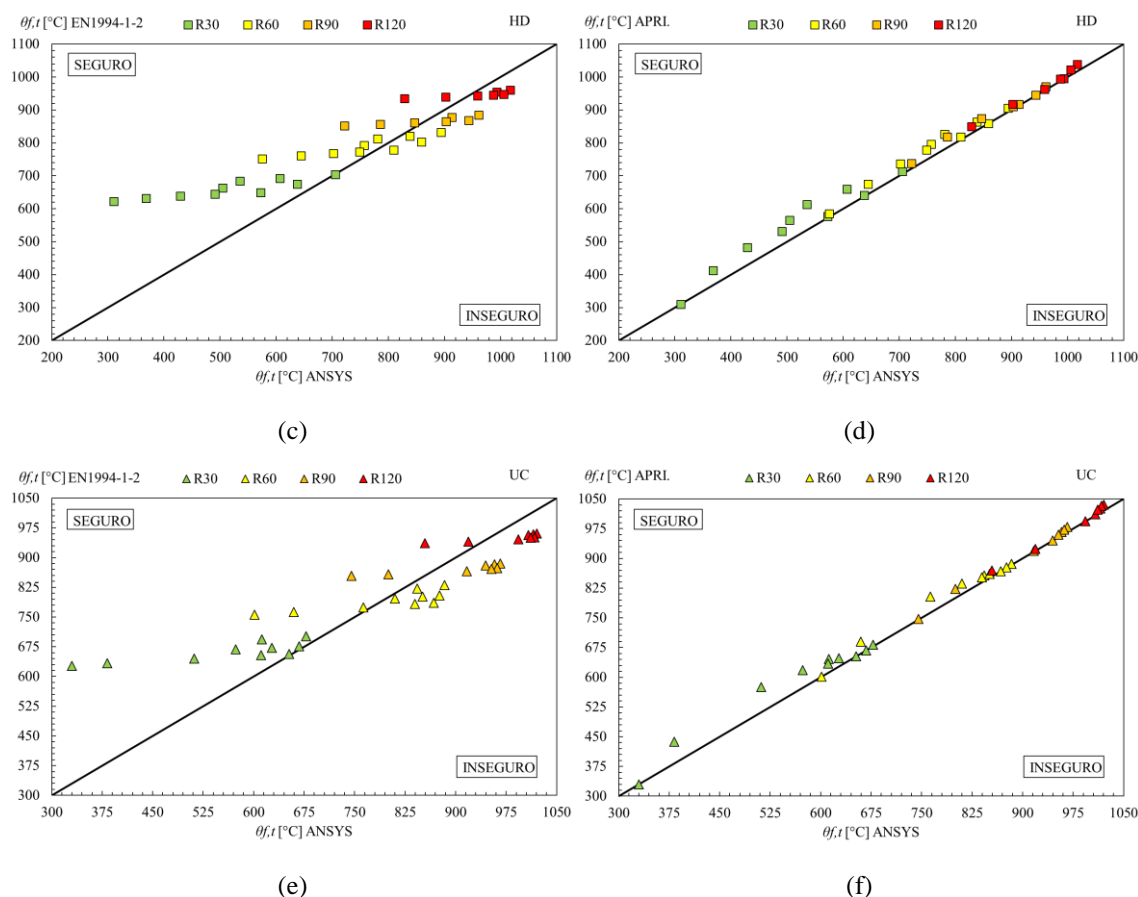


Figura 31 – Comparação entre o Anexo G (a,c,e) e o Aprimoramento (b,d,f) com os resultados numéricos para a temperatura média dos banzos.

7.2 - Alma

Como no Anexo G do Eurocódigo 4 parte 1-2 [1] a temperatura da alma não é calculada de forma direta e a sua geometria é reduzida, a temperatura média obtida indiretamente, não representa a temperatura média total da alma, pois exclui a região desprezada. Nos instantes iniciais, a parte geométrica não desprezada da alma, influencia diminuindo a temperatura média total da alma e nos tempos finais aumenta a temperatura média da alma. Por este motivo, os resultados determinados com a formulação atual da norma cruzam da zona segura nos tempos iniciais, para a zona insegura nos tempos mais longos de resistência ao fogo.

Com as novas formulações, toda a área da alma foi considerada, consequentemente reduzindo as propriedades mecânicas, e ajustando os valores da temperatura média da alma, estando todos na zona segura e o mais próximo do ideal, ver Figura 32.

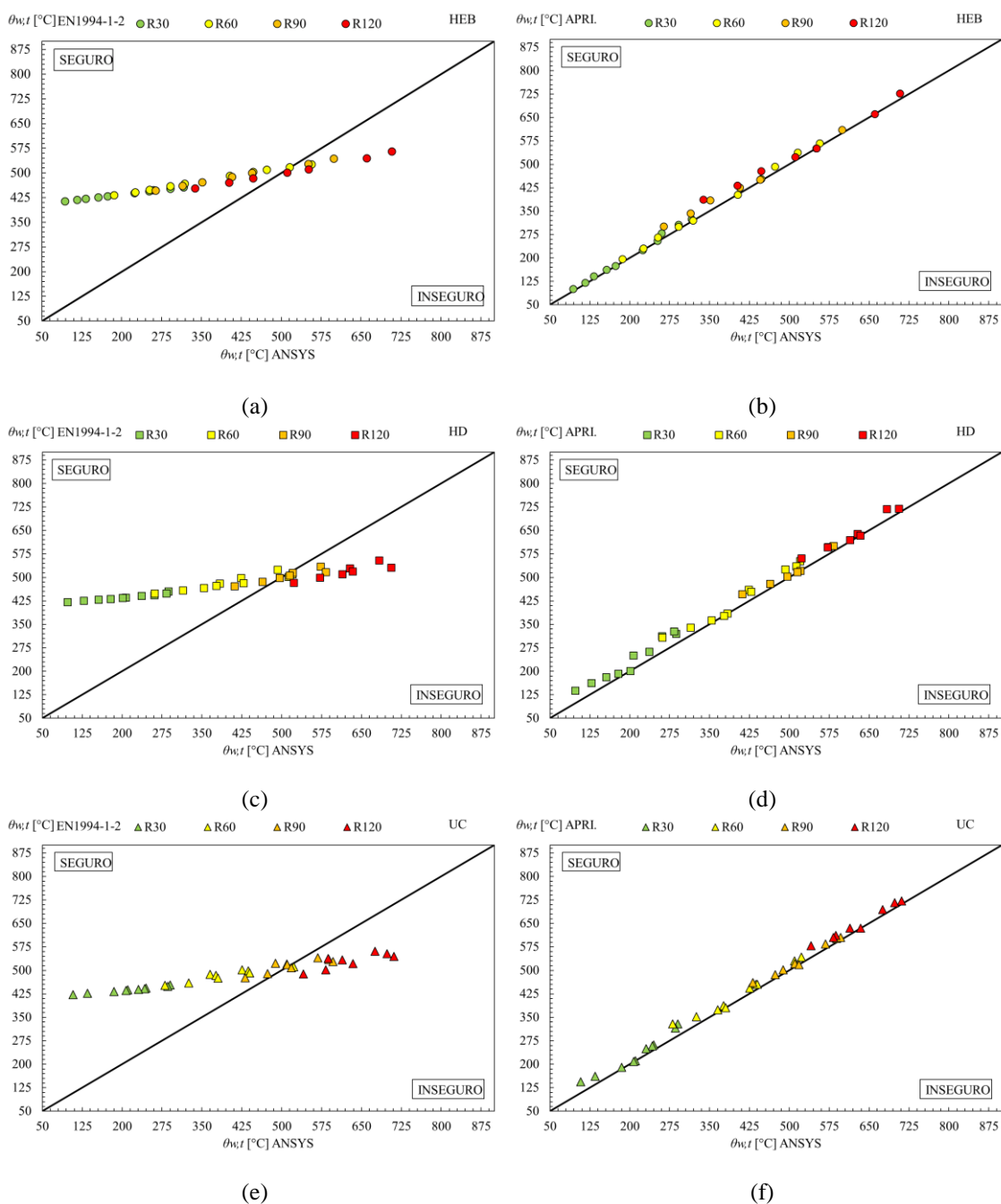


Figura 32 – Comparação entre o Anexo G (a,c,e) e o Aprimoramento (b,d,f) com os resultados numéricos para a temperatura média da alma.

7.3 - Concreto

As temperaturas médias obtidas numericamente para o concreto não ultrapassam o limite de 500 °C. Os resultados obtidos por meio das tabelas presentes no Anexo G, apresentam-se razoáveis para a maioria dos perfis, dentro da zona segura. Apenas alguns perfis de maior fator de seção, normalmente perfis de menores dimensões ou mais finos,

entram na zona insegura, agravando-se conforme os tempos de resistência ao fogo aumentam.

As novas formulações para a temperatura média do concreto corrigem os pontos presentes na zona insegura e aproximam a temperatura média do concreto dos perfis para a temperatura encontrada a partir da isotérmica, ver Figura 33, que apresenta os resultados para as temperaturas médias do concreto, em relação ao resultados numéricos, da EN 1994-1-2 (esquerda) e do Aprimoramento (direita), separados por séries de perfis.

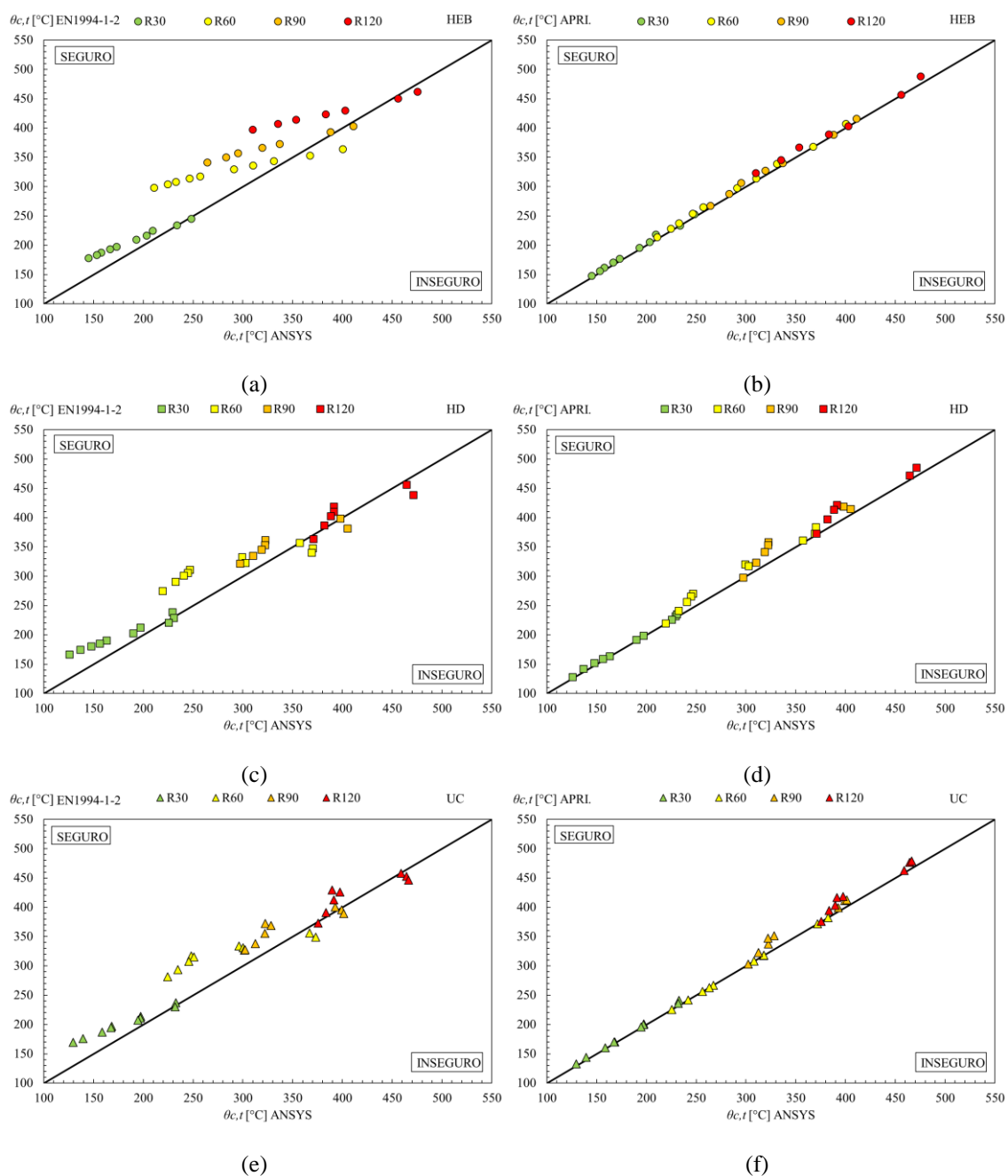
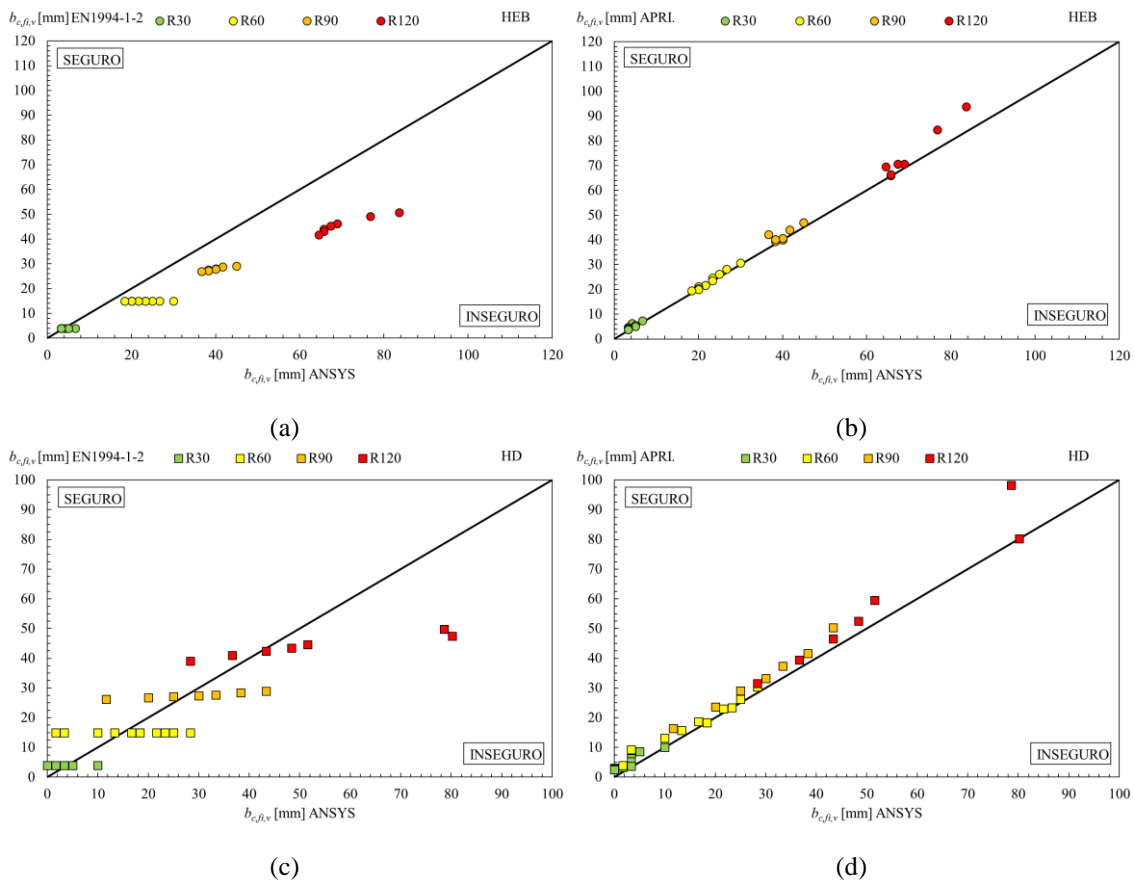


Figura 33 – Comparação entre o Anexo G (a,c,e) e o Aprimoramento (b,d,f) com os resultados numéricos para a temperatura média do concreto.

A redução do concreto que era considerada igual nas duas direções na norma, agora passou a ter uma equação para a direção vertical e outra para a horizontal. A redução na direção vertical, devido o concreto estar protegido pelos banzos, é fortemente influenciada pelo fator de seção da seção transversal, ou seja, o seu tamanho. Seções transversais com perfis menores, aquecem mais rápido, quando comparados aos com perfis maiores.

Os perfis com maior fator de seção apresentaram valores inseguros para a redução vertical do concreto, para as três séries de perfis. As formulações do aprimoramento resultam em reduções verticais seguras. Na Figura 34 é apresentado a comparação entre os resultados da redução vertical do concreto, para o modelo atual e o aprimoramento.



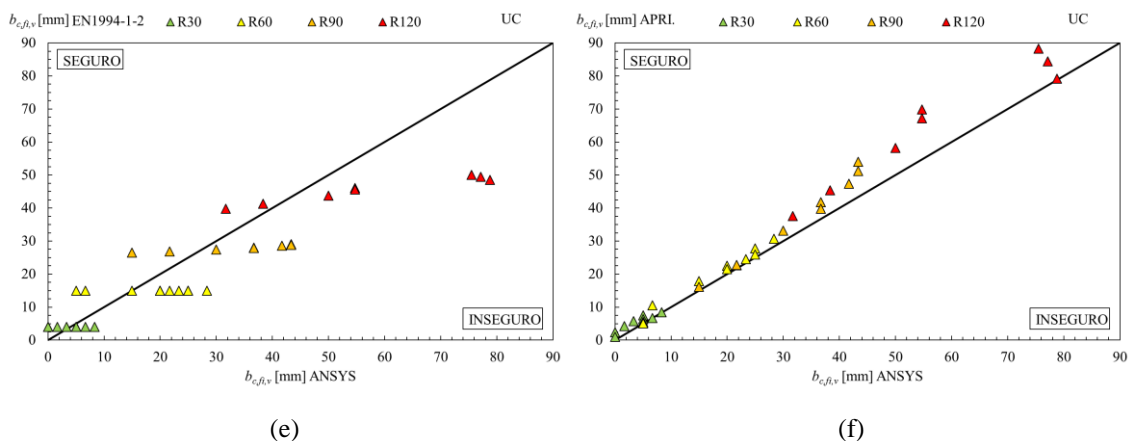
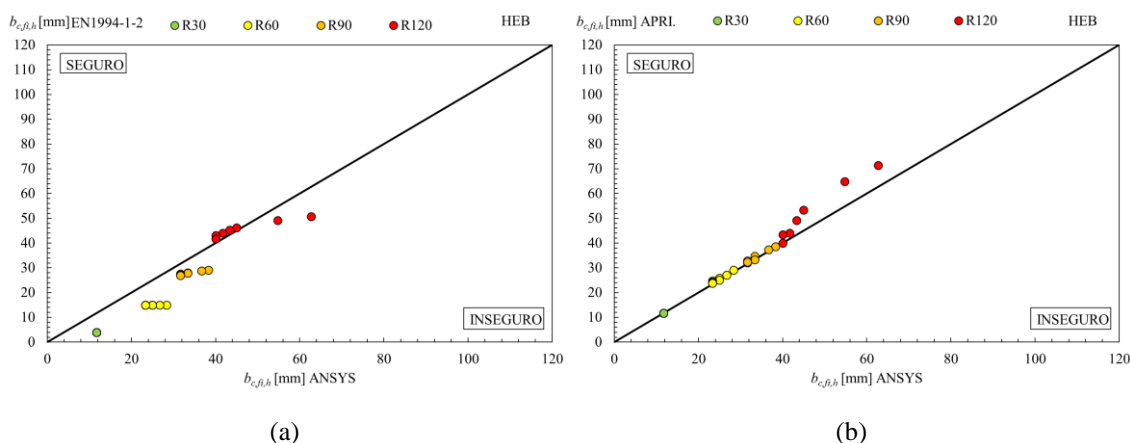


Figura 34 – Comparação entre o Anexo G (a,c,e) e o Aprimoramento (b,d,f) com os resultados numéricos para a redução vertical do concreto.

As reduções horizontais, de acordo com a norma apresentaram-se na sua maioria reduções inseguras. Devido ao fato do concreto estar diretamente exposto à ação do fogo na direção horizontal, a sua redução está relacionada inicialmente ao tempo de exposição ao fogo, sendo que para R30 e R60 as três classes de perfis, apresentaram praticamente a mesma redução. Nos demais tempos, os resultados então sendo afetados também pelos demais componentes da seção transversal.

As novas formulações aumentam as reduções horizontais do concreto, desprezando somente as porções com temperaturas superiores a 500 °C, não consideradas úteis para a resistência e rigidez da coluna, garantindo segurança.



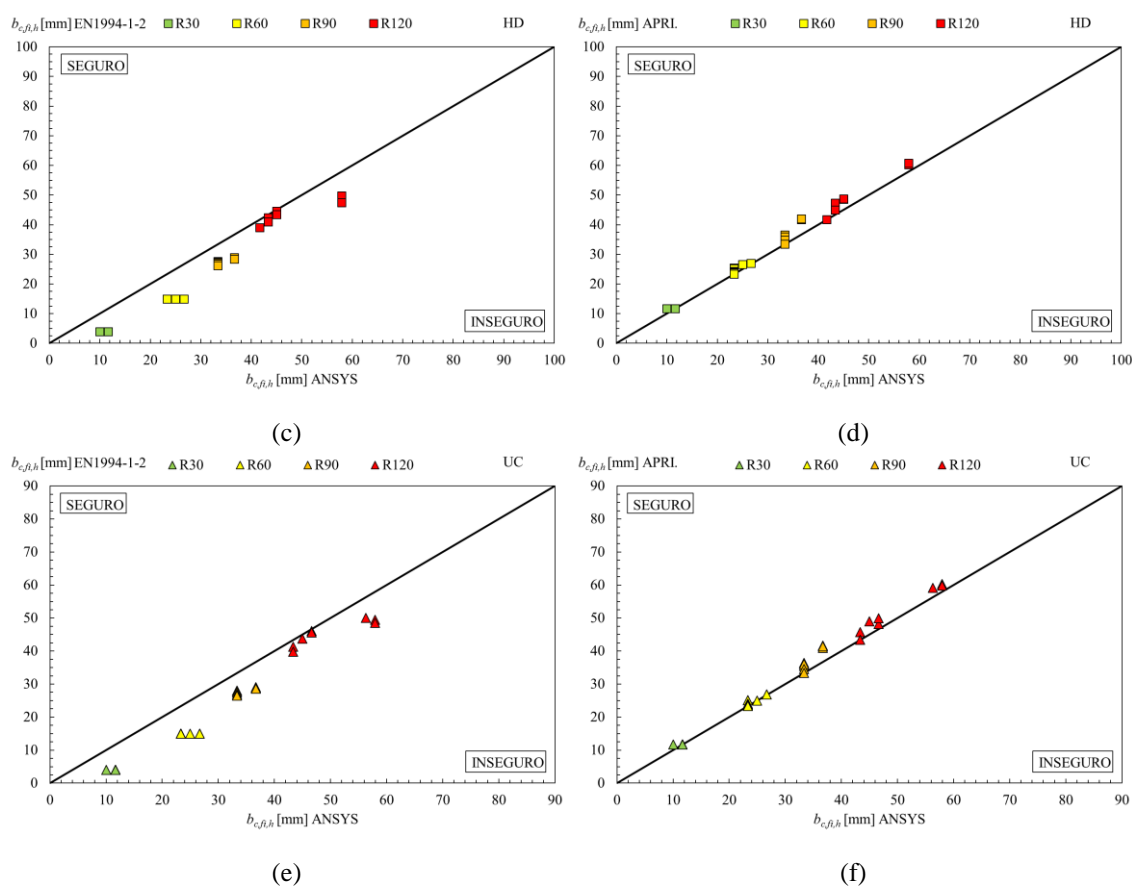


Figura 35 – Comparação entre o Anexo G (a,c,e) e o Aprimoramento (b,d,f) com os resultados numéricos para a redução horizontal do concreto.

7.4 - Reforço

As temperaturas médias dos reforços no Anexo G são inferidas indiretamente, utilizando coeficientes de redução para as suas propriedades mecânicas de acordo com a espessura do cobrimento de concreto u . Neste trabalho, para a determinação das geometrias das seções transversais, foi utilizado um fator de cobrimento de concreto médio de 50 mm nas duas direções e igual para todas as colunas. Por este motivo, o valor da temperatura indireta é igual para todas as colunas em cada classe de resistência, quando se utiliza a norma atual. A nova proposta altera este pressuposto.

Os valores de temperatura média obtidos pela norma atual, apresentam, na sua maioria, valores seguros para as três séries de perfis. Analisando os resultados obtidos numericamente, o cobrimento de concreto não é o único fator que influencia na temperatura dos reforços, pois quanto maior o fator de seção, maiores serão as temperaturas médias dos reforços. No aprimoramento foi utilizado uma nova equação para os três tipos de classes de perfis e para cobrimento de concreto de 50 mm. As

temperaturas médias foram ajustadas de acordo com os resultados numéricos, ver Figura 36.

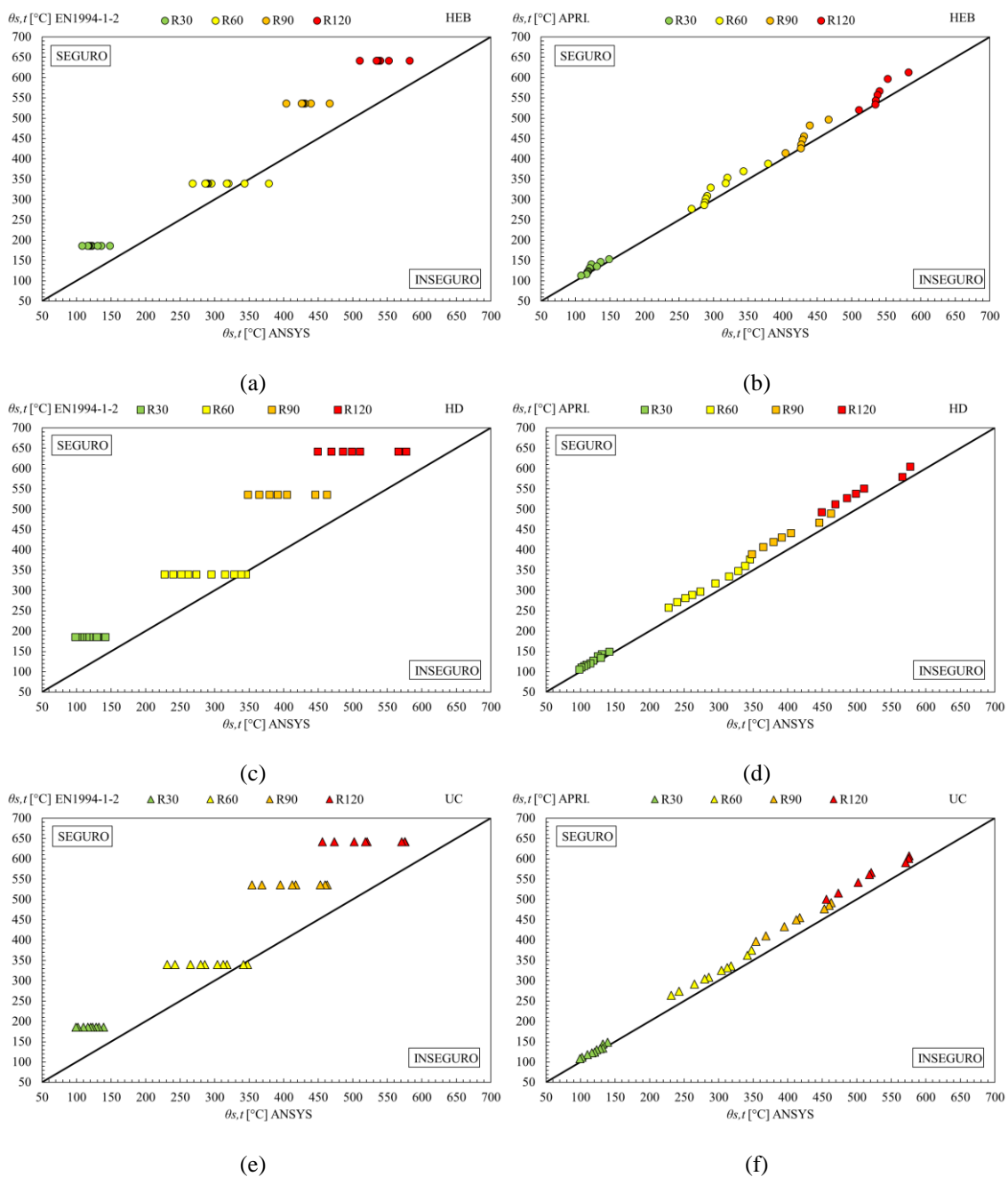


Figura 36 – Comparação entre o Anexo G (a,c,e) e o Aprimoramento (b,d,f) com os resultados numéricos para a temperatura média dos reforços.

7.5 - Resistência à Compressão Axial e Rigidez Efetiva à Flexão

O valor da resistência plástica à compressão axial das colunas mistas parcialmente revestidas, é apresentado na Figura 37, para as três séries de perfis. Os valores para Bruno Alfredo

resistência ao fogo em 30 minutos estão seguros, pois apresentam valores menores que os calculados com o aprimoramento realizado. Nas demais classes de resistência ao fogo, as seções transversais com maior fator de seção, começam a se deslocar para a zona insegura, sendo que em R120 duas colunas HEB apresentam resultados inseguros e nas colunas HD e UC, seis. Totalizando quatorze resultados inseguros, de vinte e dois, na classe com mais tempo de resistência ao fogo.

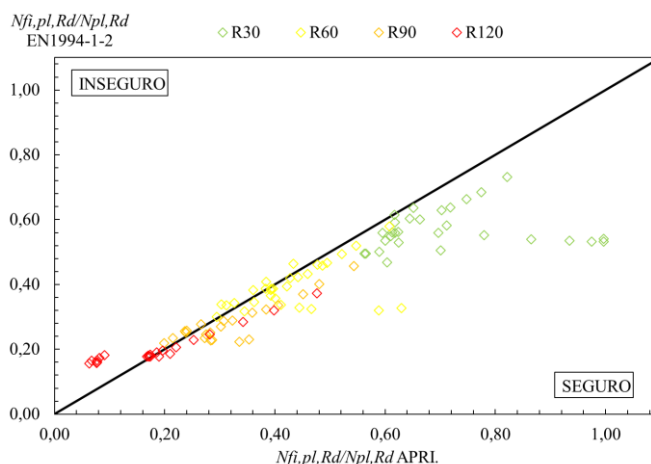


Figura 37 – Comparação entre o Anexo G e o Aprimoramento para a resistência plástica a compressão axial.

Na Figura 38 são comparados os valores da rigidez efetiva à flexão de acordo com a norma em relação aos valores obtidos no aprimoramento, ambas as imagens, da resistência e da rigidez, apresentam seus valores divididos pelo valor respectivo à temperatura ambiente, para melhor visualização na escala.

Os valores da rigidez efetiva à flexão para R30 apresentam-se seguros, com exceção de uma coluna da série HD. Para a classe de resistência ao fogo R60 as seções HEB e UC apresentam apenas dois pontos seguros cada e HD apresenta quatro pontos. Para as duas últimas classes de resistência, os resultados da norma para as três séries de perfis apresentam mais valores seguros que inseguros, sendo as séries com maior fator de seção inseguros.

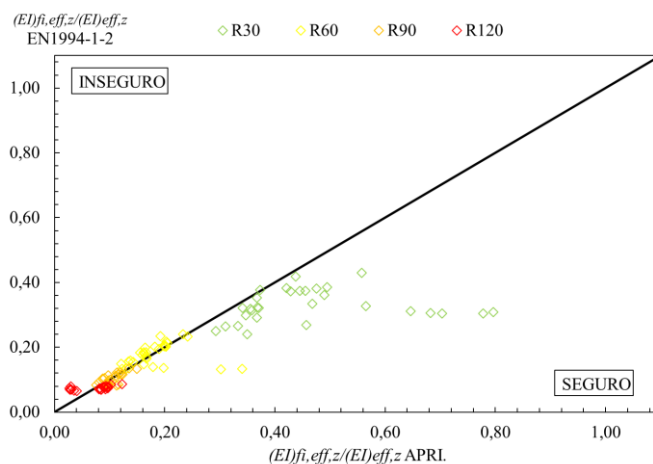


Figura 38 – Comparação entre o Anexo G e o Aprimoramento para a rigidez efetiva à flexão.

7.6 - Resistência à Flambagem

As curvas de resistência à flambagem são apresentadas na Figura 39 e na Figura 40, para os comprimentos $L=3$ e 4 m das colunas mistas parcialmente revestidas, para os três diferentes comprimentos de flambagem, 1,0, 0,7 e 0,5. Os resultados apresentam os valores de resistência à flambagem, utilizando a curva “c” do Eurocódigo 3 parte 1-1 [31], para R30, R60, R90 e R120. À esquerda são apresentados os valores obtidos com o anexo G da norma EN 1994-1-2 e à direita são apresentados os resultados com o novo aprimoramento. Confirma-se que a resistência à flambagem aumenta com a redução do comprimento de flambagem, ou com a redução da esbeltez adimensional. Os fatores de redução (χ_z) obtidos pelo aprimoramento levam a valores seguros de resistência à flambagem para as colunas.

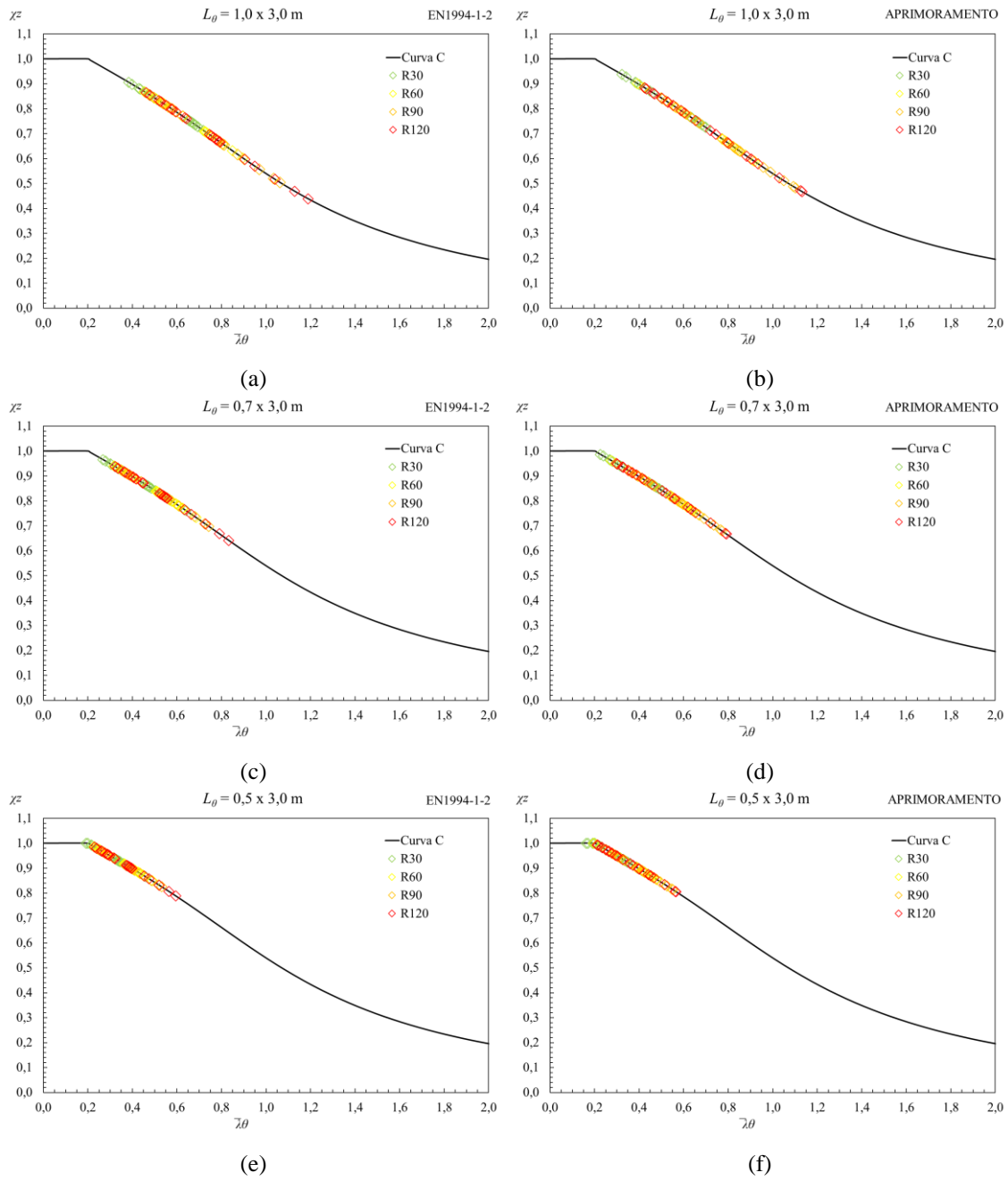


Figura 39 – Curvas de flambagem para o comprimento $L=3 \text{ m}$, para os três comprimentos de flambagem, para EN 1994-1-2 (a,c,e) e o Aprimoramento realizado (b,d,f).

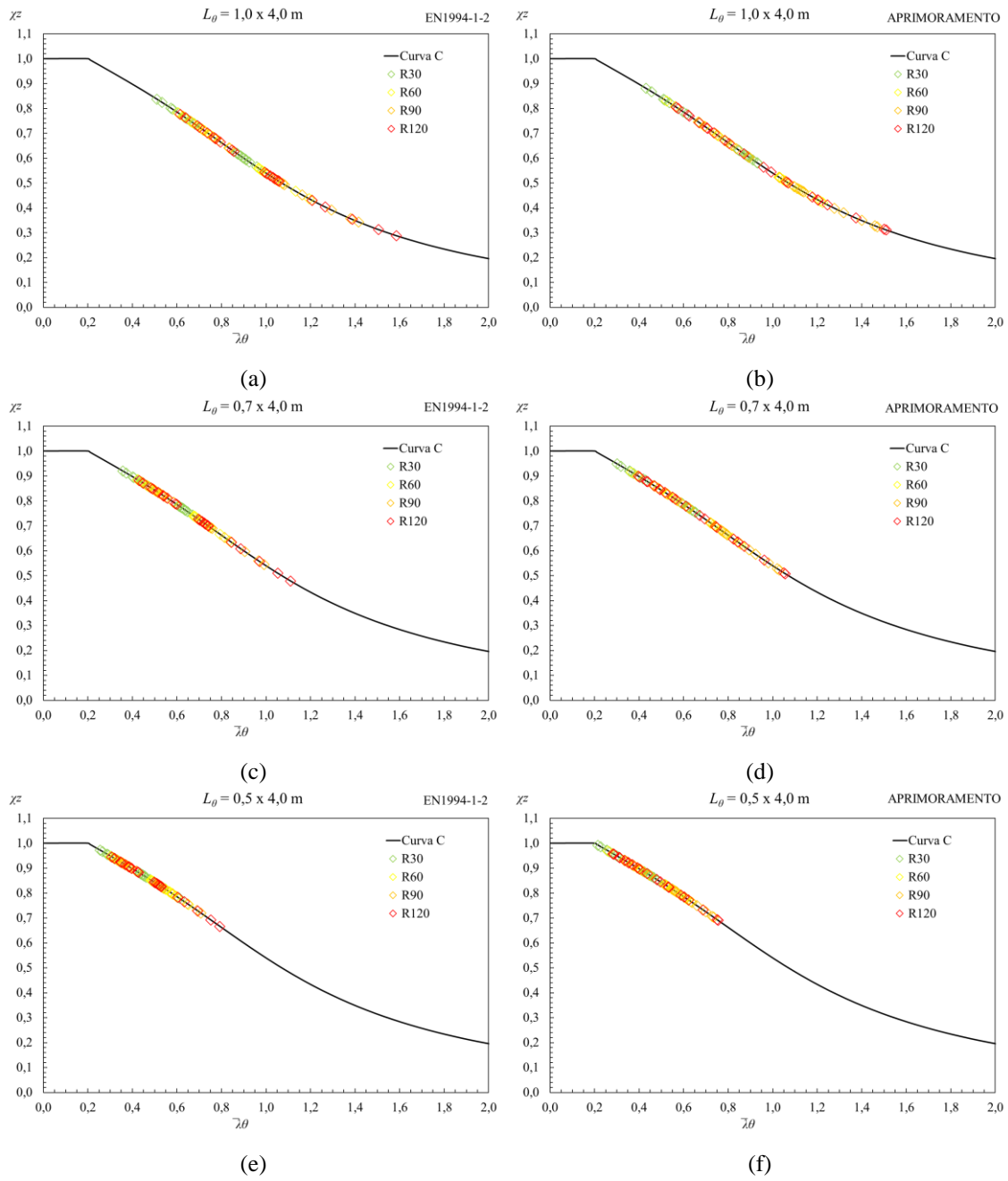


Figura 40 – Curvas de flambagem para o comprimento $L=4 \text{ m}$, para os três comprimentos de flambagem, para EN 1994-1-2 (a,c,e) e o Aprimoramento realizado (b,d,f).

CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Os valores de temperaturas médias determinados no anexo G do Eurocódigo 4, parte 1-2 apresentam resultados inseguros em relação aos valores obtidos pelo método avançado de cálculo. Os aprimoramentos apresentados, nas formulações para o cálculo da temperatura média para cada componente, demonstraram resultar em valores de temperaturas seguros.

Para o tempo de resistência ao fogo de 30 minutos, Eurocódigo 4, parte 1-2 apresenta resultados seguros em comparação ao aprimoramento realizado, mas para os demais tempos de resistência ao fogo a norma apresenta resultados inseguros, para determinados valores de fator de seção, série de perfil e resistência ao fogo.

A norma apresentou bons resultados para os perfis com menor fator de seção, ou seja, perfis de maiores dimensões, pois resultou em valores seguros para a resistência plástica à compressão axial e para a rigidez efetiva à flexão. Para os resultados obtidos com os trinta perfis estudados, quanto menor o fator de seção e maior o tempo de resistência ao fogo, mais seguro os resultados obtidos pela norma.

Como sugestões para futuros trabalhos, incentiva-se a realização de simulações numéricas tridimensionais para verificar a resistência à flambagem das colunas com as séries de perfis presentes neste trabalho, no intuito de perceber qual a curva de flambagem mais adequada e a realização de testes experimentais para validar os resultados. É também importante verificar, se as equações deste estudo se encaixam para seções transversais de colunas mistas parcialmente revestidas com outros tipos de séries de perfis, apenas corrigindo os parâmetros. Sugere-se ainda a realização de ensaios experimentais.

Também se sugere o estudo da resistência à flambagem das colunas mistas parcialmente revestidas, quando submetidas a curvas de incêndios paramétricas ou baseadas no desempenho.

Esta página foi deixada intencionalmente em branco.

REFERÊNCIAS

- [1] CEN - EN 1994-1-2, “Eurocode 4 - Design of composite steel and concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design Eurocode”. European Standard, Brussels, p. 109, 2005.
- [2] ISO834-1, “Fire-resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements”. Switzerland, p. 25, 1999.
- [3] A. Fellouh *et al.*, “Load carrying capacity of partially encased columns for different fire ratings”, *Fire Research*, vol. 1:23, p. 13–19, 2016.
- [4] L. Calió, P. Piloto, e R. Rigobello, “Balanced Summation model for the calculation of the buckling resistance of partially encased columns under fire: New improvements”, proceedings of *Research and advanced technology in fire safety*, ISBN 978-84-8102-832-4, p. 271–287, 20 de outubro de 2017, University of Santander - GIDAI, Santander, Spain.
- [5] ANSYS®, “Academic Research Mechanical APDL”. Release 18.2.
- [6] H. L. Malhotra, “Effect of Temperature on the Crushing Strength of Concrete”, *Fire Safety Science*, nº 130, 1954.
- [7] R. F. Stevens e H. L. Malhotra, “Fire Resistance of Encased Steel Stanchions”, proceedings of *the Institution of Civil Engineers*, p. 77–98, 1964, vol. 27, nº 1.
- [8] J. C. Dotreppe, J. M. Franssen, e J. B. Schleich, “Computer aided fire resistance for steel and composite structures”, *Acier - Stahl - Steel*, vol. 3, p. 105–112, 1984.
- [9] K. Kordina, “Behaviour of Composite Columns and Girders in Fire”, proceedings of *Fire Safety Science - Second International Symposium*, p. 681–695, 1989, Borehamwood, England.
- [10] T. T. Lie e M. Chabot, “A method to predict the fire resistance of circular concrete filled hollow steel columns”, *Journal of Fire Protection Engineering*, vol. 2, nº 4, p. 111–124, 1990.
- [11] S. Winter e J. Lange, “Behavior of Partially Encased Composite Columns Using High-Strength Steel - Ultimate”, proceedings of *Composite Construction in Steel and Concrete IV*, ISBN 0784406162, p. 539–550, 2002.
- [12] L. H. Han *et al.*, “Residual strength of concrete-filled RHS columns after exposure to the ISO-834 standard fire”, *Thin-Walled Structures*, vol. 40, nº 12, p. 991–1012, 2002.
- [13] M. Korzen, J. P. C. Rodrigues, e A. M. Correia, “Composite columns made of

- partially encased steel sections subjected to fire”, proceedings of *the 6th International Conference on Structures in Fire*, ISBN 9781605950273, p. 341–348, junho de 2010, Michigan State University, East Lansing.
- [14] A. J. P. Moura Correia e J. P. C. Rodrigues, “Fire resistance of partially encased steel columns with restrained thermal elongation”, *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 67, n° 4, p. 593–601, 2011.
- [15] S.-S. Huang, B. Davison, e I. W. Burgess, “High-temperature tests on joints to steel and partially-encased H-section columns”, *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 80, p. 243–251, 2013.
- [16] P. A. G. Piloto *et al.*, “Experimental investigation of the fire resistance of partially encased beams”, *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 80, n° Oct, p. 121–137, 2013.
- [17] S. Arezki e I. Said, “Practical fire design of partially encased composite steel-concrete columns according to Eurocode 4”, proceedings of *MATEC Web of Conferences.*, p. 01029, 2014, vol. 11, EDP Sciences.
- [18] P. Piloto *et al.*, “Partially Encased Section : Strength and Stiffness Under Fire Conditions”, proceedings of *IFireSS - International Fire Safety Symposium*, p. 15–18, 20 de abril de 2015, Coimbra, Portugal.
- [19] M. Milanović, M. Cvetkovska, e P. Knežević, “Load-bearing capacity of fire exposed composite columns”, *Gradjevinar*, vol. 67, n° 12, p. 1187–1197, 2015.
- [20] J. Kralik, M. Klabnik, e A. Grmanova, “Nonlinear Analysis of Steel Concrete Columns Fire Resistance”, proceedings of *Engineering Mechanics 2016*, 9 de maio de 2016, n° 22, Svratka, Czech Republic.
- [21] J. K. Ahn e C. H. Lee, “Fire behavior and resistance of partially encased and slim-floor composite beams”, *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 129, p. 276–285, 2017.
- [22] A. Piquer e D. Hernández-Figueirido, “Protected steel columns vs partially encased columns: Fire resistance and economic considerations”, *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 124, n° May, p. 47–56, 2016.
- [23] P. A. G. Piloto *et al.*, “Experimental bending tests of partially encased beams at elevated temperatures”, *Fire Safety Journal*, vol. 92, n° May, p. 23–41, 2017.
- [24] CEN - EN 1991-1-2, “Eurocode 1: Actions on structures -Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire”. European Standard, Brussels, p. 59, 2002.
- [25] V. P. e Silva, “Estruturas de aço em situação de incêndio. Determinação da

- temperatura nos elementos estruturais de aço com proteção térmica. Uma proposta de revisão da NBR 14323:1999.”, proceedings of *XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural*, p. 14, 27 de maio de 2002, Brasília, Brasil.
- [26] R. D. Peacock *et al.*, “Defining flashover for fire hazard calculations”, *Fire Safety Journal*, vol. 32, p. 331–345, 1999.
- [27] CEN - EN 1994-1-1, “Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings Eurocode”. European Standard, Brussels, p. 118, 2004.
- [28] ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas, “NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios”. Rio de Janeiro, p. 237, 2008.
- [29] ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas, “NBR 14323: Dimensionamento de estruturas de aço e de estruturas mistas aço-concreto de edifícios em situação de incêndio”. Rio de Janeiro, p. 89, 2013.
- [30] tectonica-online, “Steel profiles partially embedded in concrete for improving fire resistance”. [Online]. Available at: http://www.tectonica-online.com/products/1710/improving_fire_resistance_concrete_embedded_profiles_partially_steel/. [Acessado: 30-abr-2018].
- [31] CEN - EN 1993-1-1, “Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings Eurocode”. European Standard, Brussels, p. 91, 2005.
- [32] CEN - EN 1993-1-2, “Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design Eurocode”. European Standard, Brussels, p. 78, 2005.
- [33] ArcelorMittal Commercial Sections, “ArcelorMittal Europe Long Products - Sections and Merchant Bars”. Luxembourg, p. 213, 2017.
- [34] CEN - EN 1992-1-1, “Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings Eurocode”. European Standard, Brussels, p. 225, 2004.
- [35] CEN - EN 1992-1-2, “Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design Eurocode”. European Standard, Brussels, p. 97, 2004.
- [36] O. Jungbluth, “Optimierte Verbandbauteile”. *Stahlbau Handbuch 1*, Stahlbau-Verglas-GmbH, Köln, 1982.
- [37] ANSYS®, “Academic Research Mechanical APDL”. Release 18.1, Help System, Element reference Plane 55, ANSYS, Inc.

Esta página foi deixada intencionalmente em branco.

ANEXO A

Método Simplificado de Cálculo - EN 1994-1-2 Anexo G

ANEXO A - MÉTODO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO - EN 1994-1-2 ANEXO G

A.1 - Banzos

Tabela 27 – Temperatura média dos banzos - EN1994-1-2.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	θ_{fi} [°C]			
		R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	710,83	839,17		
HEB 260	15,38	698,46	826,92		
HEB 280	14,29	687,86	816,43		
HEB 300	13,33	678,67	807,33	887,00	962,00
HEB 340	12,55	671,10	799,84	882,18	958,35
HEB 450	11,11	657,22	786,11	873,33	951,67
HEB 500	10,67	652,93	781,87	870,60	949,60
HEB 600	10,00	646,50	775,50	866,50	946,50
HEB 700	9,52	641,90	770,95	863,57	944,29
HEB 900	8,89	635,78	764,89	859,67	941,33
HD 260x54,1	15,89	703,33	831,74		
HD 260x142	14,74	692,25	820,78		
HD 260x225	13,85	683,68	812,29		
HD 320x127	12,92	674,65	803,35	884,44	960,06
HD 320x300	11,72	663,13	791,96	877,10	954,51
HD 400x237	10,33	649,65	778,62	868,51	948,02
HD 400x382	9,73	643,93	772,96	864,86	945,26
HD 400x551	9,18	638,59	767,67	861,46	942,69
HD 400x818	8,47	631,71	760,87	857,08	939,37
HD 400x1299	7,54	622,71	751,96	851,34	935,04
UC 254x254x73	15,73	701,76	830,19		
UC 254x254x132	14,89	693,71	822,22		
UC 305x305x97	13,05	675,90	804,59	885,24	960,67
UC 305x305x137	12,71	672,64	801,37	883,16	959,09
UC 305x305x198	12,24	668,15	796,92	880,30	956,93
UC 356x368x129	11,05	656,63	785,53	872,96	951,38
UC 356x368x177	10,80	654,22	783,14	871,42	950,22
UC 356x406x340	9,88	645,38	774,39	865,79	945,96
UC 356x406x744	8,65	633,43	762,57	858,17	940,20
UC 356x406x1086	7,92	626,43	755,64	853,71	936,83

Tabela 28 – Fatores de redução da tensão de escoamento e módulo de elasticidade do aço estrutural para o banzo - EN1994-1-2.

$k_{y,\theta}$				$k_{E,\theta}$			
R30	R60	R90	R120	R30	R60	R90	R120
0,2170	0,0904			0,1257	0,0812		
0,2337	0,0965			0,1328	0,0839		
0,2591	0,1018			0,1519	0,0863		
0,2812	0,1063	0,0665	0,0476	0,1684	0,0884	0,0704	0,0536
0,2994	0,1102	0,0689	0,0483	0,1820	0,0901	0,0715	0,0544
0,3327	0,1267	0,0733	0,0497	0,2070	0,0956	0,0735	0,0559
0,3430	0,1318	0,0747	0,0501	0,2147	0,0973	0,0741	0,0563
0,3584	0,1394	0,0768	0,0507	0,2263	0,0998	0,0750	0,0570
0,3694	0,1449	0,0782	0,0511	0,2346	0,1016	0,0757	0,0575
0,3841	0,1521	0,0802	0,0517	0,2456	0,1040	0,0766	0,0582
0,2260	0,0941			0,1287	0,0829		
0,2486	0,0996			0,1439	0,0853		
0,2692	0,1039			0,1594	0,0872		
0,2909	0,1083	0,0678	0,0480	0,1756	0,0892	0,0710	0,0540

0,3185	0,1197	0,0715	0,0491	0,1964	0,0932	0,0727	0,0552
0,3508	0,1357	0,0757	0,0504	0,2206	0,0986	0,0746	0,0567
0,3646	0,1425	0,0776	0,0509	0,2309	0,1008	0,0754	0,0573
0,3774	0,1488	0,0793	0,0515	0,2405	0,1029	0,0762	0,0579
0,3939	0,1570	0,0815	0,0521	0,2529	0,1057	0,0772	0,0586
0,4155	0,1676	0,0843	0,0530	0,2691	0,1092	0,0784	0,0596
0,2279	0,0949			0,1293	0,0832		
0,2451	0,0989			0,1413	0,0850		
0,2878	0,1077	0,0674	0,0479	0,1734	0,0890	0,0708	0,0539
0,2957	0,1093	0,0684	0,0482	0,1793	0,0897	0,0713	0,0542
0,3064	0,1137	0,0699	0,0486	0,1873	0,0912	0,0719	0,0547
0,3341	0,1274	0,0735	0,0497	0,2081	0,0958	0,0736	0,0559
0,3399	0,1302	0,0743	0,0500	0,2124	0,0967	0,0739	0,0562
0,3611	0,1407	0,0771	0,0508	0,2283	0,1002	0,0752	0,0572
0,3898	0,1549	0,0809	0,0520	0,2498	0,1050	0,0769	0,0585
0,4066	0,1632	0,0831	0,0526	0,2624	0,1077	0,0779	0,0592

Tabela 29 – Propriedades mecânicas do aço estrutural reduzidas de acordo com a temperatura média do banzo - EN1994-1-2.

$f_{av,ft}$ [Pa]				$E_{a,ft}$ [Pa]			
R30	R60	R90	R120	R30	R60	R90	R120
7,49E+07	3,12E+07			2,64E+10	1,70E+10		
8,06E+07	3,33E+07			2,79E+10	1,76E+10		
8,94E+07	3,51E+07			3,19E+10	1,81E+10		
9,70E+07	3,67E+07	2,29E+07	1,64E+07	3,54E+10	1,86E+10	1,48E+10	1,12E+10
1,03E+08	3,80E+07	2,38E+07	1,67E+07	3,82E+10	1,89E+10	1,50E+10	1,14E+10
1,15E+08	4,37E+07	2,53E+07	1,71E+07	4,35E+10	2,01E+10	1,54E+10	1,17E+10
1,18E+08	4,55E+07	2,58E+07	1,73E+07	4,51E+10	2,04E+10	1,56E+10	1,18E+10
1,24E+08	4,81E+07	2,65E+07	1,75E+07	4,75E+10	2,10E+10	1,58E+10	1,20E+10
1,27E+08	5,00E+07	2,70E+07	1,76E+07	4,93E+10	2,13E+10	1,59E+10	1,21E+10
1,33E+08	5,25E+07	2,77E+07	1,78E+07	5,16E+10	2,18E+10	1,61E+10	1,22E+10
8,02E+07	3,34E+07			2,70E+10	1,74E+10		
8,58E+07	3,44E+07			3,02E+10	1,79E+10		
9,02E+07	3,48E+07			3,35E+10	1,83E+10		
1,00E+08	3,74E+07	2,34E+07	1,66E+07	3,69E+10	1,87E+10	1,49E+10	1,13E+10
1,07E+08	4,01E+07	2,39E+07	1,64E+07	4,12E+10	1,96E+10	1,53E+10	1,16E+10
1,21E+08	4,68E+07	2,61E+07	1,74E+07	4,63E+10	2,07E+10	1,57E+10	1,19E+10
1,22E+08	4,77E+07	2,60E+07	1,71E+07	4,85E+10	2,12E+10	1,58E+10	1,20E+10
1,23E+08	4,84E+07	2,58E+07	1,67E+07	5,05E+10	2,16E+10	1,60E+10	1,22E+10
1,24E+08	4,94E+07	2,57E+07	1,64E+07	5,31E+10	2,22E+10	1,62E+10	1,23E+10
1,23E+08	4,95E+07	2,49E+07	1,56E+07	5,65E+10	2,29E+10	1,65E+10	1,25E+10
8,09E+07	3,37E+07			2,72E+10	1,75E+10		
8,46E+07	3,41E+07			2,97E+10	1,78E+10		
1,02E+08	3,82E+07	2,39E+07	1,70E+07	3,64E+10	1,87E+10	1,49E+10	1,13E+10
1,02E+08	3,77E+07	2,36E+07	1,66E+07	3,76E+10	1,88E+10	1,50E+10	1,14E+10
1,06E+08	3,92E+07	2,41E+07	1,68E+07	3,93E+10	1,92E+10	1,51E+10	1,15E+10
1,15E+08	4,39E+07	2,54E+07	1,72E+07	4,37E+10	2,01E+10	1,55E+10	1,17E+10
1,17E+08	4,49E+07	2,56E+07	1,72E+07	4,46E+10	2,03E+10	1,55E+10	1,18E+10
1,21E+08	4,71E+07	2,58E+07	1,70E+07	4,79E+10	2,11E+10	1,58E+10	1,20E+10
1,23E+08	4,88E+07	2,55E+07	1,64E+07	5,25E+10	2,20E+10	1,62E+10	1,23E+10
1,20E+08	4,82E+07	2,45E+07	1,55E+07	5,51E+10	2,26E+10	1,64E+10	1,24E+10

Tabela 30 – Resistência plástica à compressão axial dos banzos - EN1994-1-2.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	$N_{fi,pl,rd,f}$ [N]			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	2815200	610898	254541		
HEB 260	15,38	3139500	733677	303083		
HEB 280	14,29	3477600	901195	353970		

HEB 300	13,33	3933000	1105960	418209	261545	187211
HEB 340	12,55	4450500	1332323	490393	306692	215090
HEB 450	11,11	5382000	1790412	681720	394680	267306
HEB 500	10,67	5796000	1987796	763681	432961	290264
HEB 600	10,00	6210000	2225664	865674	476618	314847
HEB 700	9,52	6624000	2447095	959534	518091	338770
HEB 900	8,89	7245000	2783046	1102206	580808	374808
HD 260x54,1	15,89	1753700	396345	165076		
HD 260x142	14,74	4845525	1204543	482662		
HD 260x225	13,85	7625940	2052709	791984		
HD 320x127	12,92	4243500	1234222	459668	287630	203635
HD 320x300	11,72	10066080	3205974	1204438	719236	494219
HD 400x237	10,33	8231010	2887763	1116610	623467	414813
HD 400x382	9,73	13056960	4760113	1859972	1012810	665220
HD 400x551	9,18	18366920	6931389	2732885	1455957	945204
HD 400x818	8,47	26705070	10518802	4191629	2175443	1392003
HD 400x1299	7,54	39317600	16336033	6591546	3315647	2083535
UC 254x254x73	15,73	2566877	584962	243613		
UC 254x254x132	14,89	4561514	1117975	451079		
UC 305x305x97	13,05	3338150	960860	359528	224931	159786
UC 305x305x137	12,71	4629652	1368848	506098	316766	223061
UC 305x305x198	12,24	6813957	2088091	774684	475966	331251
UC 356x368x129	11,05	4450845	1486923	566879	327228	221311
UC 356x368x177	10,80	6118837	2079690	796902	454578	305675
UC 356x406x340	9,88	11583429	4182610	1630123	893159	588529
UC 356x406x744	8,65	24195024	9430391	3748302	1957728	1257161
UC 356x406x1086	7,92	33482500	13612899	5465490	2783913	1762324

Tabela 31 – Rigidez à flexão do banzo - EN1994-1-2.

Perfis	$\frac{Am}{V}$ [m ⁻¹]	20 °C	$(EI)_{fl,z}$ [Nm ²]			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	8225280	1033644	667790		
HEB 260	15,38	10765300	1429301	903664		
HEB 280	14,29	13829760	2100148	1193558		
HEB 300	13,33	17955000	3023622	1586324	1264481	961490
HEB 340	12,55	20317500	3698263	1829850	1452910	1104674
HEB 450	11,11	24570000	5085990	2347800	1805895	1372849
HEB 500	10,67	26460000	5681491	2573323	1961083	1490756
HEB 600	10,00	28350000	6415605	2829330	2127313	1617013
HEB 700	9,52	30240000	7093440	3072960	2289060	1739880
HEB 900	8,89	33075000	8123220	3441270	2532718	1924965
HD 260x54,1	15,89	5844020	751940	484226		
HD 260x142	14,74	17260427	2484494	1472735		
HD 260x225	13,85	29256691	4662959	2552187		
HD 320x127	12,92	19372500	3402537	1728905	1375478	1045843
HD 320x300	11,72	51516019	10116179	4802206	3742801	2845472
HD 400x237	10,33	65142778	14372424	6420014	4858725	3693332
HD 400x382	9,73	112431339	25963081	11334977	8477981	6444116
HD 400x551	9,18	172799939	41565004	17786519	13162477	10004273
HD 400x818	8,47	283324473	71657259	29934179	21860695	16614334
HD 400x1299	7,54	528465862	142219045	57717058	41457314	31505281
UC 254x254x73	15,73	8202223	1060516	682490		
UC 254x254x132	14,89	15798170	2232542	1342839		
UC 305x305x97	13,05	15338016	2659327	1364565	1086266	825953
UC 305x305x137	12,71	22451545	4024493	2013735	1600560	1216956
UC 305x305x198	12,24	34186894	6404314	3118880	2459173	1869694
UC 356x368x129	11,05	30674118	6381979	2938216	2257132	1715870
UC 356x368x177	10,80	43089708	9152788	4168750	3185672	2421685
UC 356x406x340	9,88	98274417	22437449	9851320	7390036	5617250

UC 356x406x744	8,65	250854009	62669426	26333011	19293563	14663531
UC 356x406x1086	7,92	409397905	107436530	44110471	31898397	24241868

A.2 - Alma

Tabela 32 – Redução geométrica da alma - EN1994-1-2.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	$h_{w,fi}$ [mm]			
		R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	12,81	31,15		
HEB 260	15,38	12,85	30,90		
HEB 280	14,29	12,88	30,70		
HEB 300	13,33	12,86	30,43	46,78	55,37
HEB 340	12,55	12,78	29,92	45,36	53,21
HEB 450	11,11	12,79	29,41	43,72	50,67
HEB 500	10,67	12,80	29,28	43,29	50,04
HEB 600	10,00	12,91	29,31	43,03	49,55
HEB 700	9,52	12,99	29,34	42,87	49,24
HEB 900	8,89	13,12	29,45	42,78	49,00
HD 260x54,1	15,89	13,75	33,34		
HD 260x142	14,74	11,97	28,55		
HD 260x225	13,85	10,70	25,26		
HD 320x127	12,92	12,79	30,10	45,92	54,07
HD 320x300	11,72	10,84	25,19	37,88	44,20
HD 400x237	10,33	12,24	28,43	42,72	49,82
HD 400x382	9,73	11,16	25,77	38,47	44,71
HD 400x551	9,18	10,16	23,35	34,69	40,19
HD 400x818	8,47	8,97	20,49	30,25	34,94
HD 400x1299	7,54	7,65	17,37	25,50	29,36
UC 254x254x73	15,73	13,21	31,85		
UC 254x254x132	14,89	12,08	28,85		
UC 305x305x97	13,05	13,23	31,24	47,87	56,53
UC 305x305x137	12,71	12,68	29,84	45,52	53,60
UC 305x305x198	12,24	11,93	27,92	42,34	49,66
UC 356x368x129	11,05	13,16	30,71	46,38	54,26
UC 356x368x177	10,80	12,69	29,54	44,48	51,96
UC 356x406x340	9,88	11,45	26,49	39,60	46,06
UC 356x406x744	8,65	9,27	21,21	31,36	36,25
UC 356x406x1086	7,92	8,05	18,32	26,94	31,05

Tabela 33 – Tensão de escoamento da alma reduzida - EN1994-1-2.

$f_{av,w,t}$ [Pa]			
R30	R60	R90	R120
3,02E+08	2,41E+08		
3,06E+08	2,50E+08		
3,09E+08	2,58E+08		
3,11E+08	2,65E+08	2,22E+08	1,99E+08
3,15E+08	2,75E+08	2,40E+08	2,21E+08
3,23E+08	2,94E+08	2,69E+08	2,57E+08
3,25E+08	2,99E+08	2,78E+08	2,67E+08
3,29E+08	3,08E+08	2,90E+08	2,82E+08
3,31E+08	3,13E+08	2,98E+08	2,92E+08
3,34E+08	3,21E+08	3,09E+08	3,04E+08
3,12E+08	2,50E+08		
3,08E+08	2,57E+08		
3,03E+08	2,60E+08		
3,13E+08	2,71E+08	2,31E+08	2,11E+08

3,09E+08	2,75E+08	2,44E+08	2,29E+08
3,19E+08	2,84E+08	2,53E+08	2,37E+08
3,12E+08	2,81E+08	2,54E+08	2,41E+08
3,04E+08	2,78E+08	2,54E+08	2,43E+08
2,97E+08	2,75E+08	2,55E+08	2,46E+08
2,81E+08	2,63E+08	2,48E+08	2,41E+08
3,13E+08	2,55E+08		
3,08E+08	2,57E+08		
3,21E+08	2,75E+08	2,32E+08	2,10E+08
3,13E+08	2,71E+08	2,32E+08	2,12E+08
3,15E+08	2,75E+08	2,40E+08	2,21E+08
3,17E+08	2,79E+08	2,45E+08	2,28E+08
3,18E+08	2,81E+08	2,49E+08	2,33E+08
3,11E+08	2,80E+08	2,52E+08	2,39E+08
2,97E+08	2,73E+08	2,53E+08	2,44E+08
2,80E+08	2,61E+08	2,45E+08	2,38E+08

Tabela 34 – Resistência plástica à compressão axial da alma - EN1994-1-2.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	$N_{fi,pl,Rd,w}$ [N]			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	710700	544870	345874		
HEB 260	15,38	776250	609058	408427		
HEB 280	14,29	883890	707112	494978		
HEB 300	13,33	994290	808689	585968	410973	331430
HEB 340	12,55	1229580	1027061	784038	593092	506298
HEB 450	11,11	1922340	1683115	1396046	1170491	1067967
HEB 500	10,67	2221110	1972346	1673828	1439279	1332666
HEB 600	10,00	2887650	2618136	2294719	2040606	1925100
HEB 700	9,52	3730140	3431729	3073635	2792276	2664386
HEB 900	8,89	5297475	4967854	4572310	4261524	4120258
HD 260x54,1	15,89	519188	400030	257040		
HD 260x142	14,74	1203188	960819	669976		
HD 260x225	13,85	1809000	1481155	1087742		
HD 320x127	12,92	1106933	913219	680763	498120	415100
HD 320x300	11,72	2523555	2146704	1694483	1339167	1177659
HD 400x237	10,33	2083952	1776843	1408313	1118753	987135
HD 400x382	9,73	3194560	2764523	2248479	1843015	1658714
HD 400x551	9,18	4365270	3828006	3183289	2676726	2446470
HD 400x818	8,47	6098400	5433983	4636682	4010232	3725482
HD 400x1299	7,54	9440000	8558933	7501653	6670933	6293333
UC 254x254x73	15,73	689062	537203	354971		
UC 254x254x132	14,89	1191357	949895	660141		
UC 305x305x97	13,05	973868	796744	584194	417191	341281
UC 305x305x137	12,71	1319273	1088760	812145	594805	496014
UC 305x305x198	12,24	1825950	1525117	1164117	880474	751546
UC 356x368x129	11,05	1150313	969161	751779	580979	503343
UC 356x368x177	10,80	1592741	1350499	1059809	831409	727591
UC 356x406x340	9,88	2856867	2463204	1990809	1619641	1450928
UC 356x406x744	8,65	5607983	4977366	4220626	3626045	3355781
UC 356x406x1086	7,92	7340190	6617781	5750891	5069762	4760158

Tabela 35 – Rigidez à flexão da alma - EN1994-1-2.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	$(EI)_{fi,w,z}$ [Nm ²]			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	3605	3157	2515		
HEB 260	15,38	3938	3488	2856		
HEB 280	14,29	4943	4421	3699		
HEB 300	13,33	6103	5504	4685	3923	3523

HEB 340	12,55	8981	8208	7172	6238	5763
HEB 450	11,11	19112	17883	16287	14913	14245
HEB 500	10,67	23688	22322	20563	19068	18349
HEB 600	10,00	35191	33508	31370	29582	28733
HEB 700	9,52	54682	52449	49637	47311	46214
HEB 900	8,89	91967	89060	85441	82486	81107
HD 260x54,1	15,89	1081	949	761		
HD 260x142	14,74	14663	13103	10942		
HD 260x225	13,85	54432	49253	42208		
HD 320x127	12,92	7426	6745	5823	4981	4547
HD 320x300	11,72	96102	88637	78749	70007	65650
HD 400x237	10,33	37760	34867	31041	27666	25988
HD 400x382	9,73	148196	137861	124330	112563	106787
HD 400x551	9,18	414633	388280	354076	324684	310405
HD 400x818	8,47	1240093	1170591	1081309	1005613	969254
HD 400x1299	7,54	5600000	5332267	4992068	4707554	4572381
UC 254x254x73	15,73	2512	2218	1803		
UC 254x254x132	14,89	14146	12632	10530		
UC 305x305x97	13,05	4705	4256	3644	3080	2785
UC 305x305x137	12,71	12744	11577	9999	8557	7814
UC 305x305x198	12,24	33789	30880	26979	23463	21677
UC 356x368x129	11,05	6311	5793	5102	4485	4175
UC 356x368x177	10,80	16753	15426	13666	12104	11323
UC 356x406x340	9,88	105596	98051	88149	79508	75253
UC 356x406x744	8,65	963127	907361	835543	774456	745036
UC 356x406x1086	7,92	2649187	2515447	2344911	2201672	2133387

A.3 - Concreto

Tabela 36 – Temperatura média do concreto - EN1994-1-2.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	$\theta_{c,t}$ [°C]			
		R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	245,33	363,89		
HEB 260	15,38	234,27	353,21		
HEB 280	14,29	224,78	344,05		
HEB 300	13,33	216,56	336,11	403,33	461,90
HEB 340	12,55	209,79	329,58	393,56	450,70
HEB 450	11,11	197,38	317,59	373,02	430,16
HEB 500	10,67	193,54	313,89	366,67	423,81
HEB 600	10,00	187,79	308,33	357,14	414,29
HEB 700	9,52	183,68	304,37	350,34	407,48
HEB 900	8,89	178,20	298,09	341,27	397,22
HD 260x54,1	15,89	238,62	357,41		
HD 260x142	14,74	228,72	347,85		
HD 260x225	13,85	221,04	340,44		
HD 320x127	12,92	212,96	332,64	398,81	455,95
HD 320x300	11,72	202,66	322,69	381,76	438,90
HD 400x237	10,33	190,61	311,05	361,81	418,95
HD 400x382	9,73	185,49	306,12	353,34	410,48
HD 400x551	9,18	180,71	301,50	345,43	402,58
HD 400x818	8,47	174,56	290,84	335,25	386,69
HD 400x1299	7,54	166,51	274,80	321,93	363,38
UC 254x254x73	15,73	237,22	356,05		
UC 254x254x132	14,89	230,02	349,10		
UC 305x305x97	13,05	214,09	333,72	400,47	457,81
UC 305x305x137	12,71	211,17	330,90	395,84	452,98
UC 305x305x198	12,24	207,15	327,03	389,19	446,33
UC 356x368x129	11,05	196,85	317,09	372,15	429,29

Bruno Alfredo

UC 356x368x177	10,80	194,69	315,00	368,56	425,71
UC 356x406x340	9,88	186,79	307,37	355,49	412,63
UC 356x406x744	8,65	176,10	293,91	337,80	391,14
UC 356x406x1086	7,92	169,84	281,43	327,43	373,01

Tabela 37 – Redução do concreto para as duas direções - EN1994-1-2.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	$b_{c,fi}$ [mm]			
		R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	4,00	15,00		
HEB 260	15,38	4,00	15,00		
HEB 280	14,29	4,00	15,00		
HEB 300	13,33	4,00	15,00	29,17	50,67
HEB 340	12,55	4,00	15,00	28,77	49,10
HEB 450	11,11	4,00	15,00	28,06	46,22
HEB 500	10,67	4,00	15,00	27,83	45,33
HEB 600	10,00	4,00	15,00	27,50	44,00
HEB 700	9,52	4,00	15,00	27,26	43,05
HEB 900	8,89	4,00	15,00	26,94	41,78
HD 260x54,1	15,89	4,00	15,00		
HD 260x142	14,74	4,00	15,00		
HD 260x225	13,85	4,00	15,00		
HD 320x127	12,92	4,00	15,00	28,96	49,83
HD 320x300	11,72	4,00	15,00	28,36	47,45
HD 400x237	10,33	4,00	15,00	27,66	44,65
HD 400x382	9,73	4,00	15,00	27,37	43,47
HD 400x551	9,18	4,00	15,00	27,09	42,36
HD 400x818	8,47	4,00	15,00	26,73	40,94
HD 400x1299	7,54	4,00	15,00	26,27	39,07
UC 254x254x73	15,73	4,00	15,00		
UC 254x254x132	14,89	4,00	15,00		
UC 305x305x97	13,05	4,00	15,00	29,02	50,09
UC 305x305x137	12,71	4,00	15,00	28,85	49,42
UC 305x305x198	12,24	4,00	15,00	28,62	48,49
UC 356x368x129	11,05	4,00	15,00	28,03	46,10
UC 356x368x177	10,80	4,00	15,00	27,90	45,60
UC 356x406x340	9,88	4,00	15,00	27,44	43,77
UC 356x406x744	8,65	4,00	15,00	26,82	41,29
UC 356x406x1086	7,92	4,00	15,00	26,46	39,84

Tabela 38 – Fatores de redução da resistência e elasticidade do concreto - EN1994-1-2.

k_c				$\varepsilon_{cu,\theta}$			
R30	R60	R90	R120	R30	R60	R90	R120
0,9047	0,7861			0,0062	0,0089		
0,9157	0,7968			0,0060	0,0086		
0,9252	0,8060			0,0059	0,0083		
0,9334	0,8139	0,7450	0,6571	0,0057	0,0081	0,0102	0,0131
0,9402	0,8204	0,7564	0,6739	0,0056	0,0079	0,0098	0,0125
0,9513	0,8324	0,7770	0,7048	0,0055	0,0075	0,0092	0,0115
0,9532	0,8361	0,7833	0,7143	0,0054	0,0074	0,0090	0,0112
0,9561	0,8417	0,7929	0,7286	0,0053	0,0073	0,0087	0,0107
0,9582	0,8456	0,7997	0,7388	0,0053	0,0071	0,0085	0,0104
0,9609	0,8519	0,8087	0,7528	0,0052	0,0070	0,0082	0,0099
0,9114	0,7926			0,0061	0,0087		
0,9213	0,8022			0,0059	0,0084		
0,9290	0,8096			0,0058	0,0082		
0,9370	0,8174	0,7512	0,6661	0,0057	0,0080	0,0100	0,0128
0,9473	0,8273	0,7682	0,6916	0,0055	0,0077	0,0095	0,0119
0,9547	0,8389	0,7882	0,7216	0,0054	0,0073	0,0089	0,0109

0,9573	0,8439	0,7967	0,7343	0,0053	0,0072	0,0086	0,0105
0,9596	0,8485	0,8046	0,7461	0,0052	0,0070	0,0084	0,0101
0,9627	0,8592	0,8147	0,7633	0,0051	0,0069	0,0081	0,0096
0,9667	0,8752	0,8281	0,7866	0,0050	0,0066	0,0077	0,0089
0,9128	0,7939			0,0061	0,0087		
0,9200	0,8009			0,0060	0,0085		
0,9359	0,8163	0,7493	0,6633	0,0057	0,0080	0,0100	0,0129
0,9388	0,8191	0,7542	0,6705	0,0057	0,0079	0,0099	0,0126
0,9428	0,8230	0,7608	0,6805	0,0056	0,0078	0,0097	0,0123
0,9516	0,8329	0,7779	0,7061	0,0055	0,0075	0,0092	0,0115
0,9527	0,8350	0,7814	0,7114	0,0054	0,0074	0,0091	0,0113
0,9566	0,8426	0,7945	0,7311	0,0053	0,0072	0,0087	0,0106
0,9620	0,8561	0,8122	0,7589	0,0051	0,0069	0,0081	0,0097
0,9651	0,8686	0,8226	0,7770	0,0050	0,0067	0,0078	0,0092

Tabela 39 – Módulo de elasticidade secante à elevadas temperaturas - EN1994-1-2.

$E_{c,sec,\theta}$ [Pa]			
R30	R60	R90	R120
2,93E+09	1,76E+09		
3,05E+09	1,85E+09		
3,15E+09	1,94E+09		
3,25E+09	2,01E+09	1,47E+09	1,00E+09
3,33E+09	2,08E+09	1,54E+09	1,08E+09
3,48E+09	2,21E+09	1,69E+09	1,22E+09
3,53E+09	2,25E+09	1,74E+09	1,28E+09
3,60E+09	2,32E+09	1,82E+09	1,36E+09
3,65E+09	2,37E+09	1,88E+09	1,42E+09
3,72E+09	2,44E+09	1,96E+09	1,52E+09
3,00E+09	1,82E+09		
3,11E+09	1,90E+09		
3,19E+09	1,97E+09		
3,29E+09	2,05E+09	1,51E+09	1,04E+09
3,42E+09	2,15E+09	1,63E+09	1,16E+09
3,56E+09	2,29E+09	1,78E+09	1,32E+09
3,62E+09	2,35E+09	1,85E+09	1,40E+09
3,68E+09	2,41E+09	1,92E+09	1,47E+09
3,76E+09	2,50E+09	2,02E+09	1,59E+09
3,87E+09	2,64E+09	2,16E+09	1,77E+09
3,01E+09	1,83E+09		
3,09E+09	1,89E+09		
3,28E+09	2,04E+09	1,50E+09	1,03E+09
3,31E+09	2,07E+09	1,53E+09	1,06E+09
3,36E+09	2,11E+09	1,57E+09	1,11E+09
3,49E+09	2,22E+09	1,70E+09	1,23E+09
3,52E+09	2,24E+09	1,73E+09	1,26E+09
3,61E+09	2,33E+09	1,83E+09	1,38E+09
3,74E+09	2,48E+09	2,00E+09	1,56E+09
3,82E+09	2,58E+09	2,10E+09	1,69E+09

Tabela 40 – Resistência plástica à compressão axial do concreto - EN1994-1-2.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	$N_{fi,pl,Rd,c}$ [N]			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	793319	664411	458950		
HEB 260	15,38	933726	796199	561028		
HEB 280	14,29	1097264	950853	683268		
HEB 300	13,33	1268576	1114394	813677	576829	318607
HEB 340	12,55	1415890	1256584	926678	676106	400118
HEB 450	11,11	1902513	1721391	1302758	1007383	677920

HEB 500	10,67	2124977	1930953	1474930	1159180	806242
HEB 600	10,00	2587107	2366128	1832430	1474048	1072705
HEB 700	9,52	3040465	2793144	2183210	1783042	1335017
HEB 900	8,89	3932240	3632587	2874506	2387333	1848012
HD 260x54,1	15,89	947271	804319	567373		
HD 260x142	14,74	931791	799307	563457		
HD 260x225	13,85	922116	797295	561872		
HD 320x127	12,92	1350680	1193495	877298	633291	365466
HD 320x300	11,72	1338683	1195577	879116	647465	395205
HD 400x237	10,33	2012138	1830640	1399896	1105638	779793
HD 400x382	9,73	2015276	1838483	1410568	1124395	810825
HD 400x551	9,18	2012882	1840826	1416421	1138427	837475
HD 400x818	8,47	2016927	1850527	1437378	1161476	878887
HD 400x1299	7,54	2014175	1855670	1462035	1186410	931179
UC 254x254x73	15,73	921208	782623	550436		
UC 254x254x132	14,89	921208	788794	555253		
UC 305x305x97	13,05	1374138	1213378	893179	644780	371604
UC 305x305x137	12,71	1374138	1217160	896261	650966	381485
UC 305x305x198	12,24	1374138	1222365	900502	659487	395360
UC 356x368x129	11,05	1919900	1739093	1320270	1026401	698751
UC 356x368x177	10,80	1919900	1741070	1323581	1033038	710147
UC 356x406x340	9,88	2020261	1841901	1412328	1123522	806091
UC 356x406x744	8,65	2017671	1849753	1432850	1156915	869277
UC 356x406x1086	7,92	2007708	1846371	1445797	1170736	904737

Tabela 41 – Rigidez à flexão do concreto - EN1994-1-2.

Perfis	$\frac{Am}{V}$ [m ⁻¹]	20 °C	$(EI)_{fl.c.z}$ [Nm ²]			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	1848847	585055	228559		
HEB 260	15,38	2535105	842725	343061		
HEB 280	14,29	3442822	1196792	508756		
HEB 300	13,33	4558074	1647358	726561	322150	85564
HEB 340	12,55	5086651	1888742	843662	388722	111563
HEB 450	11,11	6904266	2706148	1263138	643975	239120
HEB 500	10,67	7732091	3077154	1457838	765156	303358
HEB 600	10,00	9459653	3852695	1866743	1022376	443872
HEB 700	9,52	11186911	4632242	2280105	1285729	592357
HEB 900	8,89	14530351	6145656	3081959	1792486	879931
HD 260x54,1	15,89	2535214	829747	336339		
HD 260x142	14,74	2683359	911693	375412		
HD 260x225	13,85	2867860	1004029	419519		
HD 320x127	12,92	4864024	1785429	796302	364334	104530
HD 320x300	11,72	5521121	2113429	964119	469853	158115
HD 400x237	10,33	12568269	5111585	2524698	1411398	630000
HD 400x382	9,73	13667250	5664700	2839366	1634042	774220
HD 400x551	9,18	14902911	6288717	3197167	1890978	946168
HD 400x818	8,47	17023814	7356086	3836905	2339014	1260681
HD 400x1299	7,54	21883447	9769305	5302199	3365851	2006518
UC 254x254x73	15,73	2388653	784177	316338		
UC 254x254x132	14,89	2581146	871771	357104		
UC 305x305x97	13,05	5090543	1863166	833146	381472	109542
UC 305x305x137	12,71	5287931	1958495	881493	411180	123725
UC 305x305x198	12,24	5563968	2094670	951150	454707	145567
UC 356x368x129	11,05	10237733	4059866	1955400	1043748	423295
UC 356x368x177	10,80	10575671	4227007	2048365	1107102	461409
UC 356x406x340	9,88	13392656	5524477	2759127	1576581	736221
UC 356x406x744	8,65	16462501	7071443	3663135	2217622	1173251
UC 356x406x1086	7,92	18991788	8358945	4453938	2774020	1581897

A.4 - Reforços

Tabela 42 – Fatores de redução para a tensão de escoamento e módulo de elasticidade do aço de reforço e momento de segunda ordem para os reforços- EN1994-1-2.

u [mm]	$k_{v,t}$				$k_{E,t}$				$I_{s,z}$
	R30	R60	R90	R120	R30	R60	R90	R120	
50,0	1,0000	0,9760			0,8880	0,6890			6,19E-06
50,0	1,0000	0,9760			0,8880	0,6890			1,26E-05
50,0	1,0000	0,9760			0,8880	0,6890			1,60E-05
50,0	1,0000	0,9760	0,5720	0,2880	0,8880	0,6890	0,4060	0,1730	1,97E-05
50,0	1,0000	0,9760	0,5720	0,2880	0,8880	0,6890	0,4060	0,1730	3,24E-05
50,0	1,0000	0,9760	0,5720	0,2880	0,8880	0,6890	0,4060	0,1730	3,24E-05
50,0	1,0000	0,9760	0,5720	0,2880	0,8880	0,6890	0,4060	0,1730	3,24E-05
50,0	1,0000	0,9760	0,5720	0,2880	0,8880	0,6890	0,4060	0,1730	3,24E-05
50,0	1,0000	0,9760	0,5720	0,2880	0,8880	0,6890	0,4060	0,1730	3,24E-05
50,0	1,0000	0,9760	0,5720	0,2880	0,8880	0,6890	0,4060	0,1730	5,08E-05
50,0	1,0000	0,9760			0,8880	0,6890			1,26E-05
50,0	1,0000	0,9760			0,8880	0,6890			1,34E-05
50,0	1,0000	0,9760			0,8880	0,6890			1,44E-05
50,0	1,0000	0,9760	0,5720	0,2880	0,8880	0,6890	0,4060	0,1730	1,97E-05
50,0	1,0000	0,9760	0,5720	0,2880	0,8880	0,6890	0,4060	0,1730	2,23E-05
50,0	1,0000	0,9760	0,5720	0,2880	0,8880	0,6890	0,4060	0,1730	7,02E-05
50,0	1,0000	0,9760	0,5720	0,2880	0,8880	0,6890	0,4060	0,1730	7,55E-05
50,0	1,0000	0,9760	0,5720	0,2880	0,8880	0,6890	0,4060	0,1730	8,15E-05
50,0	1,0000	0,9760	0,5720	0,2880	0,8880	0,6890	0,4060	0,1730	9,15E-05
50,0	1,0000	0,9760	0,5720	0,2880	0,8880	0,6890	0,4060	0,1730	1,14E-04
50,0	1,0000	0,9760			0,8880	0,6890			1,18E-05
50,0	1,0000	0,9760			0,8880	0,6890			1,28E-05
50,0	1,0000	0,9760	0,5720	0,2880	0,8880	0,6890	0,4060	0,1730	2,08E-05
50,0	1,0000	0,9760	0,5720	0,2880	0,8880	0,6890	0,4060	0,1730	2,16E-05
50,0	1,0000	0,9760	0,5720	0,2880	0,8880	0,6890	0,4060	0,1730	2,27E-05
50,0	1,0000	0,9760	0,5720	0,2880	0,8880	0,6890	0,4060	0,1730	5,82E-05
50,0	1,0000	0,9760	0,5720	0,2880	0,8880	0,6890	0,4060	0,1730	6,00E-05
50,0	1,0000	0,9760	0,5720	0,2880	0,8880	0,6890	0,4060	0,1730	7,40E-05
50,0	1,0000	0,9760	0,5720	0,2880	0,8880	0,6890	0,4060	0,1730	8,89E-05
50,0	1,0000	0,9760	0,5720	0,2880	0,8880	0,6890	0,4060	0,1730	1,01E-04

Tabela 43 – Resistência plástica à compressão axial do reforço - EN1994-1-2.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	$N_{fi,pl,Rd,s}$ [N]			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	628400	628400	613318		
HEB 260	15,38	981800	981800	958237		
HEB 280	14,29	981800	981800	958237		
HEB 300	13,33	981800	981800	958237	561590	282758
HEB 340	12,55	1608400	1608400	1569798	920005	463219
HEB 450	11,11	1608400	1608400	1569798	920005	463219
HEB 500	10,67	1608400	1608400	1569798	920005	463219
HEB 600	10,00	1608400	1608400	1569798	920005	463219
HEB 700	9,52	1608400	1608400	1569798	920005	463219
HEB 900	8,89	2513200	2513200	2452883	1437550	723802
HD 260x54,1	15,89	981800	981800	958237		
HD 260x142	14,74	981800	981800	958237		
HD 260x225	13,85	981800	981800	958237		
HD 320x127	12,92	981800	981800	958237	561590	282758
HD 320x300	11,72	981800	981800	958237	561590	282758
HD 400x237	10,33	1608400	1608400	1569798	920005	463219
HD 400x382	9,73	1608400	1608400	1569798	920005	463219

HD 400x551	9,18	1608400	1608400	1569798	920005	463219
HD 400x818	8,47	1608400	1608400	1569798	920005	463219
HD 400x1299	7,54	1608400	1608400	1569798	920005	463219
UC 254x254x73	15,73	981800	981800	958237		
UC 254x254x132	14,89	981800	981800	958237		
UC 305x305x97	13,05	981800	981800	958237	561590	282758
UC 305x305x137	12,71	981800	981800	958237	561590	282758
UC 305x305x198	12,24	981800	981800	958237	561590	282758
UC 356x368x129	11,05	1608400	1608400	1569798	920005	463219
UC 356x368x177	10,80	1608400	1608400	1569798	920005	463219
UC 356x406x340	9,88	1608400	1608400	1569798	920005	463219
UC 356x406x744	8,65	1608400	1608400	1569798	920005	463219
UC 356x406x1086	7,92	1608400	1608400	1569798	920005	463219

Tabela 44 – Rigidez à flexão do reforço - EN1994-1-2.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	$(EI)_{fl.s.z}$ [Nm ²]			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	1299677	1154113	895477		
HEB 260	15,38	2655045	2357680	1829326		
HEB 280	14,29	3356012	2980139	2312293		
HEB 300	13,33	4139447	3675829	2852079	1680616	716124
HEB 340	12,55	6798917	6037438	4684454	2760360	1176213
HEB 450	11,11	6798917	6037438	4684454	2760360	1176213
HEB 500	10,67	6798917	6037438	4684454	2760360	1176213
HEB 600	10,00	6798917	6037438	4684454	2760360	1176213
HEB 700	9,52	6798917	6037438	4684454	2760360	1176213
HEB 900	8,89	10661309	9467242	7345642	4328491	1844406
HD 260x54,1	15,89	2655045	2357680	1829326		
HD 260x142	14,74	2822555	2506429	1944741		
HD 260x225	13,85	3030372	2690970	2087926		
HD 320x127	12,92	4139447	3675829	2852079	1680616	716124
HD 320x300	11,72	4692903	4167297	3233410	1905318	811872
HD 400x237	10,33	14741064	13090065	10156593	5984872	2550204
HD 400x382	9,73	15857610	14081557	10925893	6438190	2743366
HD 400x551	9,18	17122273	15204579	11797246	6951643	2962153
HD 400x818	8,47	19224134	17071031	13245429	7804999	3325775
HD 400x1299	7,54	23920515	21241417	16481235	9711729	4138249
UC 254x254x73	15,73	2479922	2202171	1708666		
UC 254x254x132	14,89	2698102	2395914	1858992		
UC 305x305x97	13,05	4360880	3872461	3004646	1770517	754432
UC 305x305x137	12,71	4527519	4020437	3119461	1838173	783261
UC 305x305x198	12,24	4759005	4225996	3278954	1932156	823308
UC 356x368x129	11,05	12228113	10858565	8425170	4964614	2115464
UC 356x368x177	10,80	12593731	11183233	8677081	5113055	2178715
UC 356x406x340	9,88	15549044	13807551	10713291	6312912	2689985
UC 356x406x744	8,65	18659190	16569361	12856182	7575631	3228040
UC 356x406x1086	7,92	21208109	18832801	14612387	8610492	3669003

A.5 - Soma Ponderada

Tabela 45 – Resistência plástica à compressão axial da seção transversal - EN1994-1-2.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	$N_{fl.pl.Rd}$ [N]			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	4947619	2448579	1672683		
HEB 260	15,38	5831276	3120734	2230774		
HEB 280	14,29	6440554	3540960	2490454		

HEB 300	13,33	7177666	4010843	2776091	1810936	1120006
HEB 340	12,55	8704370	5224368	3770907	2495894	1584725
HEB 450	11,11	10815253	6803318	4950323	3492560	2476412
HEB 500	10,67	11750487	7499495	5482237	3951425	2892390
HEB 600	10,00	13293157	8818328	6562622	4911277	3775872
HEB 700	9,52	15003005	10280368	7786178	6013415	4801392
HEB 900	8,89	18987915	13896687	11001905	8667215	7066880
HD 260x54,1	15,89	4201959	2582494	1947725		
HD 260x142	14,74	7962304	3946469	2674332		
HD 260x225	13,85	11338856	5312960	3399835		
HD 320x127	12,92	7682912	4322736	2975967	1980630	1266959
HD 320x300	11,72	14910118	7530055	4736274	3267457	2349842
HD 400x237	10,33	13935500	8103646	5494617	3767863	2644961
HD 400x382	9,73	19875196	10971519	7088817	4900224	3597978
HD 400x551	9,18	26353472	14208621	8902394	6191114	4692369
HD 400x818	8,47	36428797	19411712	11835488	8267155	6459590
HD 400x1299	7,54	52380175	28359037	17125032	12092994	9771267
UC 254x254x73	15,73	5158947	2886587	2107258		
UC 254x254x132	14,89	7655879	3838464	2624710		
UC 305x305x97	13,05	6667956	3952781	2795138	1848491	1155430
UC 305x305x137	12,71	8304863	4656569	3172741	2124126	1383319
UC 305x305x198	12,24	10995845	5817374	3797541	2577517	1760916
UC 356x368x129	11,05	9129458	5803577	4208726	2854614	1886623
UC 356x368x177	10,80	11239878	6779659	4750090	3239029	2206633
UC 356x406x340	9,88	18068957	10096115	6603058	4556326	3308768
UC 356x406x744	8,65	33429078	17865911	10971576	7660693	5945438
UC 356x406x1086	7,92	44438798	23685451	14231976	9944416	7890439

Tabela 46 – Rigidez efetiva à flexão da seção transversal - EN1994-1-2.

Perfis	$\frac{Am}{V}$ [m ⁻¹]	20 °C	$(EI)_{f,eff,z}$ [Nm ²]			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	10637870	2658957	1592303		
HEB 260	15,38	14945345	4464648	2736996		
HEB 280	14,29	19256409	6042142	3565969		
HEB 300	13,33	24835394	8022841	4580496	2617721	1749589
HEB 340	12,55	30177389	11254904	6544975	3687832	2375901
HEB 450	11,11	35530588	13306230	7355826	4183098	2754603
HEB 500	10,67	37921860	14202975	7718833	4408348	2928004
HEB 600	10,00	40859900	15568708	8287171	4757622	3177057
HEB 700	9,52	43805745	16889121	8855394	5115430	3436193
HEB 900	8,89	52546487	22596047	12259229	7005442	4554423
HD 260x54,1	15,89	10021275	3774367	2352029		
HD 260x142	14,74	21707661	5733380	3387000		
HD 260x225	13,85	34062211	8206406	4553926		
HD 320x127	12,92	26437787	8513454	4765750	2741323	1850138
HD 320x300	11,72	59617696	16062857	8082098	4964385	3849486
HD 400x237	10,33	87462564	31586624	16969746	9831663	6773524
HD 400x382	9,73	136637495	44714260	22430605	13352733	9913645
HD 400x551	9,18	199278592	62188836	29537198	17928762	14033766
HD 400x818	8,47	314002988	95783751	43012480	26609379	21917907
HD 400x1299	7,54	571116445	176608173	76012291	48335470	41821125
UC 254x254x73	15,73	12117849	3892247	2406915		
UC 254x254x132	14,89	20059106	5338504	3177861		
UC 305x305x97	13,05	22757927	8026577	4602451	2593684	1670804
UC 305x305x137	12,71	30164567	9623304	5335070	3088488	2107011
UC 305x305x198	12,24	42318068	12336926	6545949	3900292	2831133
UC 356x368x129	11,05	49051182	20494230	11796469	6616880	4174145
UC 356x368x177	10,80	62045595	23733052	13213606	7536767	4980850
UC 356x406x340	9,88	121964650	40762633	20803600	12303131	8971465

UC 356x406x744	8,65	280353827	85803304	39036325	24043910	19575208
UC 356x406x1086	7,92	444650273	135471933	58758634	36828000	31309776

A.6 - Resistência Crítica

Tabela 47 – Resistência crítica à flambagem para $L_{\theta} = 3,0$ m.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	$N_{fl,cr,z}$ [N]			
			Comprimento de Flambagem 3 m			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	11665730	2915873	1746155		
HEB 260	15,38	16389405	4896034	3001452		
HEB 280	14,29	21117015	6625950	3910522		
HEB 300	13,33	27235058	8798030	5023076	2870652	1918639
HEB 340	12,55	33093211	12342383	7177368	4044161	2605467
HEB 450	11,11	38963650	14591914	8066566	4587280	3020760
HEB 500	10,67	41585973	15575305	8464648	4834294	3210916
HEB 600	10,00	44807894	17072999	9087900	5217316	3484033
HEB 700	9,52	48038375	18520994	9711026	5609697	3768207
HEB 900	8,89	57623671	24779338	13443748	7682327	4994484
HD 260x54,1	15,89	10989557	4139056	2579289		
HD 260x142	14,74	23805114	6287355	3714261		
HD 260x225	13,85	37353394	8999331	4993938		
HD 320x127	12,92	28992278	9336048	5226230	3006198	2028904
HD 320x300	11,72	65378120	17614894	8863012	5444058	4221434
HD 400x237	10,33	95913434	34638609	18609409	10781624	7428001
HD 400x382	9,73	149839780	49034673	24597911	14642910	10871528
HD 400x551	9,18	218533430	68197690	32391163	19661087	15389746
HD 400x818	8,47	344342808	105038637	47168463	29180449	24035675
HD 400x1299	7,54	626299264	193672534	83356805	53005774	45861995
UC 254x254x73	15,73	13288709	4268326	2639477		
UC 254x254x132	14,89	21997271	5854325	3484915		
UC 305x305x97	13,05	24956859	8802127	5047153	2844293	1832242
UC 305x305x137	12,71	33079150	10553134	5850559	3386906	2310597
UC 305x305x198	12,24	46406955	13528953	7178437	4277149	3104684
UC 356x368x129	11,05	53790641	22474438	12936276	7256221	4577462
UC 356x368x177	10,80	68040608	26026204	14490340	8264990	5462114
UC 356x406x340	9,88	133749205	44701229	22813701	13491893	9838312
UC 356x406x744	8,65	307442374	94093851	42808120	26367098	21466618
UC 356x406x1086	7,92	487613588	148561598	64436053	40386421	34335011

Tabela 48 - Resistência crítica à flambagem para $L_{\theta} = 2,1$ m.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	$N_{fl,cr,z}$ [N]			
			Comprimento de Flambagem 2,1 m			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	23807612	5950761	3563582		
HEB 260	15,38	33447766	9991906	6125412		
HEB 280	14,29	43095950	13522347	7980658		
HEB 300	13,33	55581750	17955163	10251176	5858474	3915590
HEB 340	12,55	67537164	25188537	14647690	8253389	5317280
HEB 450	11,11	79517654	29779416	16462380	9361796	6164816
HEB 500	10,67	84869332	31786336	17274791	9865907	6552890
HEB 600	10,00	91444681	34842855	18546734	10647584	7110271
HEB 700	9,52	98037500	37797947	19818420	11448361	7690218
HEB 900	8,89	117599328	50570078	27436221	15678218	10192825
HD 260x54,1	15,89	22427668	8447054	5263854		
HD 260x142	14,74	48581865	12831337	7580124		
HD 260x225	13,85	76231417	18365981	10191711		

HD 320x127	12,92	59167914	19053158	10665775	6135097	4140620
HD 320x300	11,72	133424734	35948763	18087780	11110322	8615171
HD 400x237	10,33	195741702	70691038	37978386	22003315	15159185
HD 400x382	9,73	305795470	100070760	50199819	29883490	22186792
HD 400x551	9,18	445986593	139178960	66104413	40124668	31407645
HD 400x818	8,47	702740425	214364564	96262169	59551937	49052397
HD 400x1299	7,54	1278161764	395250069	170115928	108175049	93595909
UC 254x254x73	15,73	27119814	8710870	5386688		
UC 254x254x132	14,89	44892390	11947602	7112071		
UC 305x305x97	13,05	50932366	17963524	10300312	5804680	3739269
UC 305x305x137	12,71	67508469	21537008	11939917	6912052	4715503
UC 305x305x198	12,24	94708071	27610109	14649871	8728875	6336091
UC 356x368x129	11,05	109776818	45866199	26400563	14808614	9341759
UC 356x368x177	10,80	138858384	53114703	29572122	16867327	11147171
UC 356x406x340	9,88	272957562	91226998	46558573	27534475	20078187
UC 356x406x744	8,65	627433416	192028268	87363511	53810403	43809425
UC 356x406x1086	7,92	995129772	303186935	131502148	82421267	70071452

Tabela 49 – Resistência crítica à flambagem para $L_{\theta} = 1,5$ m.

Perfis	Am/V [m^{-1}]	20 °C	Comprimento de Flambagem 1,5 m			
			$N_{fl,cr,z}$ [N]			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	46662920	11663492	6984621		
HEB 260	15,38	65557621	19584136	12005808		
HEB 280	14,29	84468061	26503800	15642090		
HEB 300	13,33	108940230	35192119	20092306	11482609	7674556
HEB 340	12,55	132372842	49369533	28709473	16176642	10421868
HEB 450	11,11	155854601	58367656	32266264	18349120	12083040
HEB 500	10,67	166343891	62301219	33858591	19337177	12843664
HEB 600	10,00	179231576	68291995	36351598	20869265	13936130
HEB 700	9,52	192153500	74083976	38844103	22438788	15072828
HEB 900	8,89	230494682	99117352	53774994	30729307	19977936
HD 260x54,1	15,89	43958229	16556225	10317155		
HD 260x142	14,74	95220455	25149420	14857043		
HD 260x225	13,85	149413577	35997323	19975753		
HD 320x127	12,92	115969111	37344190	20904919	12024790	8115615
HD 320x300	11,72	261512479	70459575	35452049	21776231	16885736
HD 400x237	10,33	383653735	138554435	74437637	43126498	29712003
HD 400x382	9,73	599359120	196138690	98391645	58571640	43486111
HD 400x551	9,18	874133721	272790761	129564650	78644350	61558984
HD 400x818	8,47	1377371233	420154546	188673851	116721797	96142699
HD 400x1299	7,54	2505197058	774690135	333427219	212023095	183447981
UC 254x254x73	15,73	53154836	17073305	10557909		
UC 254x254x132	14,89	87989085	23417301	13939660		
UC 305x305x97	13,05	99827437	35208507	20188611	11377173	7328967
UC 305x305x137	12,71	132316599	42212536	23402236	13547622	9242386
UC 305x305x198	12,24	185627818	54115814	28713747	17108594	12418737
UC 356x368x129	11,05	215162563	89897750	51745103	29024883	18309848
UC 356x368x177	10,80	272162433	104104817	57961360	33059961	21848455
UC 356x406x340	9,88	534996821	178804916	91254802	53967571	39353247
UC 356x406x744	8,65	1229769496	376375406	171232481	105468391	85866472
UC 356x406x1086	7,92	1950454352	594246393	257744211	161545683	137340045

Tabela 50 – Resistência crítica à flambagem para $L_{\theta} = 4,0$ m.

Perfis	Am/V [m^{-1}]	20 °C	Comprimento de Flambagem 4,0 m			
			$N_{fl,cr,z}$ [N]			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	6561973	1640179	982212		

HEB 260	15,38	9219040	2754019	1688317		
HEB 280	14,29	11878321	3727097	2199669		
HEB 300	13,33	15319720	4948892	2825480	1614742	1079234
HEB 340	12,55	18614931	6942591	4037270	2274840	1465575
HEB 450	11,11	21917053	8207952	4537443	2580345	1699177
HEB 500	10,67	23392110	8761109	4761364	2719291	1806140
HEB 600	10,00	25204440	9603562	5111943	2934740	1959768
HEB 700	9,52	27021586	10418059	5462452	3155455	2119616
HEB 900	8,89	32413315	13938378	7562109	4321309	2809397
HD 260x54,1	15,89	6181626	2328219	1450850		
HD 260x142	14,74	13390377	3536637	2089272		
HD 260x225	13,85	21011284	5062124	2809090		
HD 320x127	12,92	16308156	5251527	2939754	1690986	1141258
HD 320x300	11,72	36775192	9908378	4985444	3062282	2374557
HD 400x237	10,33	53951306	19484217	10467793	6064664	4178250
HD 400x382	9,73	84284876	27582003	13836325	8236637	6115234
HD 400x551	9,18	122925055	38361201	18220029	11059362	8656732
HD 400x818	8,47	193692830	59084233	26532260	16414003	13520067
HD 400x1299	7,54	352293336	108940800	46888203	29815748	25797372
UC 254x254x73	15,73	7474899	2400934	1484706		
UC 254x254x132	14,89	12373465	3293058	1960265		
UC 305x305x97	13,05	14038233	4951196	2839023	1599915	1030636
UC 305x305x137	12,71	18607022	5936138	3290939	1905134	1299711
UC 305x305x198	12,24	26103912	7610036	4037871	2405896	1746385
UC 356x368x129	11,05	30257235	12641871	7276655	4081624	2574822
UC 356x368x177	10,80	38272842	14639740	8150816	4649057	3072439
UC 356x406x340	9,88	75233928	25144441	12832707	7589190	5534050
UC 356x406x744	8,65	172936335	52927791	24079568	14831492	12074973
UC 356x406x1086	7,92	274282643	83565899	36245280	22717362	19313444

Tabela 51 – Resistência crítica à flambagem para $L_{\theta} = 2,8$ m.

Perfis	Am/V [m^{-1}]	20 °C	Comprimento de Flambagem 2,8 m			
			$N_{fi,cr,z}$ [N]			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	13391782	3347303	2004515		
HEB 260	15,38	18814368	5620447	3445545		
HEB 280	14,29	24241472	7606320	4489120		
HEB 300	13,33	31264734	10099779	5766287	3295392	2202519
HEB 340	12,55	37989655	14168552	8239326	4642531	2990970
HEB 450	11,11	44728680	16750922	9260088	5266010	3467709
HEB 500	10,67	47738999	17879814	9717070	5549572	3686000
HEB 600	10,00	51437633	19599106	10432538	5989266	3999527
HEB 700	9,52	55146094	21261345	11147861	6439703	4325748
HEB 900	8,89	66149622	28445669	15432875	8818998	5733464
HD 260x54,1	15,89	12615563	4751468	2960918		
HD 260x142	14,74	27327299	7217627	4263820		
HD 260x225	13,85	42880172	10330864	5732837		
HD 320x127	12,92	33281952	10717402	5999498	3450992	2329099
HD 320x300	11,72	75051413	20221179	10174376	6249556	4846034
HD 400x237	10,33	110104707	39763709	21362842	12376865	8527042
HD 400x382	9,73	172009952	56289803	28237398	16809463	12480070
HD 400x551	9,18	250867458	78288165	37183733	22570126	17666800
HD 400x818	8,47	395291489	120580067	54147470	33497965	27591973
HD 400x1299	7,54	718965992	222328164	95690210	60848465	52647699
UC 254x254x73	15,73	15254895	4899864	3030012		
UC 254x254x132	14,89	25251970	6720526	4000540		
UC 305x305x97	13,05	28649456	10104482	5793925	3265133	2103339
UC 305x305x137	12,71	37973514	12114567	6716203	3888029	2652471
UC 305x305x198	12,24	53273290	15530686	8240552	4909992	3564051

UC 356x368x129	11,05	61749460	25799737	14850317	8329845	5254739
UC 356x368x177	10,80	78107841	29877020	16634319	9487872	6270284
UC 356x406x340	9,88	153538629	51315186	26189197	15488142	11293980
UC 356x406x744	8,65	352931297	108015901	49141975	30268352	24642801
UC 356x406x1086	7,92	559760497	170542651	73969958	46361963	39415192

Tabela 52 – Resistência crítica à flambagem para $L_{\theta} = 2,0$ m.

Perfis	Am/V [m^{-1}]	20 °C	Comprimento de Flambagem 2,0 m			
			$N_{fi,cr,z}$ [N]			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	26247893	6560714	3928849		
HEB 260	15,38	36876162	11016076	6753267		
HEB 280	14,29	47513285	14908388	8798675		
HEB 300	13,33	61278879	19795567	11301922	6458967	4316938
HEB 340	12,55	74459724	27770362	16149078	9099361	5862301
HEB 450	11,11	87668213	32831806	18149773	10321380	6796710
HEB 500	10,67	93568438	35044436	19045457	10877162	7224561
HEB 600	10,00	100817761	38414247	20447774	11738962	7839073
HEB 700	9,52	108086344	41672236	21849808	12621818	8478466
HEB 900	8,89	129653259	55753511	30248434	17285235	11237589
HD 260x54,1	15,89	24726504	9312877	5803400		
HD 260x142	14,74	53561506	14146549	8357087		
HD 260x225	13,85	84045137	20248494	11236361		
HD 320x127	12,92	65232625	21006107	11759017	6763944	4565033
HD 320x300	11,72	147100769	39633511	19941778	12249130	9498226
HD 400x237	10,33	215805226	77936870	41871171	24258655	16713001
HD 400x382	9,73	337139505	110328013	55345300	32946548	24460938
HD 400x551	9,18	491700218	153444803	72880116	44237447	34626929
HD 400x818	8,47	774771318	236336932	106129041	65656011	54080268
HD 400x1299	7,54	1409173345	435763201	187552811	119262991	103189489
UC 254x254x73	15,73	29899595	9603734	5938824		
UC 254x254x132	14,89	49493860	13172232	7841059		
UC 305x305x97	13,05	56152933	19804785	11356094	6399660	4122544
UC 305x305x137	12,71	74428087	23744551	13163758	7620537	5198842
UC 305x305x198	12,24	104415648	30440145	16151483	9623584	6985540
UC 356x368x129	11,05	121028942	50567484	29106621	16326497	10299289
UC 356x368x177	10,80	153091369	58558960	32603265	18596228	12289756
UC 356x406x340	9,88	300935712	100577765	51330826	30356759	22136202
UC 356x406x744	8,65	691745341	211711166	96318270	59325970	48299891
UC 356x406x1086	7,92	1097130573	334263596	144981119	90869447	77253775

A.7 - Esbeltez Adimensional

Tabela 53 – Esbeltez adimensional para $L_{\theta} = 3,0$ m.

Perfis	Am/V [m^{-1}]	20 °C	Comprimento de Flambagem 3,0 m			
			λ_{θ}			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	0,6512	0,9164	0,9787		
HEB 260	15,38	0,5965	0,7984	0,8621		
HEB 280	14,29	0,5523	0,7310	0,7980		
HEB 300	13,33	0,5134	0,6752	0,7434	0,7943	0,7640
HEB 340	12,55	0,5129	0,6506	0,7248	0,7856	0,7799
HEB 450	11,11	0,5269	0,6828	0,7834	0,8726	0,9054
HEB 500	10,67	0,5316	0,6939	0,8048	0,9041	0,9491
HEB 600	10,00	0,5447	0,7187	0,8498	0,9702	1,0410
HEB 700	9,52	0,5588	0,7450	0,8954	1,0354	1,1288

HEB 900	8,89	0,5740	0,7489	0,9046	1,0622	1,1895
HD 260x54,1	15,89	0,6184	0,7899	0,8690		
HD 260x142	14,74	0,5783	0,7923	0,8485		
HD 260x225	13,85	0,5510	0,7684	0,8251		
HD 320x127	12,92	0,5148	0,6805	0,7546	0,8117	0,7902
HD 320x300	11,72	0,4776	0,6538	0,7310	0,7747	0,7461
HD 400x237	10,33	0,3812	0,4837	0,5434	0,5912	0,5967
HD 400x382	9,73	0,3642	0,4730	0,5368	0,5785	0,5753
HD 400x551	9,18	0,3473	0,4564	0,5243	0,5612	0,5522
HD 400x818	8,47	0,3253	0,4299	0,5009	0,5323	0,5184
HD 400x1299	7,54	0,2892	0,3827	0,4533	0,4776	0,4616
UC 254x254x73	15,73	0,6231	0,8224	0,8935		
UC 254x254x132	14,89	0,5899	0,8097	0,8678		
UC 305x305x97	13,05	0,5169	0,6701	0,7442	0,8062	0,7941
UC 305x305x137	12,71	0,5011	0,6643	0,7364	0,7919	0,7737
UC 305x305x198	12,24	0,4868	0,6557	0,7273	0,7763	0,7531
UC 356x368x129	11,05	0,4120	0,5082	0,5704	0,6272	0,6420
UC 356x368x177	10,80	0,4064	0,5104	0,5725	0,6260	0,6356
UC 356x406x340	9,88	0,3676	0,4752	0,5380	0,5811	0,5799
UC 356x406x744	8,65	0,3297	0,4357	0,5063	0,5390	0,5263
UC 356x406x1086	7,92	0,3019	0,3993	0,4700	0,4962	0,4794

Tabela 54 – Esbeltez adimensional para $L_{\theta} = 2,1$ m.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	Comprimento de Flambagem 2,1 m			
			λ_{θ}			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	0,4559	0,6415	0,6851		
HEB 260	15,38	0,4175	0,5589	0,6035		
HEB 280	14,29	0,3866	0,5117	0,5586		
HEB 300	13,33	0,3594	0,4726	0,5204	0,5560	0,5348
HEB 340	12,55	0,3590	0,4554	0,5074	0,5499	0,5459
HEB 450	11,11	0,3688	0,4780	0,5484	0,6108	0,6338
HEB 500	10,67	0,3721	0,4857	0,5633	0,6329	0,6644
HEB 600	10,00	0,3813	0,5031	0,5948	0,6792	0,7287
HEB 700	9,52	0,3912	0,5215	0,6268	0,7248	0,7902
HEB 900	8,89	0,4018	0,5242	0,6332	0,7435	0,8327
HD 260x54,1	15,89	0,4328	0,5529	0,6083		
HD 260x142	14,74	0,4048	0,5546	0,5940		
HD 260x225	13,85	0,3857	0,5379	0,5776		
HD 320x127	12,92	0,3603	0,4763	0,5282	0,5682	0,5532
HD 320x300	11,72	0,3343	0,4577	0,5117	0,5423	0,5223
HD 400x237	10,33	0,2668	0,3386	0,3804	0,4138	0,4177
HD 400x382	9,73	0,2549	0,3311	0,3758	0,4049	0,4027
HD 400x551	9,18	0,2431	0,3195	0,3670	0,3928	0,3865
HD 400x818	8,47	0,2277	0,3009	0,3506	0,3726	0,3629
HD 400x1299	7,54	0,2024	0,2679	0,3173	0,3344	0,3231
UC 254x254x73	15,73	0,4362	0,5757	0,6255		
UC 254x254x132	14,89	0,4130	0,5668	0,6075		
UC 305x305x97	13,05	0,3618	0,4691	0,5209	0,5643	0,5559
UC 305x305x137	12,71	0,3507	0,4650	0,5155	0,5544	0,5416
UC 305x305x198	12,24	0,3407	0,4590	0,5091	0,5434	0,5272
UC 356x368x129	11,05	0,2884	0,3557	0,3993	0,4391	0,4494
UC 356x368x177	10,80	0,2845	0,3573	0,4008	0,4382	0,4449
UC 356x406x340	9,88	0,2573	0,3327	0,3766	0,4068	0,4059
UC 356x406x744	8,65	0,2308	0,3050	0,3544	0,3773	0,3684
UC 356x406x1086	7,92	0,2113	0,2795	0,3290	0,3474	0,3356

Tabela 55 – Esbeltez adimensional para $L_{\theta} = 1,5$ m.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	Comprimento de Flambagem 1,5 m			
			λ_{θ}			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	0,3256	0,4582	0,4894		
HEB 260	15,38	0,2982	0,3992	0,4311		
HEB 280	14,29	0,2761	0,3655	0,3990		
HEB 300	13,33	0,2567	0,3376	0,3717	0,3971	0,3820
HEB 340	12,55	0,2564	0,3253	0,3624	0,3928	0,3899
HEB 450	11,11	0,2634	0,3414	0,3917	0,4363	0,4527
HEB 500	10,67	0,2658	0,3470	0,4024	0,4520	0,4746
HEB 600	10,00	0,2723	0,3593	0,4249	0,4851	0,5205
HEB 700	9,52	0,2794	0,3725	0,4477	0,5177	0,5644
HEB 900	8,89	0,2870	0,3744	0,4523	0,5311	0,5948
HD 260x54,1	15,89	0,3092	0,3949	0,4345		
HD 260x142	14,74	0,2892	0,3961	0,4243		
HD 260x225	13,85	0,2755	0,3842	0,4126		
HD 320x127	12,92	0,2574	0,3402	0,3773	0,4058	0,3951
HD 320x300	11,72	0,2388	0,3269	0,3655	0,3874	0,3730
HD 400x237	10,33	0,1906	0,2418	0,2717	0,2956	0,2984
HD 400x382	9,73	0,1821	0,2365	0,2684	0,2892	0,2876
HD 400x551	9,18	0,1736	0,2282	0,2621	0,2806	0,2761
HD 400x818	8,47	0,1626	0,2149	0,2505	0,2661	0,2592
HD 400x1299	7,54	0,1446	0,1913	0,2266	0,2388	0,2308
UC 254x254x73	15,73	0,3115	0,4112	0,4468		
UC 254x254x132	14,89	0,2950	0,4049	0,4339		
UC 305x305x97	13,05	0,2584	0,3351	0,3721	0,4031	0,3971
UC 305x305x137	12,71	0,2505	0,3321	0,3682	0,3960	0,3869
UC 305x305x198	12,24	0,2434	0,3279	0,3637	0,3881	0,3766
UC 356x368x129	11,05	0,2060	0,2541	0,2852	0,3136	0,3210
UC 356x368x177	10,80	0,2032	0,2552	0,2863	0,3130	0,3178
UC 356x406x340	9,88	0,1838	0,2376	0,2690	0,2906	0,2900
UC 356x406x744	8,65	0,1649	0,2179	0,2531	0,2695	0,2631
UC 356x406x1086	7,92	0,1509	0,1996	0,2350	0,2481	0,2397

Tabela 56 – Esbeltez adimensional para $L_{\theta} = 4,0$ m.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	Comprimento de Flambagem 4,0 m			
			λ_{θ}			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	0,8683	1,2218	1,3050		
HEB 260	15,38	0,7953	1,0645	1,1495		
HEB 280	14,29	0,7363	0,9747	1,0640		
HEB 300	13,33	0,6845	0,9003	0,9912	1,0590	1,0187
HEB 340	12,55	0,6838	0,8675	0,9664	1,0475	1,0399
HEB 450	11,11	0,7025	0,9104	1,0445	1,1634	1,2072
HEB 500	10,67	0,7088	0,9252	1,0730	1,2054	1,2655
HEB 600	10,00	0,7262	0,9582	1,1330	1,2936	1,3881
HEB 700	9,52	0,7451	0,9934	1,1939	1,3805	1,5051
HEB 900	8,89	0,7654	0,9985	1,2062	1,4162	1,5860
HD 260x54,1	15,89	0,8245	1,0532	1,1587		
HD 260x142	14,74	0,7711	1,0564	1,1314		
HD 260x225	13,85	0,7346	1,0245	1,1001		
HD 320x127	12,92	0,6864	0,9073	1,0061	1,0823	1,0536
HD 320x300	11,72	0,6367	0,8718	0,9747	1,0330	0,9948
HD 400x237	10,33	0,5082	0,6449	0,7245	0,7882	0,7956
HD 400x382	9,73	0,4856	0,6307	0,7158	0,7713	0,7670
HD 400x551	9,18	0,4630	0,6086	0,6990	0,7482	0,7362
HD 400x818	8,47	0,4337	0,5732	0,6679	0,7097	0,6912
HD 400x1299	7,54	0,3856	0,5102	0,6043	0,6369	0,6154

UC 254x254x73	15,73	0,8308	1,0965	1,1913		
UC 254x254x132	14,89	0,7866	1,0796	1,1571		
UC 305x305x97	13,05	0,6892	0,8935	0,9922	1,0749	1,0588
UC 305x305x137	12,71	0,6681	0,8857	0,9819	1,0559	1,0317
UC 305x305x198	12,24	0,6490	0,8743	0,9698	1,0351	1,0042
UC 356x368x129	11,05	0,5493	0,6776	0,7605	0,8363	0,8560
UC 356x368x177	10,80	0,5419	0,6805	0,7634	0,8347	0,8475
UC 356x406x340	9,88	0,4901	0,6337	0,7173	0,7748	0,7732
UC 356x406x744	8,65	0,4397	0,5810	0,6750	0,7187	0,7017
UC 356x406x1086	7,92	0,4025	0,5324	0,6266	0,6616	0,6392

Tabela 57 – Esbeltez adimensional para $L_{\theta} = 2,8$ m.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	λ_{θ}			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	0,6078	0,8553	0,9135		
HEB 260	15,38	0,5567	0,7451	0,8046		
HEB 280	14,29	0,5154	0,6823	0,7448		
HEB 300	13,33	0,4791	0,6302	0,6939	0,7413	0,7131
HEB 340	12,55	0,4787	0,6072	0,6765	0,7332	0,7279
HEB 450	11,11	0,4917	0,6373	0,7312	0,8144	0,8451
HEB 500	10,67	0,4961	0,6476	0,7511	0,8438	0,8858
HEB 600	10,00	0,5084	0,6708	0,7931	0,9055	0,9716
HEB 700	9,52	0,5216	0,6954	0,8357	0,9663	1,0535
HEB 900	8,89	0,5358	0,6990	0,8443	0,9914	1,1102
HD 260x54,1	15,89	0,5771	0,7372	0,8111		
HD 260x142	14,74	0,5398	0,7394	0,7920		
HD 260x225	13,85	0,5142	0,7171	0,7701		
HD 320x127	12,92	0,4805	0,6351	0,7043	0,7576	0,7375
HD 320x300	11,72	0,4457	0,6102	0,6823	0,7231	0,6963
HD 400x237	10,33	0,3558	0,4514	0,5072	0,5517	0,5569
HD 400x382	9,73	0,3399	0,4415	0,5010	0,5399	0,5369
HD 400x551	9,18	0,3241	0,4260	0,4893	0,5237	0,5154
HD 400x818	8,47	0,3036	0,4012	0,4675	0,4968	0,4839
HD 400x1299	7,54	0,2699	0,3571	0,4230	0,4458	0,4308
UC 254x254x73	15,73	0,5815	0,7675	0,8339		
UC 254x254x132	14,89	0,5506	0,7557	0,8100		
UC 305x305x97	13,05	0,4824	0,6255	0,6946	0,7524	0,7412
UC 305x305x137	12,71	0,4677	0,6200	0,6873	0,7391	0,7222
UC 305x305x198	12,24	0,4543	0,6120	0,6788	0,7245	0,7029
UC 356x368x129	11,05	0,3845	0,4743	0,5324	0,5854	0,5992
UC 356x368x177	10,80	0,3793	0,4764	0,5344	0,5843	0,5932
UC 356x406x340	9,88	0,3431	0,4436	0,5021	0,5424	0,5413
UC 356x406x744	8,65	0,3078	0,4067	0,4725	0,5031	0,4912
UC 356x406x1086	7,92	0,2818	0,3727	0,4386	0,4631	0,4474

Tabela 58 – Esbeltez adimensional para $L_{\theta} = 2,0$ m.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	λ_{θ}			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	0,4342	0,6109	0,6525		
HEB 260	15,38	0,3977	0,5322	0,5747		
HEB 280	14,29	0,3682	0,4874	0,5320		
HEB 300	13,33	0,3422	0,4501	0,4956	0,5295	0,5094
HEB 340	12,55	0,3419	0,4337	0,4832	0,5237	0,5199
HEB 450	11,11	0,3512	0,4552	0,5223	0,5817	0,6036
HEB 500	10,67	0,3544	0,4626	0,5365	0,6027	0,6327
HEB 600	10,00	0,3631	0,4791	0,5665	0,6468	0,6940

HEB 700	9,52	0,3726	0,4967	0,5970	0,6902	0,7525
HEB 900	8,89	0,3827	0,4993	0,6031	0,7081	0,7930
HD 260x54,1	15,89	0,4122	0,5266	0,5793		
HD 260x142	14,74	0,3856	0,5282	0,5657		
HD 260x225	13,85	0,3673	0,5122	0,5501		
HD 320x127	12,92	0,3432	0,4536	0,5031	0,5411	0,5268
HD 320x300	11,72	0,3184	0,4359	0,4873	0,5165	0,4974
HD 400x237	10,33	0,2541	0,3225	0,3623	0,3941	0,3978
HD 400x382	9,73	0,2428	0,3153	0,3579	0,3857	0,3835
HD 400x551	9,18	0,2315	0,3043	0,3495	0,3741	0,3681
HD 400x818	8,47	0,2168	0,2866	0,3339	0,3548	0,3456
HD 400x1299	7,54	0,1928	0,2551	0,3022	0,3184	0,3077
UC 254x254x73	15,73	0,4154	0,5482	0,5957		
UC 254x254x132	14,89	0,3933	0,5398	0,5786		
UC 305x305x97	13,05	0,3446	0,4468	0,4961	0,5374	0,5294
UC 305x305x137	12,71	0,3340	0,4428	0,4909	0,5280	0,5158
UC 305x305x198	12,24	0,3245	0,4372	0,4849	0,5175	0,5021
UC 356x368x129	11,05	0,2746	0,3388	0,3803	0,4181	0,4280
UC 356x368x177	10,80	0,2710	0,3403	0,3817	0,4173	0,4237
UC 356x406x340	9,88	0,2450	0,3168	0,3587	0,3874	0,3866
UC 356x406x744	8,65	0,2198	0,2905	0,3375	0,3593	0,3508
UC 356x406x1086	7,92	0,2013	0,2662	0,3133	0,3308	0,3196

A.8 - Fator de Redução

Os campos das tabelas preenchidos com “-”, representam que as colunas possuem um comprimento de flambagem maior que o permitido, para a aplicação do modelo, de acordo com a EN 1994-1-2 anexo G [1].

Tabela 59 – Fator de redução para $L_{\theta} = 3,0$ m.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	Comprimento de Flambagem 3,0 m			
			χ_z			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	-	-	-		
HEB 260	15,38	-	-	-		
HEB 280	14,29	-	-	-		
HEB 300	13,33	0,8355	0,7400	0,6977	0,6658	0,6847
HEB 340	12,55	0,8358	0,7550	0,7093	0,6712	0,6748
HEB 450	11,11	0,8279	0,7353	0,6726	0,6168	0,5965
HEB 500	10,67	0,8252	0,7285	0,6592	0,5973	0,5700
HEB 600	10,00	0,8177	0,7131	0,6310	0,5574	0,5165
HEB 700	9,52	0,8095	0,6966	0,6026	0,5197	0,4692
HEB 900	8,89	0,8007	0,6942	0,5970	0,5047	0,4388
HD 260x54,1	15,89	-	-	-		
HD 260x142	14,74	-	-	-		
HD 260x225	13,85	-	-	-		
HD 320x127	12,92	0,8347	0,7368	0,6907	0,6548	0,6683
HD 320x300	11,72	0,8555	0,7530	0,7054	0,6780	0,6960
HD 400x237	10,33	0,9072	0,8521	0,8184	0,7906	0,7873
HD 400x382	9,73	0,9161	0,8580	0,8222	0,7981	0,7999
HD 400x551	9,18	0,9249	0,8670	0,8293	0,8082	0,8134
HD 400x818	8,47	0,9362	0,8814	0,8425	0,8248	0,8326
HD 400x1299	7,54	0,9547	0,9065	0,8688	0,8554	0,8642
UC 254x254x73	15,73	-	-	-		

UC 254x254x132	14,89	-	-	-		
UC 305x305x97	13,05	0,8335	0,7431	0,6972	0,6583	0,6659
UC 305x305x137	12,71	0,8424	0,7467	0,7020	0,6672	0,6786
UC 305x305x198	12,24	0,8504	0,7519	0,7077	0,6770	0,6916
UC 356x368x129	11,05	0,8910	0,8384	0,8028	0,7691	0,7602
UC 356x368x177	10,80	0,8939	0,8372	0,8015	0,7699	0,7641
UC 356x406x340	9,88	0,9144	0,8567	0,8215	0,7965	0,7972
UC 356x406x744	8,65	0,9339	0,8782	0,8395	0,8209	0,8282
UC 356x406x1086	7,92	0,9482	0,8977	0,8596	0,8451	0,8544

Tabela 60 – Fator de redução para $L_{\theta} = 2,1$ m.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	χ_z			
			Comprimento de Flambagem 2,1 m			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	0,8673	0,7605	0,7339		
HEB 260	15,38	0,8880	0,8095	0,7833		
HEB 280	14,29	0,9044	0,8364	0,8096		
HEB 300	13,33	0,9186	0,8582	0,8315	0,8112	0,8233
HEB 340	12,55	0,9188	0,8676	0,8389	0,8147	0,8170
HEB 450	11,11	0,9137	0,8552	0,8156	0,7790	0,7652
HEB 500	10,67	0,9120	0,8509	0,8069	0,7657	0,7466
HEB 600	10,00	0,9072	0,8413	0,7884	0,7375	0,7068
HEB 700	9,52	0,9020	0,8309	0,7694	0,7093	0,6683
HEB 900	8,89	0,8964	0,8294	0,7655	0,6976	0,6417
HD 260x54,1	15,89	0,8798	0,8129	0,7805		
HD 260x142	14,74	0,8948	0,8120	0,7889		
HD 260x225	13,85	0,9049	0,8216	0,7986		
HD 320x127	12,92	0,9181	0,8561	0,8271	0,8041	0,8128
HD 320x300	11,72	0,9316	0,8664	0,8364	0,8190	0,8305
HD 400x237	10,33	0,9660	0,9294	0,9077	0,8900	0,8879
HD 400x382	9,73	0,9721	0,9332	0,9101	0,8947	0,8959
HD 400x551	9,18	0,9781	0,9392	0,9147	0,9011	0,9044
HD 400x818	8,47	0,9859	0,9487	0,9231	0,9117	0,9168
HD 400x1299	7,54	0,9988	0,9655	0,9403	0,9315	0,9373
UC 254x254x73	15,73	0,8780	0,7997	0,7702		
UC 254x254x132	14,89	0,8904	0,8049	0,7809		
UC 305x305x97	13,05	0,9173	0,8601	0,8312	0,8063	0,8112
UC 305x305x137	12,71	0,9231	0,8624	0,8343	0,8121	0,8194
UC 305x305x198	12,24	0,9283	0,8656	0,8379	0,8184	0,8277
UC 356x368x129	11,05	0,9551	0,9205	0,8977	0,8765	0,8709
UC 356x368x177	10,80	0,9570	0,9197	0,8969	0,8769	0,8733
UC 356x406x340	9,88	0,9709	0,9324	0,9096	0,8937	0,8942
UC 356x406x744	8,65	0,9843	0,9466	0,9212	0,9093	0,9139
UC 356x406x1086	7,92	0,9942	0,9596	0,9343	0,9248	0,9309

Tabela 61 – Fator de redução para $L_{\theta} = 1,5$ m.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	χ_z			
			Comprimento de Flambagem 1,5 m			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	0,9360	0,8661	0,8489		
HEB 260	15,38	0,9500	0,8978	0,8808		
HEB 280	14,29	0,9613	0,9154	0,8978		
HEB 300	13,33	0,9712	0,9299	0,9122	0,8988	0,9068
HEB 340	12,55	0,9713	0,9362	0,9170	0,9011	0,9026
HEB 450	11,11	0,9678	0,9279	0,9017	0,8780	0,8691
HEB 500	10,67	0,9666	0,9250	0,8961	0,8694	0,8571
HEB 600	10,00	0,9632	0,9186	0,8841	0,8513	0,8314
HEB 700	9,52	0,9596	0,9118	0,8718	0,8331	0,8063

HEB 900	8,89	0,9558	0,9108	0,8693	0,8254	0,7885
HD 260x54,1	15,89	0,9445	0,9000	0,8789		
HD 260x142	14,74	0,9547	0,8994	0,8844		
HD 260x225	13,85	0,9616	0,9057	0,8907		
HD 320x127	12,92	0,9708	0,9285	0,9093	0,8942	0,8999
HD 320x300	11,72	0,9803	0,9354	0,9154	0,9040	0,9115
HD 400x237	10,33	1,0000	0,9787	0,9636	0,9514	0,9500
HD 400x382	9,73	1,0000	0,9814	0,9652	0,9546	0,9554
HD 400x551	9,18	1,0000	0,9856	0,9684	0,9590	0,9613
HD 400x818	8,47	1,0000	0,9924	0,9743	0,9664	0,9699
HD 400x1299	7,54	1,0000	1,0000	0,9864	0,9802	0,9843
UC 254x254x73	15,73	0,9433	0,8914	0,8723		
UC 254x254x132	14,89	0,9517	0,8947	0,8792		
UC 305x305x97	13,05	0,9703	0,9312	0,9120	0,8957	0,8989
UC 305x305x137	12,71	0,9743	0,9327	0,9140	0,8995	0,9042
UC 305x305x198	12,24	0,9779	0,9349	0,9164	0,9036	0,9096
UC 356x368x129	11,05	0,9969	0,9725	0,9567	0,9422	0,9384
UC 356x368x177	10,80	0,9984	0,9719	0,9561	0,9425	0,9400
UC 356x406x340	9,88	1,0000	0,9809	0,9649	0,9540	0,9543
UC 356x406x744	8,65	1,0000	0,9909	0,9730	0,9647	0,9679
UC 356x406x1086	7,92	1,0000	1,0000	0,9822	0,9755	0,9798

Tabela 62 – Fator de redução para $L_{\theta} = 4,0$ m.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	Comprimento de Flambagem 4,0 m			
			χ_z			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	-	-	-		
HEB 260	15,38	-	-	-		
HEB 280	14,29	-	-	-		
HEB 300	13,33	0,7343	0,5997	0,5450	0,5065	0,5292
HEB 340	12,55	0,7347	0,6199	0,5596	0,5129	0,5172
HEB 450	11,11	0,7232	0,5934	0,5146	0,4516	0,4303
HEB 500	10,67	0,7193	0,5844	0,4988	0,4312	0,4037
HEB 600	10,00	0,7084	0,5645	0,4670	0,3915	0,3537
HEB 700	9,52	0,6966	0,5438	0,4367	0,3565	0,3129
HEB 900	8,89	0,6839	0,5408	0,4308	0,3433	0,2882
HD 260x54,1	15,89	-	-	-		
HD 260x142	14,74	-	-	-		
HD 260x225	13,85	-	-	-		
HD 320x127	12,92	0,7331	0,5954	0,5364	0,4938	0,5095
HD 320x300	11,72	0,7634	0,6173	0,5548	0,5211	0,5430
HD 400x237	10,33	0,8384	0,7585	0,7095	0,6696	0,6649
HD 400x382	9,73	0,8510	0,7670	0,7149	0,6802	0,6828
HD 400x551	9,18	0,8634	0,7803	0,7253	0,6947	0,7021
HD 400x818	8,47	0,8794	0,8012	0,7445	0,7187	0,7301
HD 400x1299	7,54	0,9049	0,8373	0,7828	0,7633	0,7762
UC 254x254x73	15,73	-	-	-		
UC 254x254x132	14,89	-	-	-		
UC 305x305x97	13,05	0,7314	0,6038	0,5445	0,4978	0,5066
UC 305x305x137	12,71	0,7443	0,6087	0,5505	0,5082	0,5218
UC 305x305x198	12,24	0,7560	0,6157	0,5577	0,5199	0,5375
UC 356x368x129	11,05	0,8150	0,7385	0,6869	0,6394	0,6271
UC 356x368x177	10,80	0,8193	0,7367	0,6851	0,6404	0,6324
UC 356x406x340	9,88	0,8485	0,7653	0,7139	0,6780	0,6790
UC 356x406x744	8,65	0,8761	0,7966	0,7401	0,7131	0,7236
UC 356x406x1086	7,92	0,8960	0,8247	0,7695	0,7483	0,7619

Tabela 63 – Fator de redução para $L_{\theta} = 2,8$ m.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	Comprimento de Flambagem 2,8 m			
			χ_z			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	-	-	-		
HEB 260	15,38	-	-	-		
HEB 280	14,29	0,8343	0,7356	0,6968		
HEB 300	13,33	0,8546	0,7674	0,7285	0,6990	0,7166
HEB 340	12,55	0,8548	0,7811	0,7392	0,7040	0,7074
HEB 450	11,11	0,8476	0,7631	0,7053	0,6531	0,6339
HEB 500	10,67	0,8452	0,7568	0,6928	0,6347	0,6086
HEB 600	10,00	0,8383	0,7427	0,6665	0,5964	0,5566
HEB 700	9,52	0,8308	0,7276	0,6397	0,5597	0,5095
HEB 900	8,89	0,8228	0,7253	0,6344	0,5450	0,4788
HD 260x54,1	15,89	-	-	-		
HD 260x142	14,74	-	-	-		
HD 260x225	13,85	-	-	-		
HD 320x127	12,92	0,8539	0,7644	0,7220	0,6888	0,7013
HD 320x300	11,72	0,8729	0,7793	0,7356	0,7104	0,7269
HD 400x237	10,33	0,9205	0,8698	0,8390	0,8136	0,8106
HD 400x382	9,73	0,9287	0,8751	0,8424	0,8204	0,8221
HD 400x551	9,18	0,9368	0,8835	0,8490	0,8296	0,8344
HD 400x818	8,47	0,9473	0,8967	0,8610	0,8448	0,8520
HD 400x1299	7,54	0,9645	0,9198	0,8851	0,8728	0,8809
UC 254x254x73	15,73	-	-	-		
UC 254x254x132	14,89	-	-	-		
UC 305x305x97	13,05	0,8528	0,7702	0,7280	0,6920	0,6991
UC 305x305x137	12,71	0,8609	0,7735	0,7325	0,7003	0,7109
UC 305x305x198	12,24	0,8682	0,7782	0,7377	0,7094	0,7229
UC 356x368x129	11,05	0,9055	0,8573	0,8247	0,7940	0,7859
UC 356x368x177	10,80	0,9082	0,8561	0,8236	0,7947	0,7894
UC 356x406x340	9,88	0,9271	0,8740	0,8418	0,8190	0,8196
UC 356x406x744	8,65	0,9452	0,8938	0,8582	0,8413	0,8479
UC 356x406x1086	7,92	0,9584	0,9117	0,8767	0,8634	0,8719

Tabela 64 – Fator de redução para $L_{\theta} = 2,0$ m.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	Comprimento de Flambagem 2,0 m			
			χ_z			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	0,8791	0,7789	0,7539		
HEB 260	15,38	0,8986	0,8248	0,8003		
HEB 280	14,29	0,9140	0,8500	0,8249		
HEB 300	13,33	0,9275	0,8705	0,8454	0,8263	0,8377
HEB 340	12,55	0,9277	0,8793	0,8523	0,8296	0,8318
HEB 450	11,11	0,9228	0,8677	0,8305	0,7962	0,7832
HEB 500	10,67	0,9212	0,8637	0,8223	0,7838	0,7658
HEB 600	10,00	0,9167	0,8546	0,8050	0,7573	0,7284
HEB 700	9,52	0,9117	0,8448	0,7872	0,7307	0,6920
HEB 900	8,89	0,9064	0,8434	0,7836	0,7197	0,6665
HD 260x54,1	15,89	0,8908	0,8280	0,7976		
HD 260x142	14,74	0,9049	0,8271	0,8055		
HD 260x225	13,85	0,9145	0,8361	0,8146		
HD 320x127	12,92	0,9270	0,8686	0,8413	0,8197	0,8279
HD 320x300	11,72	0,9398	0,8782	0,8500	0,8337	0,8444
HD 400x237	10,33	0,9725	0,9377	0,9171	0,9004	0,8985
HD 400x382	9,73	0,9782	0,9413	0,9194	0,9049	0,9060
HD 400x551	9,18	0,9840	0,9470	0,9237	0,9109	0,9141
HD 400x818	8,47	0,9914	0,9560	0,9318	0,9210	0,9257
HD 400x1299	7,54	1,0000	0,9720	0,9480	0,9397	0,9452

UC 254x254x73	15,73	0,8892	0,8156	0,7879		
UC 254x254x132	14,89	0,9009	0,8205	0,7980		
UC 305x305x97	13,05	0,9263	0,8723	0,8452	0,8218	0,8264
UC 305x305x137	12,71	0,9317	0,8744	0,8480	0,8272	0,8341
UC 305x305x198	12,24	0,9366	0,8775	0,8514	0,8331	0,8418
UC 356x368x129	11,05	0,9621	0,9293	0,9077	0,8877	0,8824
UC 356x368x177	10,80	0,9639	0,9285	0,9070	0,8881	0,8847
UC 356x406x340	9,88	0,9771	0,9405	0,9190	0,9040	0,9044
UC 356x406x744	8,65	0,9899	0,9540	0,9299	0,9186	0,9230
UC 356x406x1086	7,92	0,9994	0,9664	0,9423	0,9334	0,9391

A.9 - Resistência à Flambagem

Tabela 65 – Resistência à flambagem da coluna para $L_{\theta} = 3,0$ m.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	$N_{fi,Rd,z}$ [N]			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	-	-	-	-	-
HEB 260	15,38	-	-	-	-	-
HEB 280	14,29	-	-	-	-	-
HEB 300	13,33	5996850	2967966	1936760	1205652	766911
HEB 340	12,55	7274874	3944404	2674550	1675252	1069350
HEB 450	11,11	8953468	5002457	3329561	2154146	1477178
HEB 500	10,67	9696209	5463088	3613649	2360269	1648638
HEB 600	10,00	10869472	6288268	4140752	2737534	1950236
HEB 700	9,52	12144914	7161808	4692296	3125160	2252577
HEB 900	8,89	15202970	9647622	6567965	4374697	3100983
HD 260x54,1	15,89	-	-	-	-	-
HD 260x142	14,74	-	-	-	-	-
HD 260x225	13,85	-	-	-	-	-
HD 320x127	12,92	6412853	3184782	2055355	1296939	846703
HD 320x300	11,72	12754951	5670474	3340989	2215448	1635457
HD 400x237	10,33	12642743	6904876	4496894	2978915	2082442
HD 400x382	9,73	18207596	9413057	5828199	3910676	2878146
HD 400x551	9,18	24373874	12319296	7383038	5003438	3816557
HD 400x818	8,47	34105423	17109388	9971129	6818517	5378512
HD 400x1299	7,54	50005012	25706146	14877655	10344431	8444598
UC 254x254x73	15,73	-	-	-	-	-
UC 254x254x132	14,89	-	-	-	-	-
UC 305x305x97	13,05	5557723	2937268	1948711	1216836	769348
UC 305x305x137	12,71	6996005	3476946	2227385	1417263	938781
UC 305x305x198	12,24	9350422	4373953	2687519	1745102	1217824
UC 356x368x129	11,05	8134078	4865809	3378739	2195588	1434257
UC 356x368x177	10,80	10047437	5675700	3807359	2493593	1686061
UC 356x406x340	9,88	16521364	8649647	5424446	3629176	2637808
UC 356x406x744	8,65	31219912	15690672	9210482	6288797	4923924
UC 356x406x1086	7,92	42136206	21262349	12234277	8404061	6741970

Tabela 66 – Resistência à flambagem da coluna para $L_{\theta} = 2,1$ m.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	$N_{fi,Rd,z}$ [N]			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	4291292	1862257	1227551		
HEB 260	15,38	5178202	2526209	1747415		
HEB 280	14,29	5824791	2961707	2016344		
HEB 300	13,33	6593517	3441979	2308374	1468957	922117

HEB 340	12,55	7997573	4532597	3163234	2033302	1294651
HEB 450	11,11	9881929	5818379	4037244	2720601	1894888
HEB 500	10,67	10716238	6381584	4423581	3025765	2159488
HEB 600	10,00	12059295	7418576	5174200	3622295	2668910
HEB 700	9,52	13532219	8541763	5990600	4265390	3208947
HEB 900	8,89	17019924	11525263	8422054	6046192	4534581
HD 260x54,1	15,89	3696910	2099370	1520120		
HD 260x142	14,74	7124342	3204396	2109911		
HD 260x225	13,85	10260214	4365051	2715099		
HD 320x127	12,92	7053694	3700865	2461350	1592578	1029772
HD 320x300	11,72	13889932	6523744	3961511	2676163	1951452
HD 400x237	10,33	13462166	7531271	4987223	3353367	2348503
HD 400x382	9,73	19320001	10238739	6451215	4384253	3223399
HD 400x551	9,18	25775921	13344287	8142589	5578926	4243887
HD 400x818	8,47	35915431	18415440	10925747	7537362	5922024
HD 400x1299	7,54	52315030	27380805	16102887	11265175	9158853
UC 254x254x73	15,73	4529696	2308459	1622998		
UC 254x254x132	14,89	6817131	3089492	2049724		
UC 305x305x97	13,05	6116733	3399848	2323365	1490494	937307
UC 305x305x137	12,71	7666082	4015662	2646993	1725002	1133526
UC 305x305x198	12,24	10206935	5035682	3181840	2109451	1457456
UC 356x368x129	11,05	8719274	5342229	3778197	2501963	1642995
UC 356x368x177	10,80	10757036	6235247	4260387	2840358	1927032
UC 356x406x340	9,88	17542694	9413722	6006345	4072102	2958603
UC 356x406x744	8,65	32904612	16911589	10106997	6965521	5433623
UC 356x406x1086	7,92	44182333	22728290	13297081	9196967	7345361

Tabela 67 – Resistência à flambagem da coluna para $L_{\theta} = 1,5$ m.

Perfis	Am/V [m^{-1}]	20 °C	$N_{fi,Rd,z}$ [N]			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	4631144	2120669	1419969		
HEB 260	15,38	5539970	2801641	1964798		
HEB 280	14,29	6191323	3241438	2236030		
HEB 300	13,33	6970817	3729582	2532305	1627738	1015610
HEB 340	12,55	8454642	4891044	3458014	2249107	1430412
HEB 450	11,11	10466548	6312853	4463738	3066322	2152157
HEB 500	10,67	11357573	6937370	4912400	3435475	2479102
HEB 600	10,00	12804385	8100721	5801858	4180858	3139436
HEB 700	9,52	14397305	9373261	6787818	5009495	3871265
HEB 900	8,89	18147980	12656511	9563710	7154332	5572155
HD 260x54,1	15,89	3968585	2324218	1711894		
HD 260x142	14,74	7601359	3549313	2365202		
HD 260x225	13,85	10903830	4811714	3028108		
HD 320x127	12,92	7458746	4013738	2705927	1771127	1140139
HD 320x300	11,72	14615956	7043405	4335661	2953734	2141849
HD 400x237	10,33	13935500	7931167	5294396	3584753	2512669
HD 400x382	9,73	19875196	10767689	6842295	4677906	3437674
HD 400x551	9,18	26353472	14004462	8621240	5937542	4510886
HD 400x818	8,47	36428797	19263863	11531802	7989232	6265164
HD 400x1299	7,54	52380175	28359037	16892849	11854138	9618123
UC 254x254x73	15,73	4866194	2573080	1838155		
UC 254x254x132	14,89	7286188	3434447	2307714		
UC 305x305x97	13,05	6469826	3680745	2549122	1655676	1038589
UC 305x305x137	12,71	8091472	4343123	2899922	1910549	1250853
UC 305x305x198	12,24	10753194	5438543	3479967	2328973	1601817
UC 356x368x129	11,05	9101580	5643992	4026458	2689597	1770422
UC 356x368x177	10,80	11221411	6589410	4541767	3052786	2074337
UC 356x406x340	9,88	18068957	9902852	6371484	4346548	3157440

UC 356x406x744	8,65	33429078	17703224	10675190	7390029	5754622
UC 356x406x1086	7,92	44438798	23685451	13978612	9701118	7731110

Tabela 68 – Resistência à flambagem da coluna para $L_0 = 4,0$ m.

Comprimento de Flambagem 4,0 m						
Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	$N_{fi,Rd,z}$ [N]			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	-	-	-	-	-
HEB 260	15,38	-	-	-	-	-
HEB 280	14,29	-	-	-	-	-
HEB 300	13,33	5270326	2405207	1513106	917211	592658
HEB 340	12,55	6394952	3238790	2110344	1280152	819565
HEB 450	11,11	7821156	4037355	2547215	1577245	1065678
HEB 500	10,67	8451712	4382904	2734432	1703765	1167708
HEB 600	10,00	9416730	4978134	3064509	1922840	1335455
HEB 700	9,52	10450837	5590419	3400147	2144068	1502354
HEB 900	8,89	12985746	7515439	4739958	2975209	2036803
HD 260x54,1	15,89	-	-	-	-	-
HD 260x142	14,74	-	-	-	-	-
HD 260x225	13,85	-	-	-	-	-
HD 320x127	12,92	5632390	2573625	1596261	977966	645471
HD 320x300	11,72	11382373	4648120	2627487	1702524	1275899
HD 400x237	10,33	11683218	6146273	3898245	2522803	1758630
HD 400x382	9,73	16913918	8415638	5067800	3332982	2456873
HD 400x551	9,18	22754693	11086663	6456961	4300728	3294717
HD 400x818	8,47	32034025	15551905	8811026	5941434	4716275
HD 400x1299	7,54	47399465	23743997	13405596	9230915	7584397
UC 254x254x73	15,73	-	-	-	-	-
UC 254x254x132	14,89	-	-	-	-	-
UC 305x305x97	13,05	4876732	2386801	1521824	920128	585334
UC 305x305x137	12,71	6181671	2834222	1746668	1079482	721798
UC 305x305x198	12,24	8312429	3581692	2117738	1339976	946552
UC 356x368x129	11,05	7440647	4286143	2891163	1825218	1183076
UC 356x368x177	10,80	9208321	4994666	3254473	2074256	1395483
UC 356x406x340	9,88	15331973	7726139	4714182	3089008	2246538
UC 356x406x744	8,65	29288347	14231848	8120011	5462743	4302350
UC 356x406x1086	7,92	39816721	19533534	10951418	7441307	6011947

Tabela 69 – Resistência à flambagem da coluna para $L_0 = 2,8$ m.

Comprimento de Flambagem 2,8 m						
Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	$N_{fi,Rd,z}$ [N]			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	-	-	-	-	-
HEB 260	15,38	-	-	-	-	-
HEB 280	14,29	5373453	2604790	1735276	-	-
HEB 300	13,33	6133894	3077750	2022353	1265801	802556
HEB 340	12,55	7440856	4080702	2787347	1757180	1120956
HEB 450	11,11	9167056	5191370	3491556	2281065	1569810
HEB 500	10,67	9930983	5675625	3798273	2507916	1760200
HEB 600	10,00	11143701	6549320	4373796	2929214	2101510
HEB 700	9,52	12465085	7479585	4981151	3365745	2446376
HEB 900	8,89	15622819	10079787	6979241	4723371	3383933
HD 260x54,1	15,89	-	-	-	-	-
HD 260x142	14,74	-	-	-	-	-
HD 260x225	13,85	-	-	-	-	-
HD 320x127	12,92	6560069	3304285	2148726	1364229	888555

HD 320x300	11,72	13014425	5868192	3484123	2321071	1708215
HD 400x237	10,33	12827379	7048200	4609890	3065541	2144012
HD 400x382	9,73	18457597	9601701	5971676	4020142	2957932
HD 400x551	9,18	24688164	12552921	7557717	5136279	3915119
HD 400x818	8,47	34509861	17405896	10190051	6983982	5503423
HD 400x1299	7,54	50518653	26083576	15156791	10554930	8607519
UC 254x254x73	15,73	-	-	-	-	-
UC 254x254x132	14,89	-	-	-	-	-
UC 305x305x97	13,05	5686172	3044422	2034996	1279198	807718
UC 305x305x137	12,71	7149676	3601755	2324116	1487595	983435
UC 305x305x198	12,24	9546481	4527285	2801588	1828609	1272947
UC 356x368x129	11,05	8266567	4975165	3471017	2266569	1482627
UC 356x368x177	10,80	10207954	5804172	3912030	2573930	1741897
UC 356x406x340	9,88	16751014	8824271	5558470	3731577	2711967
UC 356x406x744	8,65	31596593	15968098	9416217	6444678	5041170
UC 356x406x1086	7,92	42591926	21593590	12476992	8585787	6879949

Tabela 70 – Resistência à flambagem da coluna para $L_{\theta} = 2,0$ m.

Perfis	$\frac{Am}{V}$ [m ⁻¹]	20 °C	Comprimento de Flambagem 2,0 m			
			$N_{fi,Rd,z}$ [N]			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	4349447	1907188	1260961		
HEB 260	15,38	5239745	2573931	1785186		
HEB 280	14,29	5886840	3009938	2054407		
HEB 300	13,33	6657116	3491313	2347024	1496461	938279
HEB 340	12,55	8074614	4593930	3214033	2070663	1318146
HEB 450	11,11	9980620	5903261	4111070	2780686	1939620
HEB 500	10,67	10824560	6477093	4508306	3097002	2215037
HEB 600	10,00	12185324	7536066	5283214	3719311	2750282
HEB 700	9,52	13678774	8685294	6129206	4394135	3322325
HEB 900	8,89	17211352	11720596	8620557	6237455	4710408
HD 260x54,1	15,89	3743237	2138308	1553447		
HD 260x142	14,74	7205329	3264135	2154249		
HD 260x225	13,85	10369154	4442289	2769409		
HD 320x127	12,92	7121982	3754561	2503600	1623537	1048885
HD 320x300	11,72	14011844	6612691	4026022	2724183	1984321
HD 400x237	10,33	13552070	7598464	5039172	3392707	2376431
HD 400x382	9,73	19442482	10327517	6517307	4434109	3259766
HD 400x551	9,18	25930820	13454901	8223368	5639695	4289087
HD 400x818	8,47	36116244	18557221	11027768	7613689	5979897
HD 400x1299	7,54	52380175	27564484	16235204	11364073	9235845
UC 254x254x73	15,73	4587106	2354367	1660405		
UC 254x254x132	14,89	6896868	3149299	2094557		
UC 305x305x97	13,05	6176274	3448007	2362332	1519127	954851
UC 305x305x137	12,71	7737692	4071771	2690622	1757138	1153822
UC 305x305x198	12,24	10298751	5104651	3233227	2147432	1482391
UC 356x368x129	11,05	8783053	5393067	3820309	2533989	1664779
UC 356x368x177	10,80	10834467	6294926	4308128	2876611	1952197
UC 356x406x340	9,88	17655070	9495836	6068061	4118711	2992367
UC 356x406x744	8,65	33091367	17043955	10202700	7037279	5487809
UC 356x406x1086	7,92	44410280	22888504	13411431	9281791	7410148

ANEXO B

Método Avançado de Cálculo – ANSYS *Mechanical* APDL

ANEXO B - RESULTADOS ANSYS

B.1 - Temperatura Média dos Banzos

Tabela 71 – Temperatura média dos banzos - ANSYS.

Perfis	Am/V [m^{-1}]	$\theta_{f,t,ANSYS}$ [°C]			
		1800 s - R30	3600 s - R60	5400 s - R90	7200 s - R120
HEB 240	16,67	663,8	878,5		
HEB 260	15,38	659,9	874,8		
HEB 280	14,29	649,7	868,4		
HEB 300	13,33	646,9	864,9	963,1	1019,3
HEB 340	12,55	631,8	853,9	958,8	1015,8
HEB 450	11,11	605,1	832,4	950,2	1009,3
HEB 500	10,67	594,9	824,2	947,3	1007,2
HEB 600	10,00	584,6	815,7	943,8	1004,8
HEB 700	9,52	574,0	806,9	939,6	1001,9
HEB 900	8,89	559,9	795,2	933,9	998,6
HD 260x54,1	15,89	705,6	894,2		
HD 260x142	14,74	606,7	838,5		
HD 260x225	13,85	535,7	780,7		
HD 320x127	12,92	637,9	858,8	960,9	1017,5
HD 320x300	11,72	504,9	756,8	913,5	993,6
HD 400x237	10,33	572,4	809,7	943,3	1005,9
HD 400x382	9,73	490,8	748,3	903,0	987,5
HD 400x551	9,18	429,3	701,8	847,0	958,8
HD 400x818	8,47	368,3	644,7	785,4	902,4
HD 400x1299	7,54	310,4	575,4	721,8	828,8
UC 254x254x73	15,73	677,9	883,4		
UC 254x254x132	14,89	612,1	842,6		
UC 305x305x97	13,05	667,5	876,0	966,1	1020,7
UC 305x305x137	12,71	627,1	850,7	957,9	1015,6
UC 305x305x198	12,24	573,4	809,5	944,8	1008,2
UC 356x368x129	11,05	652,7	867,6	961,8	1017,0
UC 356x368x177	10,80	611,3	839,7	953,4	1011,6
UC 356x406x340	9,88	511,4	762,9	916,7	993,4
UC 356x406x744	8,65	382,6	659,3	799,8	918,7
UC 356x406x1086	7,92	329,8	601,1	745,0	854,4

B.2 - Temperatura Média do Alma

Tabela 72 – Temperatura média da alma - ANSYS.

Perfis	Am/V [m^{-1}]	$\theta_{w,t,ANSYS}$ [°C]			
		1800 s - R30	3600 s - R60	5400 s - R90	7200 s - R120
HEB 240	16,67	316,3	556,8		
HEB 260	15,38	291,4	515,8		
HEB 280	14,29	260,0	472,5		
HEB 300	13,33	251,9	447,2	598,7	707,7
HEB 340	12,55	224,1	403,0	550,6	660,3
HEB 450	11,11	173,4	318,5	444,8	551,2
HEB 500	10,67	156,2	291,3	407,0	510,7
HEB 600	10,00	132,4	252,5	351,0	446,7
HEB 700	9,52	116,1	225,4	314,4	402,1
HEB 900	8,89	93,5	185,7	263,6	338,1
HD 260x54,1	15,89	287,0	492,4		

HD 260x142	14,74	283,2	520,1		
HD 260x225	13,85	260,4	512,7		
HD 320x127	12,92	236,7	423,4	573,2	682,9
HD 320x300	11,72	206,8	428,3	582,8	705,9
HD 400x237	10,33	201,0	383,4	520,6	627,8
HD 400x382	9,73	178,3	376,8	514,6	633,3
HD 400x551	9,18	155,6	354,0	495,8	613,7
HD 400x818	8,47	127,8	314,3	463,9	572,1
HD 400x1299	7,54	97,4	261,4	411,1	522,4
UC 254x254x73	15,73	290,2	509,4		
UC 254x254x132	14,89	285,9	522,8		
UC 305x305x97	13,05	244,8	425,3	567,8	675,3
UC 305x305x137	12,71	242,4	437,0	588,8	698,3
UC 305x305x198	12,24	230,6	439,9	596,7	710,7
UC 356x368x129	11,05	210,5	365,1	488,1	587,7
UC 356x368x177	10,80	207,4	376,4	510,2	614,2
UC 356x406x340	9,88	184,7	380,4	518,2	634,2
UC 356x406x744	8,65	134,6	325,0	473,2	583,0
UC 356x406x1086	7,92	107,7	280,4	431,1	540,5

B.3 - Temperatura Média e Redução do Concreto

Tabela 73 – Temperatura média do concreto dentro da isotérmica de 500 °C - ANSYS.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	$\theta_{c,500,t,ANSYS}$ [°C]			
		1800 s - R30	3600 s - R60	5400 s - R90	7200 s - R120
HEB 240	16,67	248,1	400,1		
HEB 260	15,38	233,6	367,5		
HEB 280	14,29	209,4	330,9		
HEB 300	13,33	203,3	310,2	410,8	475,4
HEB 340	12,55	193,0	290,9	388,0	455,6
HEB 450	11,11	173,1	256,9	336,8	402,6
HEB 500	10,67	166,6	246,5	319,4	383,1
HEB 600	10,00	157,7	232,7	294,9	353,1
HEB 700	9,52	153,1	224,6	283,1	335,1
HEB 900	8,89	144,8	210,7	264,1	309,7
HD 260x54,1	15,89	229,2	357,0		
HD 260x142	14,74	230,7	370,3		
HD 260x225	13,85	225,6	369,2		
HD 320x127	12,92	197,2	299,1	397,8	464,3
HD 320x300	11,72	189,9	302,7	404,9	471,1
HD 400x237	10,33	163,1	246,7	322,5	391,2
HD 400x382	9,73	156,4	244,6	322,1	391,4
HD 400x551	9,18	147,6	240,6	318,8	388,4
HD 400x818	8,47	136,8	232,4	310,2	381,6
HD 400x1299	7,54	125,7	219,4	297,2	370,8
UC 254x254x73	15,73	232,5	366,9		
UC 254x254x132	14,89	231,9	373,3		
UC 305x305x97	13,05	197,4	296,1	392,6	458,9
UC 305x305x137	12,71	197,0	300,3	399,4	464,4
UC 305x305x198	12,24	194,8	301,6	401,4	466,5
UC 356x368x129	11,05	168,1	248,2	322,6	389,7
UC 356x368x177	10,80	167,5	250,9	328,3	397,5
UC 356x406x340	9,88	158,7	245,8	322,1	391,2
UC 356x406x744	8,65	139,5	234,7	312,5	383,4
UC 356x406x1086	7,92	129,4	224,5	302,3	375,5

Tabela 74 – Redução vertical do concreto de acordo com a isotérmica de 500 °C - ANSYS.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	$b_{c,fi,v,ANSYS}$ [mm]			
		1800 s - R30	3600 s - R60	5400 s - R90	7200 s - R120
HEB 240	16,67	6,67	30,00		
HEB 260	15,38	4,17	26,67		
HEB 280	14,29	5,00	25,00		
HEB 300	13,33	5,00	23,33	45,00	83,60
HEB 340	12,55	3,33	23,33	41,67	76,78
HEB 450	11,11	3,33	21,67	40,00	68,91
HEB 500	10,67	3,33	20,00	40,00	67,33
HEB 600	10,00	3,33	20,00	38,33	65,76
HEB 700	9,52	3,33	20,00	38,33	65,76
HEB 900	8,89	3,33	18,33	36,67	64,50
HD 260x54,1	15,89	10,00	28,33		
HD 260x142	14,74	5,00	25,00		
HD 260x225	13,85	3,33	21,67		
HD 320x127	12,92	3,33	23,33	43,33	78,57
HD 320x300	11,72	3,33	16,67	38,33	80,18
HD 400x237	10,33	3,33	18,33	33,33	51,58
HD 400x382	9,73	1,67	13,33	30,00	48,33
HD 400x551	9,18	0,00	10,00	25,00	43,33
HD 400x818	8,47	0,00	3,33	20,00	36,67
HD 400x1299	7,54	0,00	1,67	11,67	28,33
UC 254x254x73	15,73	8,34	28,33		
UC 254x254x132	14,89	5,00	25,00		
UC 305x305x97	13,05	6,67	25,00	43,33	75,48
UC 305x305x137	12,71	5,00	23,33	43,33	77,14
UC 305x305x198	12,24	3,33	20,00	41,67	78,80
UC 356x368x129	11,05	5,00	21,67	36,67	54,73
UC 356x368x177	10,80	5,00	20,00	36,67	54,73
UC 356x406x340	9,88	1,67	15,00	30,00	50,00
UC 356x406x744	8,65	0,00	6,67	21,67	38,33
UC 356x406x1086	7,92	0,00	5,00	15,00	31,67

Tabela 75 – Redução horizontal do concreto de acordo com a isotérmica de 500 °C - ANSYS.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	$b_{c,fi,h,ANSYS}$ [mm]			
		1800 s - R30	3600 s - R60	5400 s - R90	7200 s - R120
HEB 240	16,67	11,67	28,33		
HEB 260	15,38	11,67	26,67		
HEB 280	14,29	11,67	25,00		
HEB 300	13,33	11,67	25,00	38,33	62,66
HEB 340	12,55	11,67	23,33	36,67	54,73
HEB 450	11,11	11,67	23,33	33,33	45,00
HEB 500	10,67	11,67	23,33	33,33	43,33
HEB 600	10,00	11,67	23,33	31,67	41,67
HEB 700	9,52	11,67	23,33	31,67	40,00
HEB 900	8,89	11,67	23,33	31,67	40,00
HD 260x54,1	15,89	11,67	26,67		
HD 260x142	14,74	11,67	26,67		
HD 260x225	13,85	11,67	25,00		
HD 320x127	12,92	11,67	23,33	36,67	57,91
HD 320x300	11,72	11,67	23,33	36,67	57,91
HD 400x237	10,33	11,67	23,33	33,33	45,00
HD 400x382	9,73	11,67	23,33	33,33	45,00
HD 400x551	9,18	11,67	23,33	33,33	43,33
HD 400x818	8,47	11,67	23,33	33,33	43,33
HD 400x1299	7,54	10,00	23,33	33,33	41,667

UC 254x254x73	15,73	11,67	26,67		
UC 254x254x132	14,89	11,67	26,67		
UC 305x305x97	13,05	11,67	25,00	36,67	56,332
UC 305x305x137	12,71	11,67	23,33	36,67	57,915
UC 305x305x198	12,24	11,67	23,33	36,67	57,915
UC 356x368x129	11,05	11,67	23,33	33,33	46,667
UC 356x368x177	10,80	11,67	23,33	33,33	46,667
UC 356x406x340	9,88	11,67	23,33	33,33	45,000
UC 356x406x744	8,65	11,67	23,33	33,33	43,334
UC 356x406x1086	7,92	10,00	23,33	33,33	43,334

B.4 - Temperatura Média dos Reforços

Tabela 76 – Temperatura média dos reforços - ANSYS.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	$\theta_{s,t,ANSYS}$ [°C]			
		1800 s - R30	3600 s - R60	5400 s - R90	7200 s - R120
HEB 240	16,67	148,3	378,4		
HEB 260	15,38	135,8	342,9		
HEB 280	14,29	122,4	319,7		
HEB 300	13,33	130,3	317,4	466,3	582,2
HEB 340	12,55	120,1	295,2	438,9	551,9
HEB 450	11,11	118,0	290,3	430,6	539,9
HEB 500	10,67	117,1	288,5	428,3	536,9
HEB 600	10,00	116,4	287,1	426,6	534,6
HEB 700	9,52	115,8	286,2	425,8	534,0
HEB 900	8,89	107,9	267,7	403,6	510,1
HD 260x54,1	15,89	141,6	345,2		
HD 260x142	14,74	130,9	338,0		
HD 260x225	13,85	125,0	328,4		
HD 320x127	12,92	129,3	315,1	462,5	577,3
HD 320x300	11,72	118,4	295,2	445,6	565,9
HD 400x237	10,33	113,7	273,4	404,6	510,3
HD 400x382	9,73	108,5	261,6	391,3	498,6
HD 400x551	9,18	104,8	251,4	379,1	485,9
HD 400x818	8,47	101,2	239,7	364,6	468,8
HD 400x1299	7,54	98,0	227,3	348,2	449,3
UC 254x254x73	15,73	139,0	347,6		
UC 254x254x132	14,89	132,0	341,6		
UC 305x305x97	13,05	132,1	318,0	462,9	575,7
UC 305x305x137	12,71	128,1	312,5	460,0	575,4
UC 305x305x198	12,24	123,3	304,2	453,1	571,0
UC 356x368x129	11,05	120,2	285,6	417,1	520,6
UC 356x368x177	10,80	116,6	279,8	412,6	518,3
UC 356x406x340	9,88	109,8	264,7	394,9	502,0
UC 356x406x744	8,65	102,1	242,5	368,2	473,1
UC 356x406x1086	7,92	99,0	231,2	353,8	455,9

B.5 - Distribuição da Temperatura nas Seções

Tabela 77 – Temperaturas em HEB 240 e HEB 260 para R30, R60, R90 e R120.

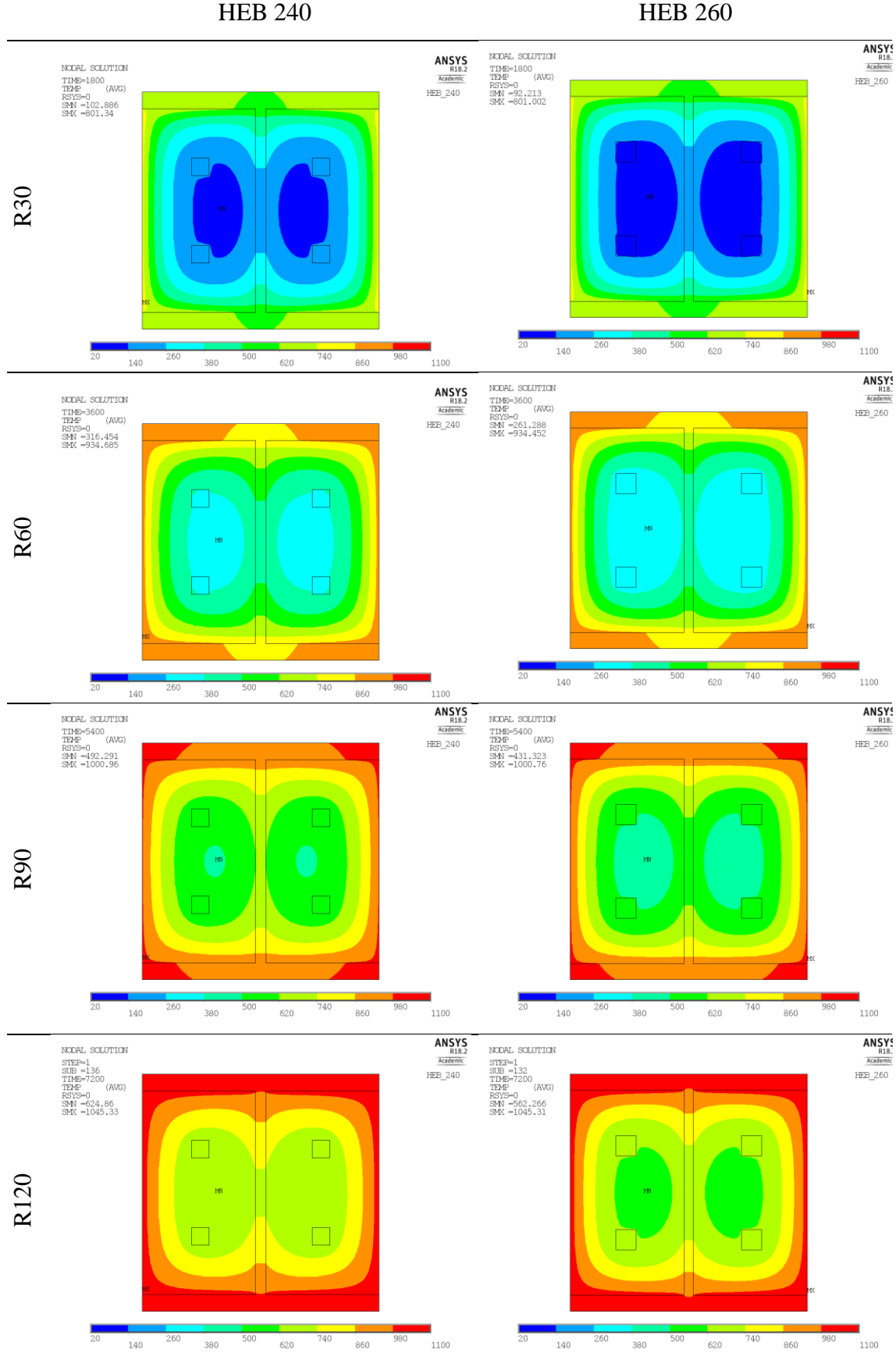


Tabela 78 – Temperaturas em HEB 280 e HEB 300, para R30, R60, R90 e R120.

HEB 280

HEB 300

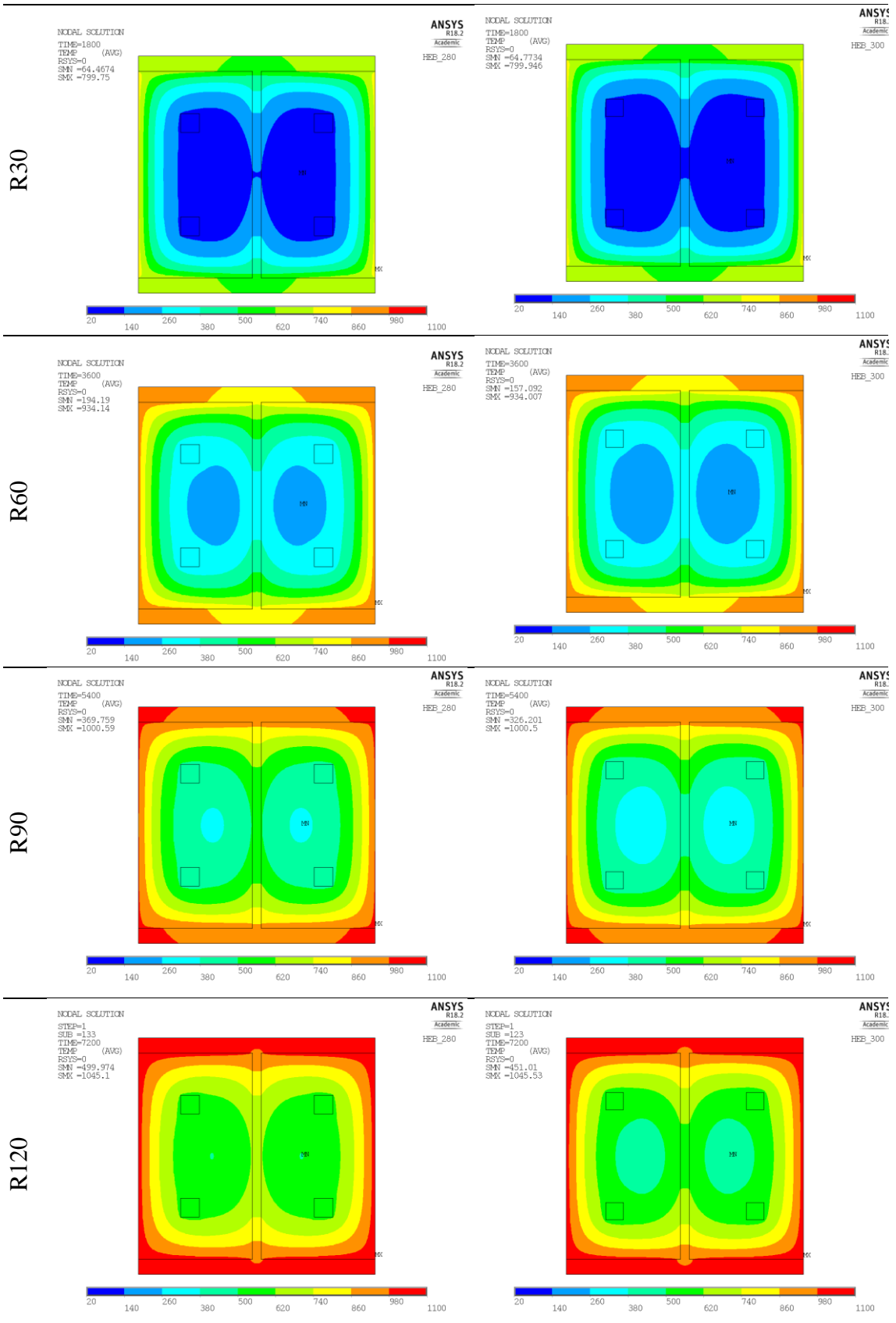


Tabela 79 – Temperaturas em HEB 340 e HEB 450, para R30, R60, R90 e R120.

HEB 340

HEB 450

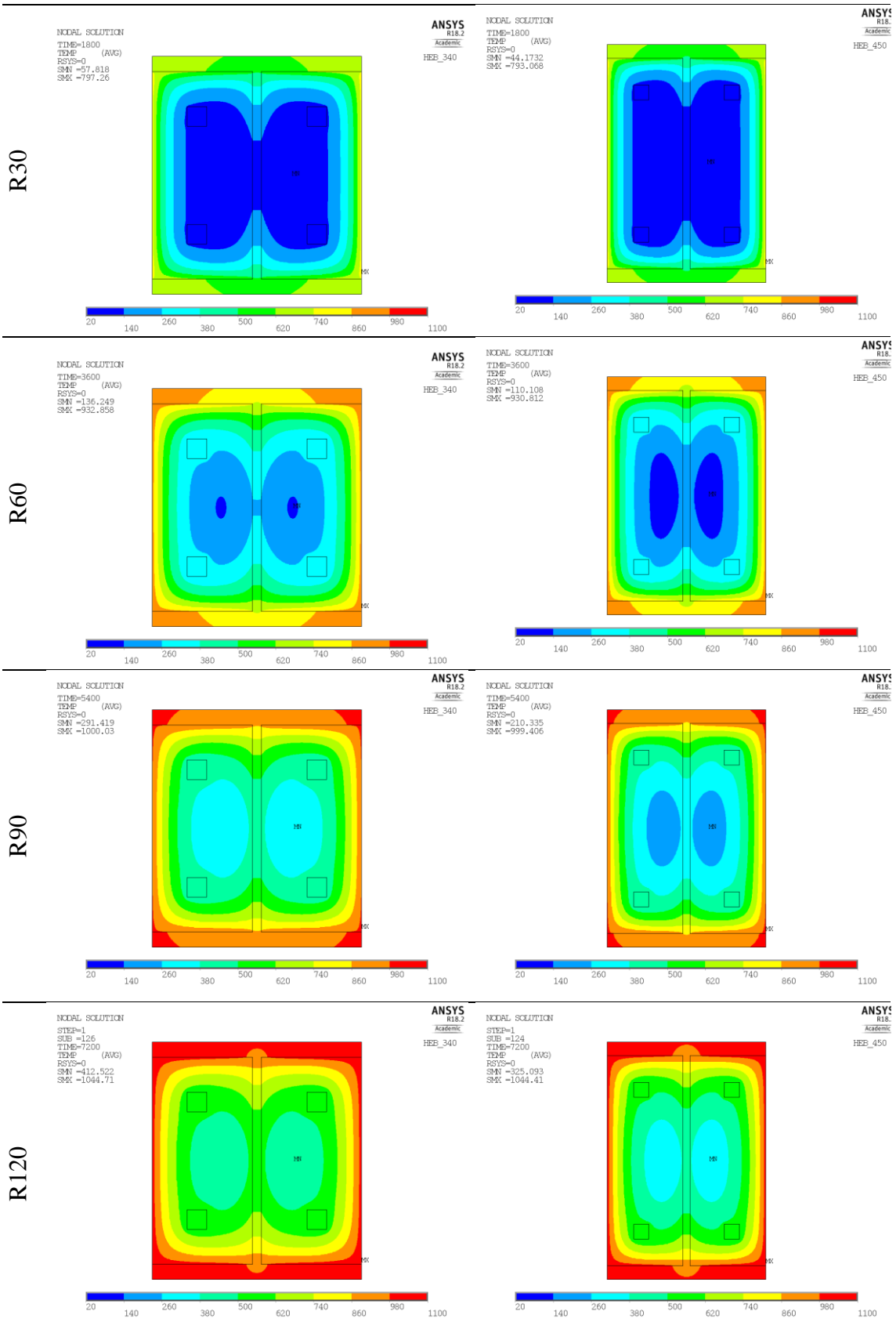


Tabela 80 – Temperaturas em HEB 500 e HEB 600, para R30, R60, R90 e R120.

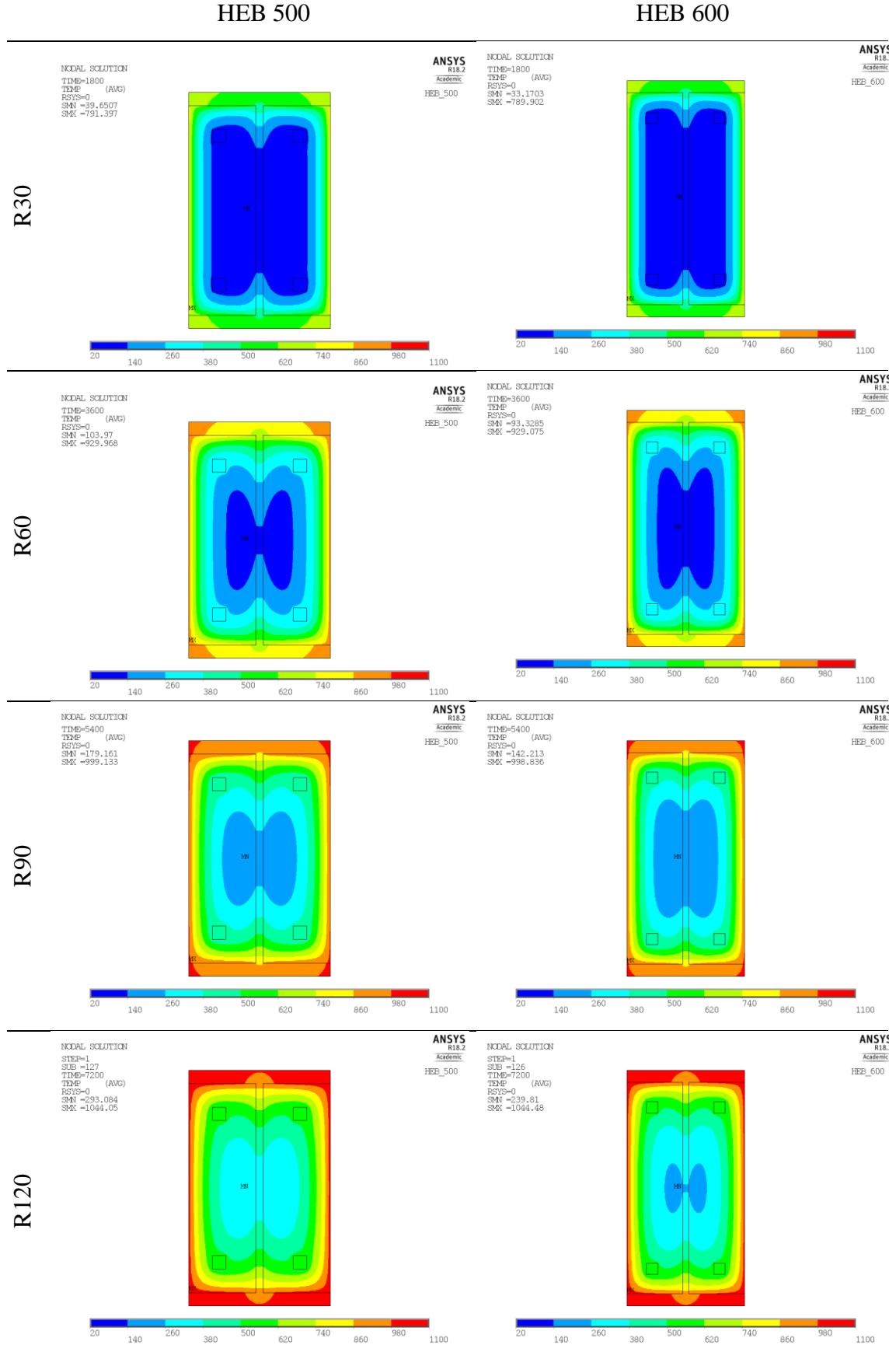


Tabela 81 – Temperaturas em HEB 700 e HEB 900, para R30, R60, R90 e R120.

HEB 700

HEB 900

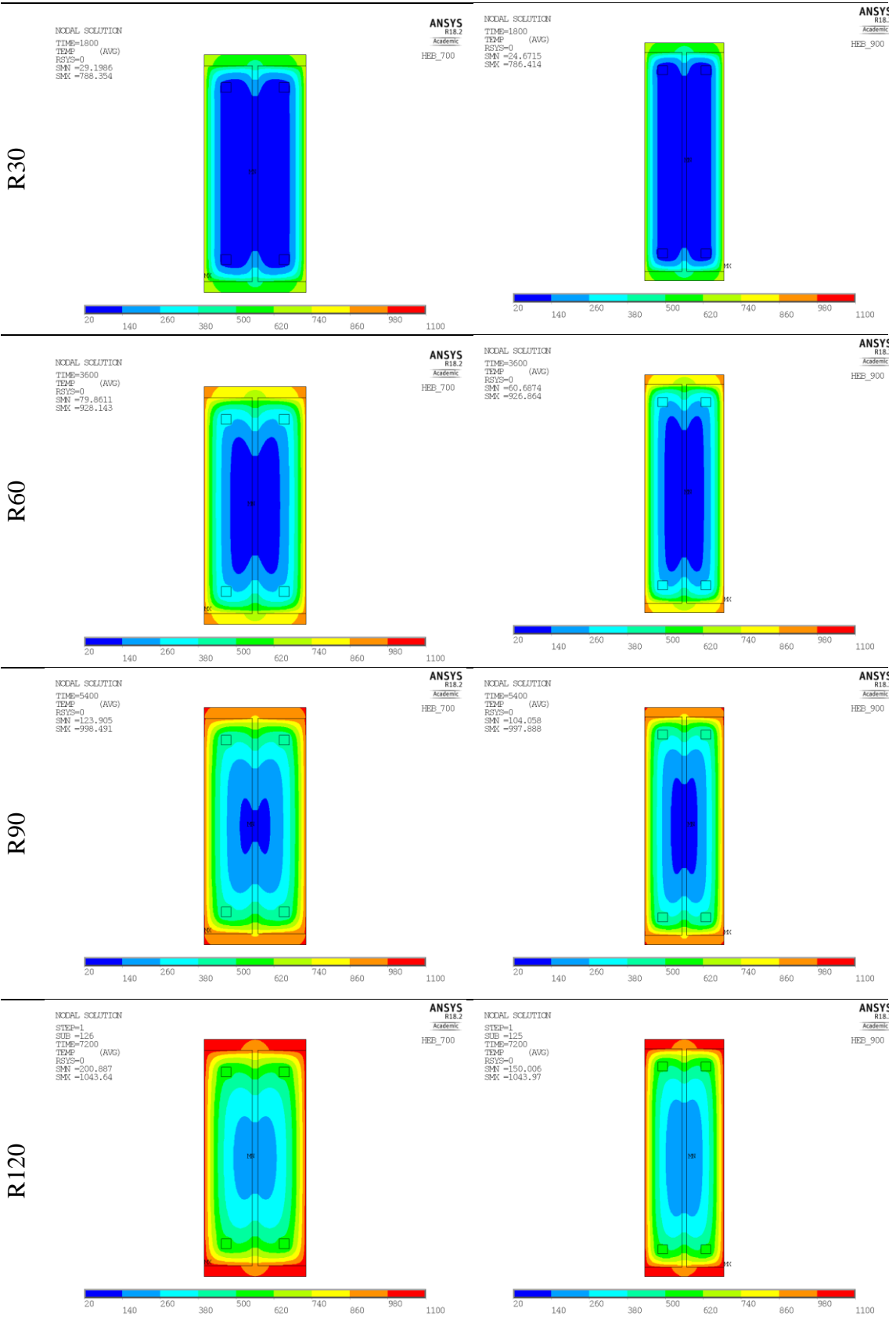


Tabela 82 – Temperaturas em HD 260x54.1 e HD 260x142, para R30, R60, R90 e R120.

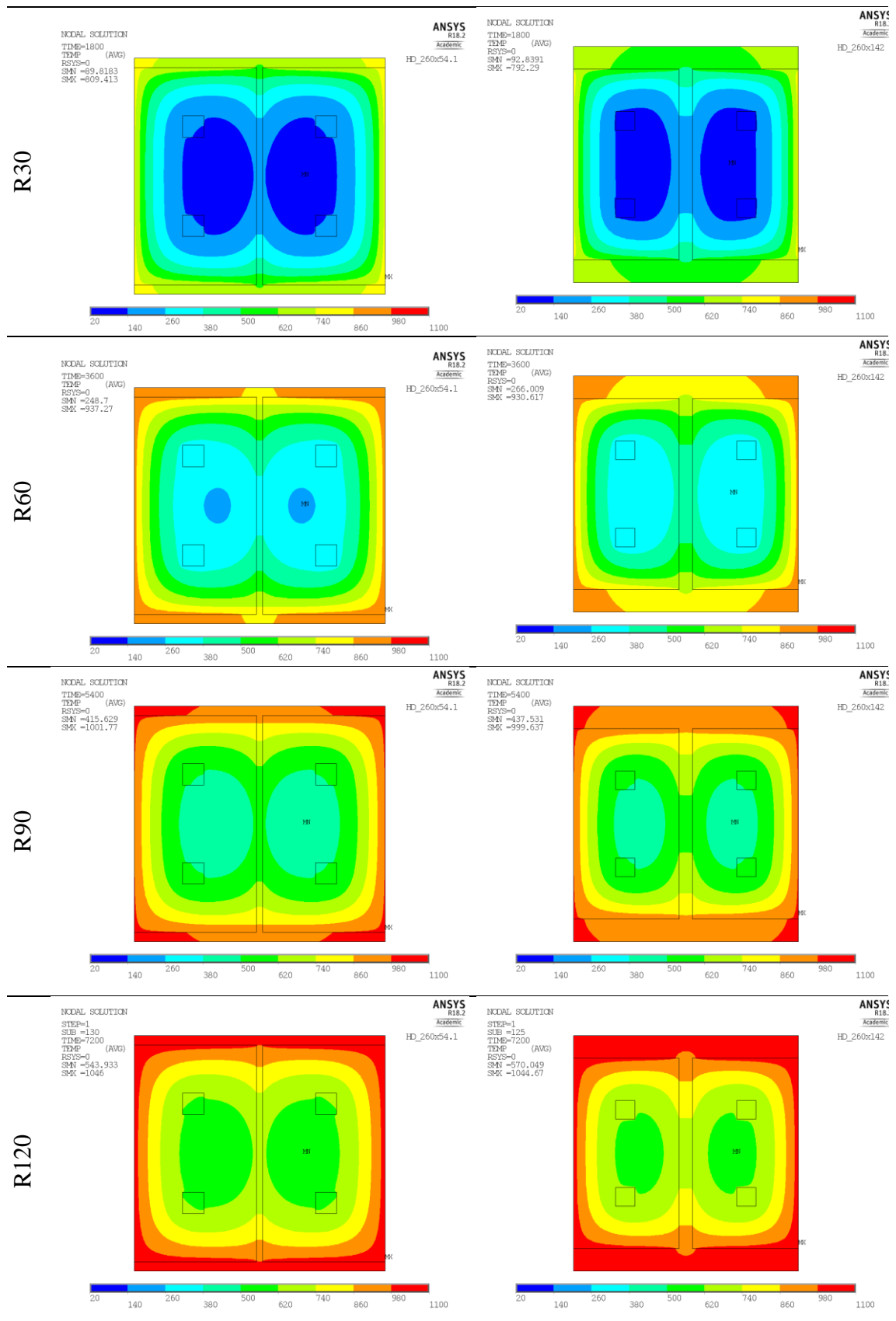


Tabela 83 – Temperaturas em HD 260x225 e HD 320x127, para R30, R60, R90 e R120.

HD 260x225

HD 320x127

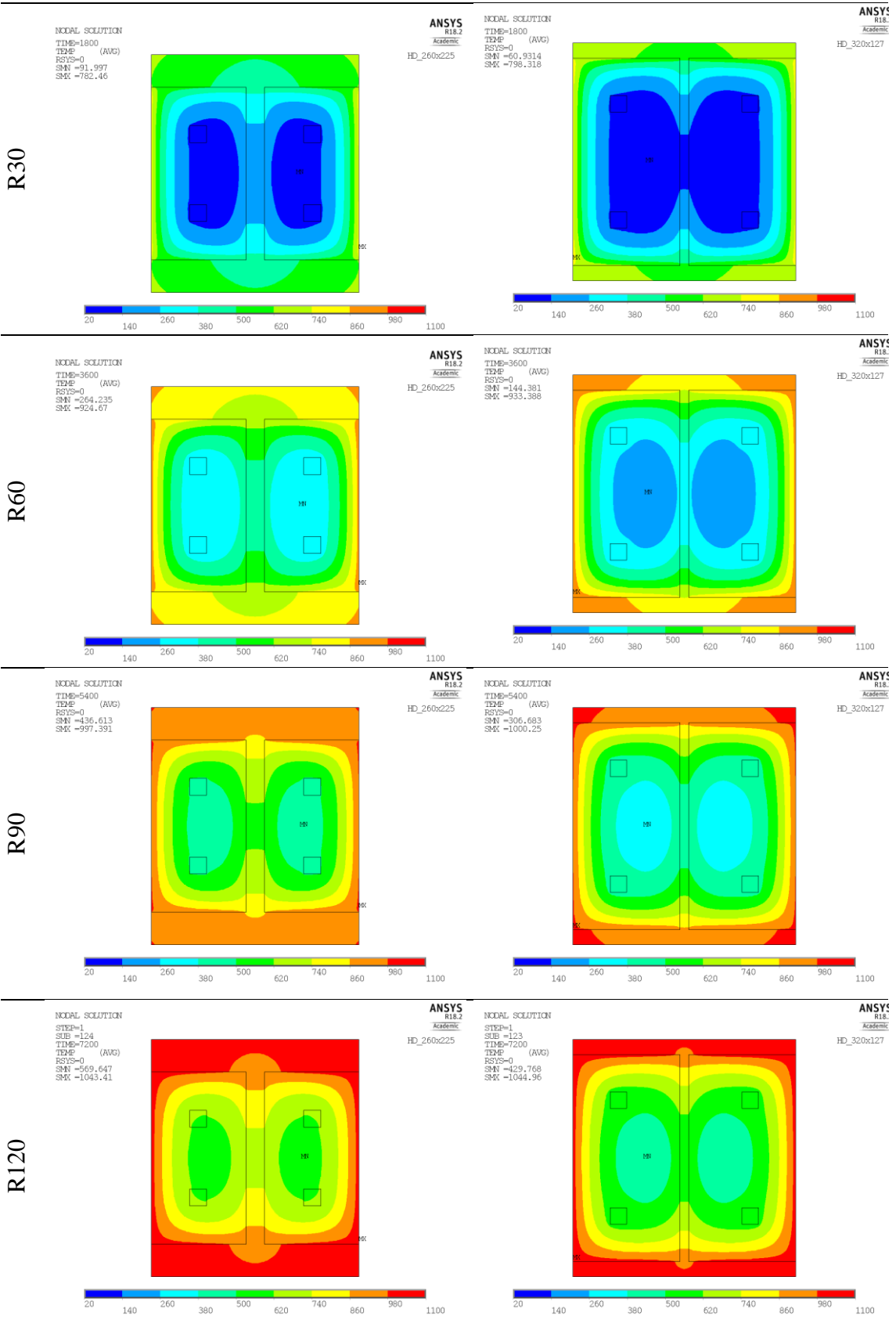


Tabela 84 – Temperaturas em HD 320x300 e HD 400x237, para R30, R60, R90 e R120.
 HD 320x300 HD 400x237

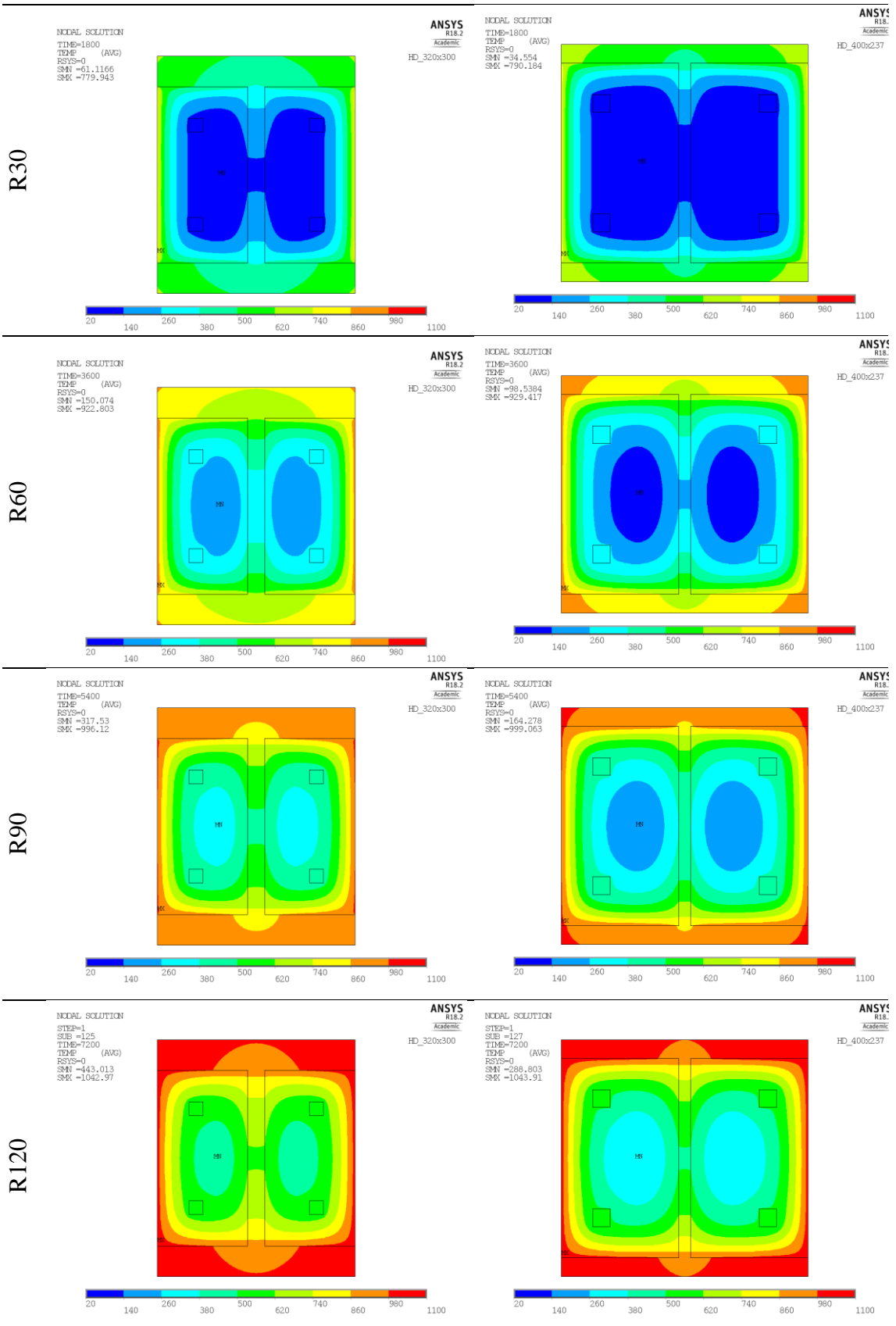


Tabela 85 – Temperaturas em HD 400x382 e HD 400x551, para R30, R60, R90 e R120.

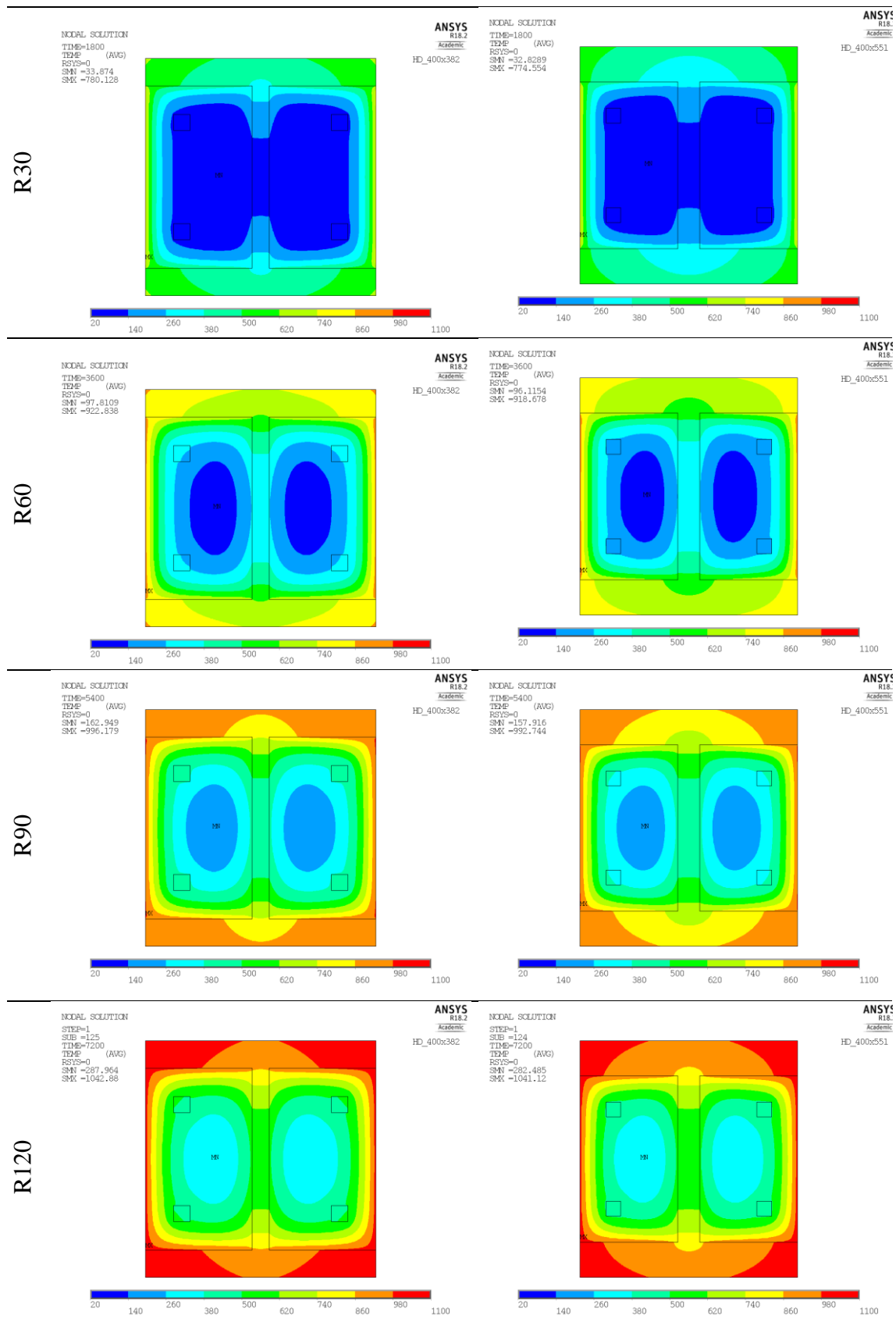


Tabela 86 – Temperaturas em HD 400x818 e HD 400x1299, para R30, R60, R90 e R120.

HD 400x818

HD 400x1299

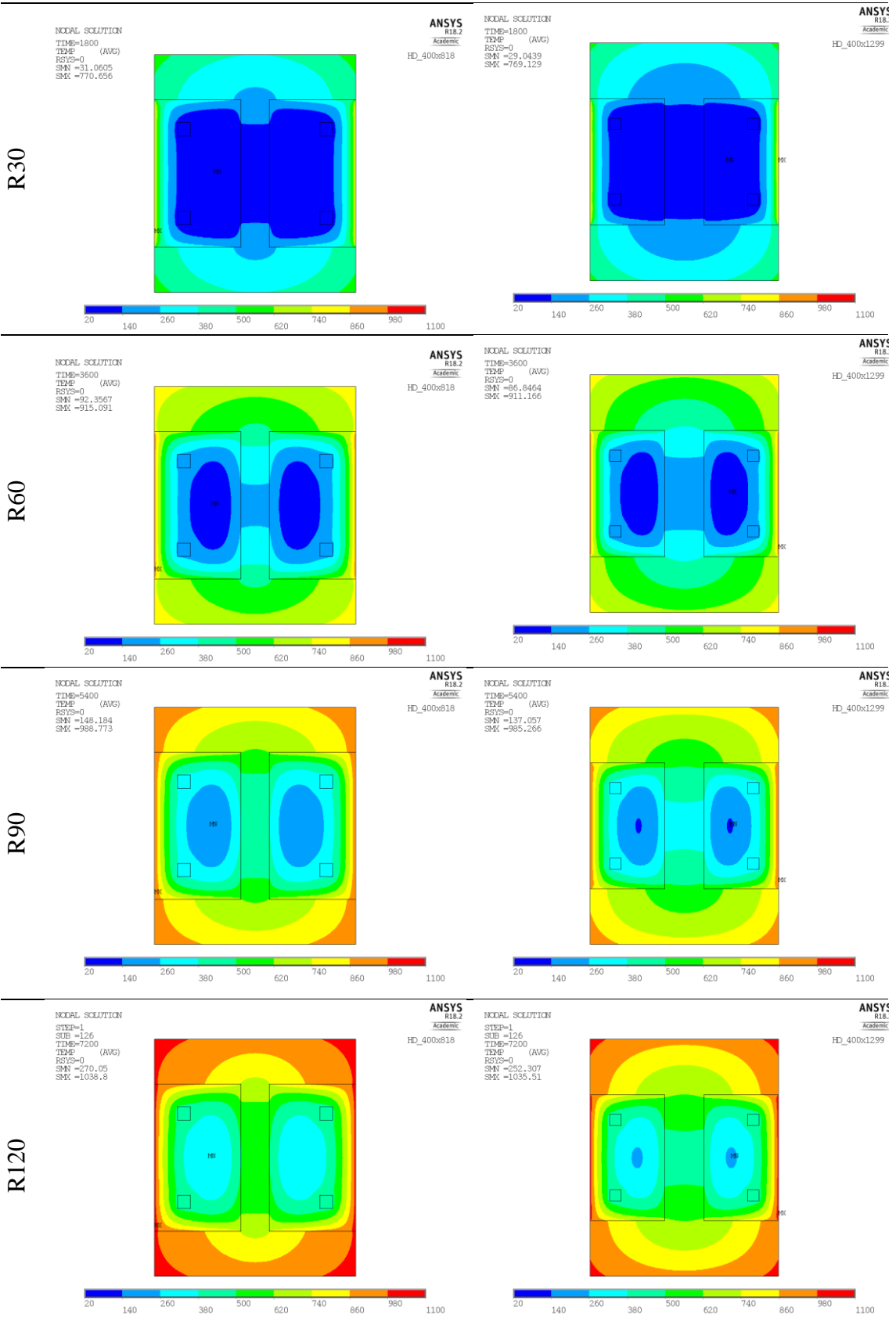


Tabela 87 – Temperaturas em UC 254x254x73 e UC 254x254x132, para R30, R60, R90 e R120.

UC 254x254x73

UC 254x254x132

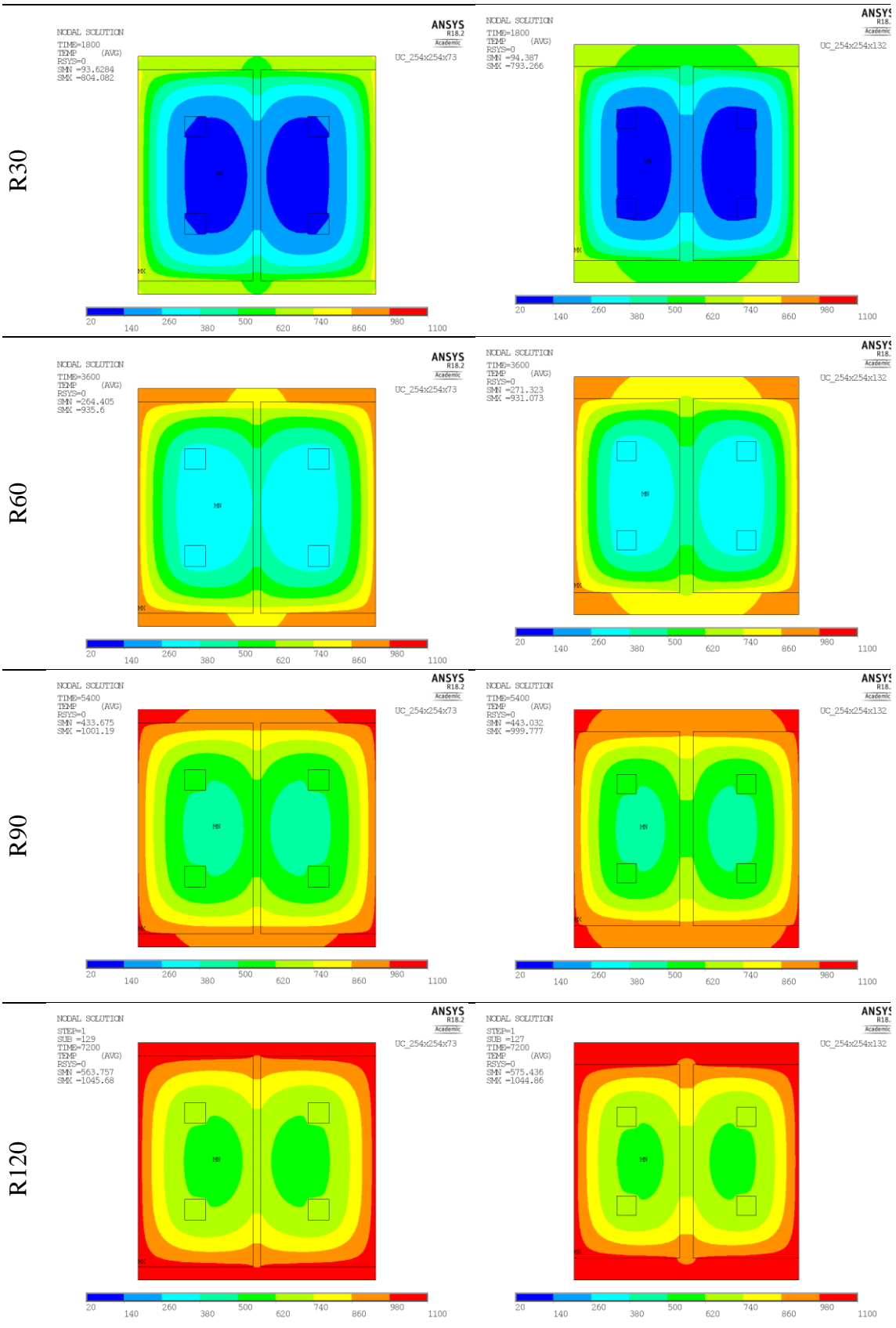


Tabela 88 – Temperaturas em UC 305x305x97 e UC 305x305x137, para R30, R60, R90 e R120.
 UC 305x305x97 UC 305x305x137

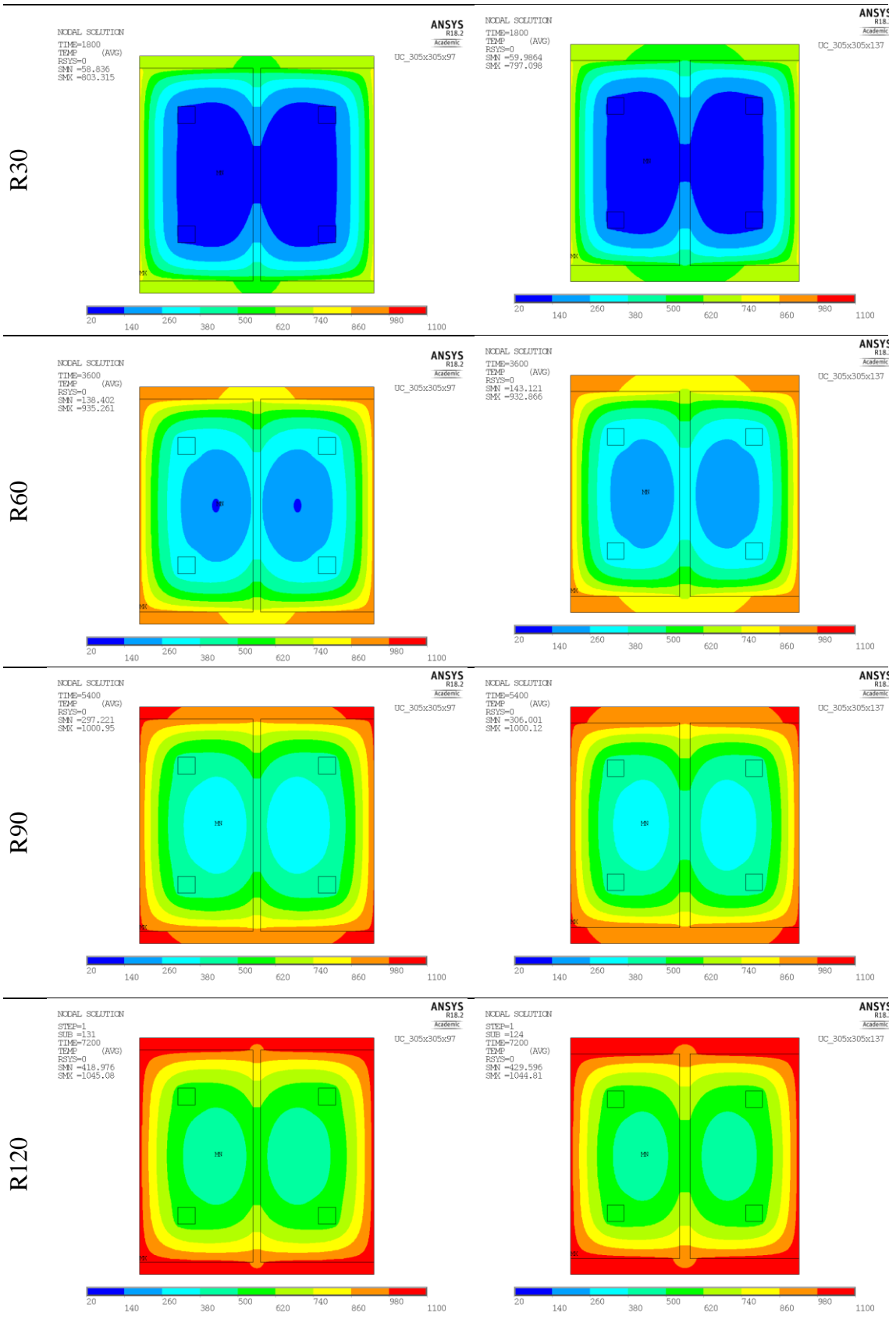


Tabela 89 – Temperaturas em UC 305x305x198 e UC 356x368x129, para R30, R60, R90 e R120.
 UC 305x305x198 UC 356x368x129

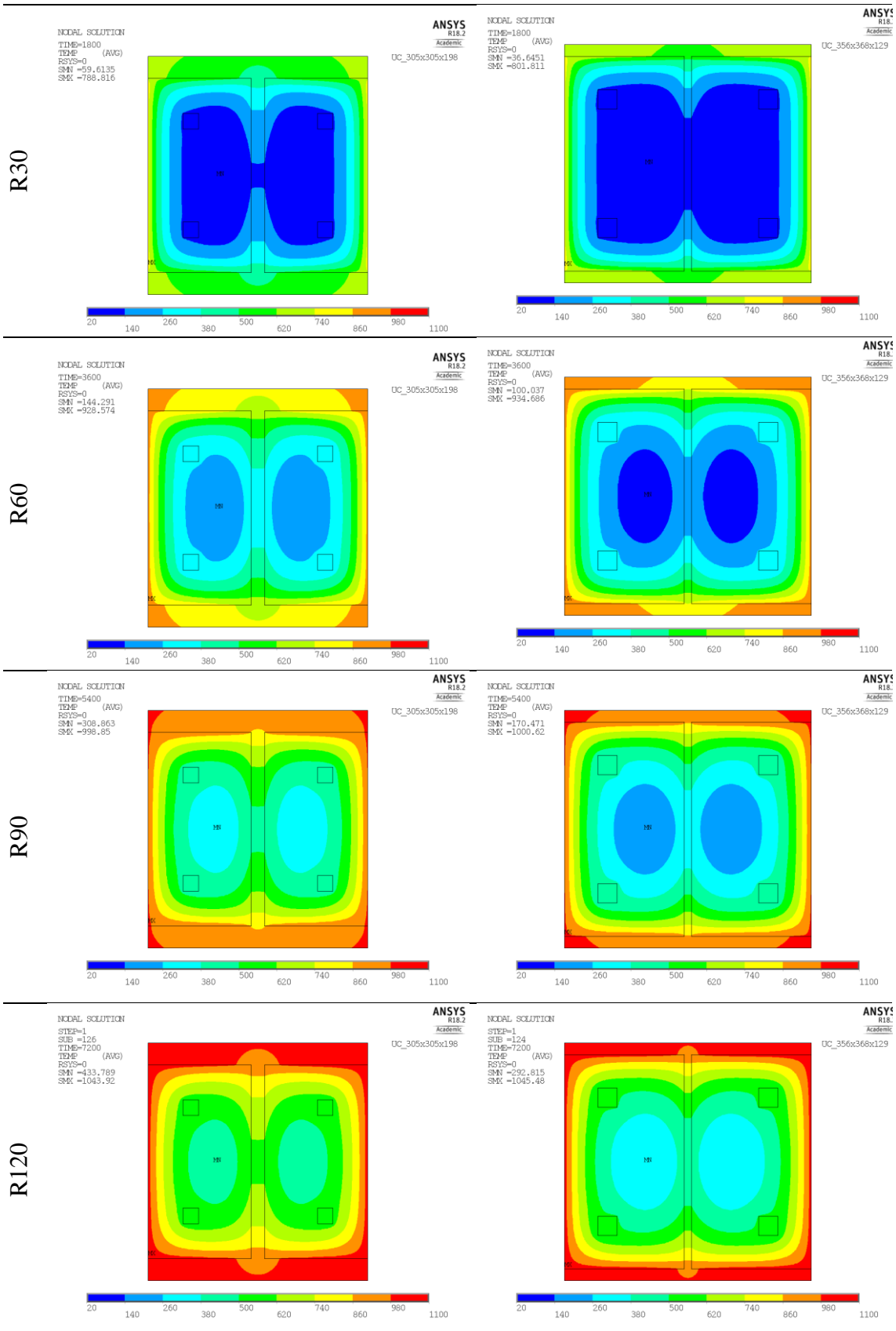


Tabela 90 – Temperaturas em UC 356x368x177 e UC 356x406x340, para R30, R60, R90 e R120.
 UC 356x368x177 UC 356x406x340

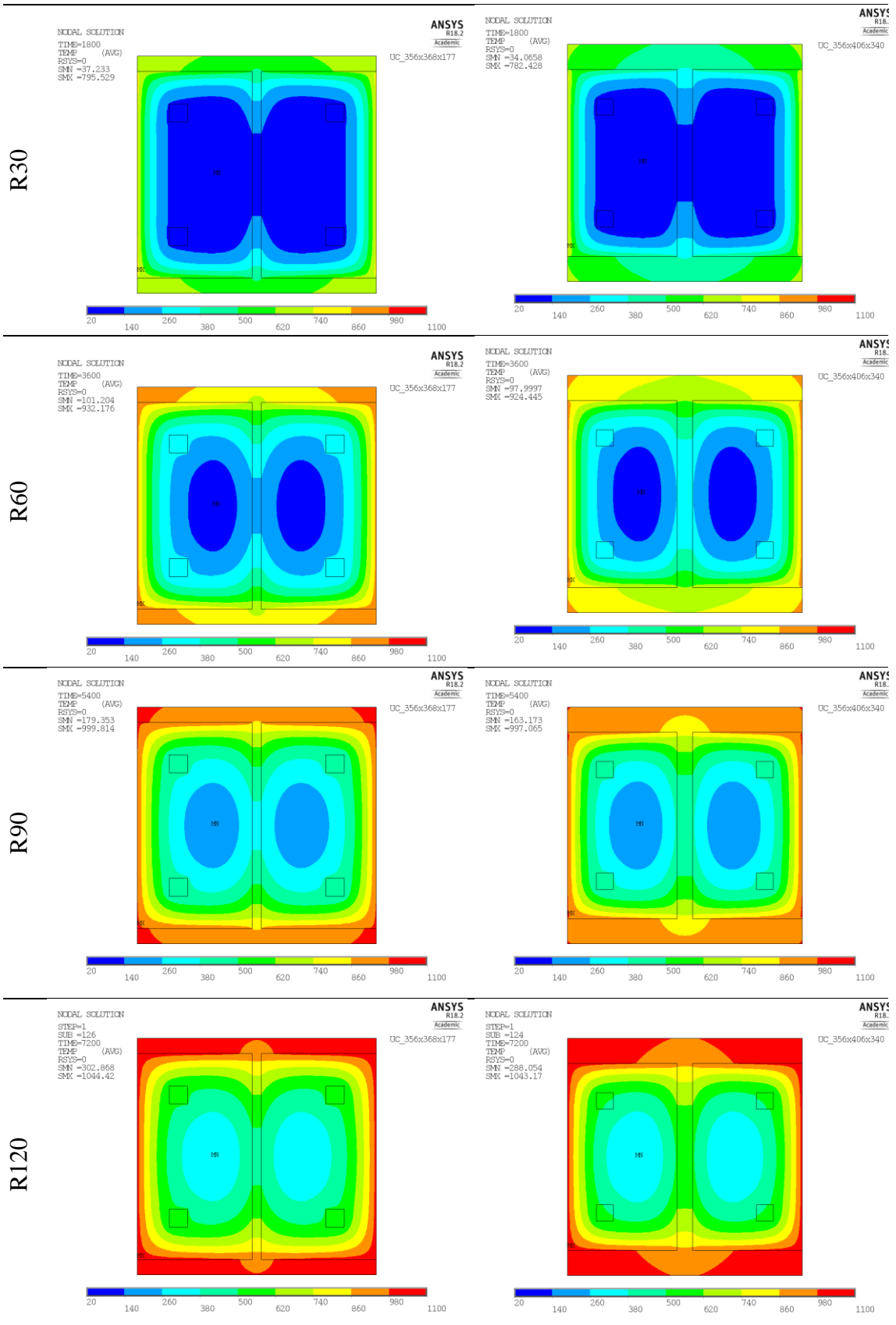
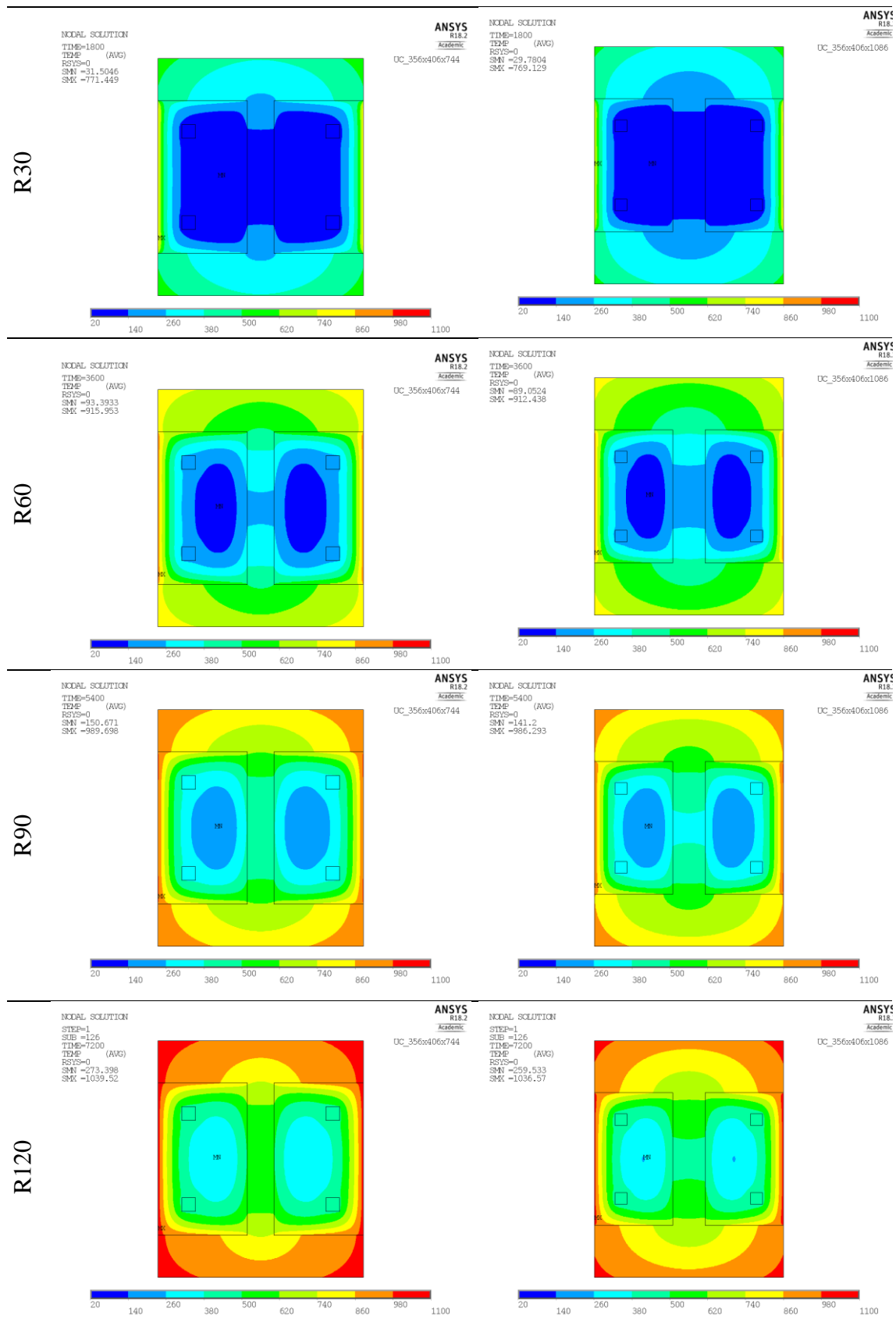


Tabela 91 – Temperaturas em UC 356x406x744 e UC 356x406x1086, para R30, R60, R90 e R120.
 UC 356x406x744 UC 356x406x1086



B.6 - Isotérmica de 500 °C

Tabela 92 – Isotérmica de 500 °C em HEB 240 e HEB 260, para R30, R60, R90 e R120.



Tabela 93 – Temperaturas em HEB 280 e HEB 300, para R30, R60, R90 e R120.

HEB 280

HEB 300

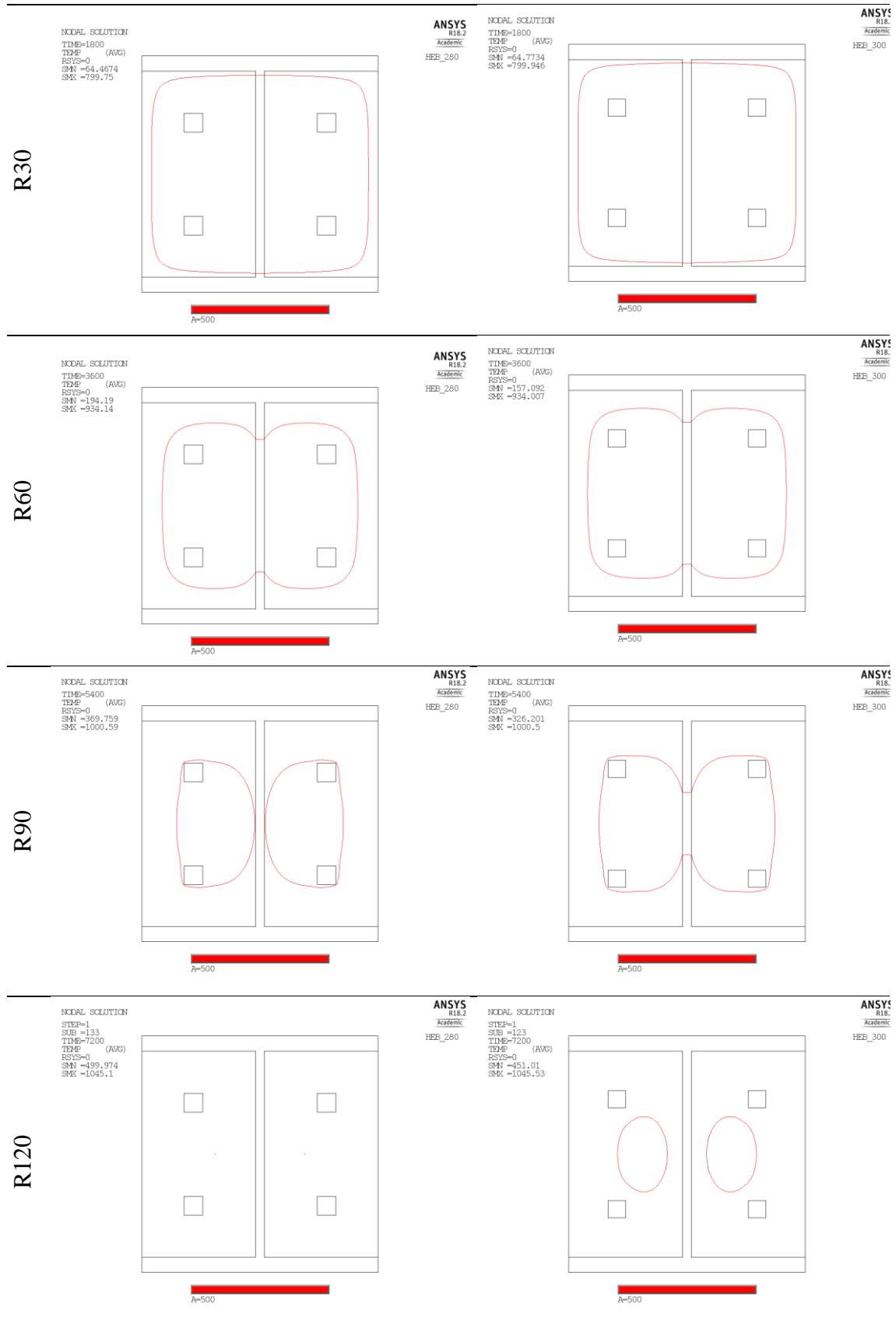


Tabela 94 – Temperaturas em HEB 340 e HEB 450, para R30, R60, R90 e R120.

	HEB 340	HEB 450
R30	<p>ANSYS R18.2 Academic HEB_340</p> <p>NODAL SOLUTION TIME=1800 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =57,818 SMX =797,26</p> <p>A=500</p>	<p>ANSYS R18.2 Academic HEB_450</p> <p>NODAL SOLUTION TIME=1800 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =44,1732 SMX =793,068</p> <p>A=500</p>
	<p>ANSYS R18.2 Academic HEB_340</p> <p>NODAL SOLUTION TIME=3600 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =136,249 SMX =932,858</p> <p>A=500</p>	<p>ANSYS R18.2 Academic HEB_450</p> <p>NODAL SOLUTION TIME=3600 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =110,108 SMX =930,812</p> <p>A=500</p>
R90	<p>ANSYS R18.2 Academic HEB_340</p> <p>NODAL SOLUTION TIME=5400 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =291,419 SMX =1000,03</p> <p>A=500</p>	<p>ANSYS R18.2 Academic HEB_450</p> <p>NODAL SOLUTION TIME=5400 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =210,335 SMX =999,406</p> <p>A=500</p>
	<p>ANSYS R18.2 Academic HEB_340</p> <p>NODAL SOLUTION STEP=1 SUB =126 TIME=7200 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =412,522 SMX =1044,71</p> <p>A=500</p>	<p>ANSYS R18.2 Academic HEB_450</p> <p>NODAL SOLUTION STEP=1 SUB =124 TIME=7200 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =325,093 SMX =1044,41</p> <p>A=500</p>

Tabela 95 – Temperaturas em HEB 500 e HEB 600, para R30, R60, R90 e R120.

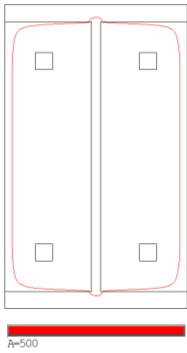
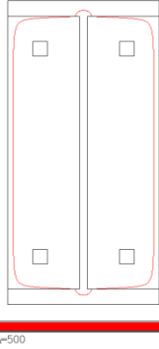
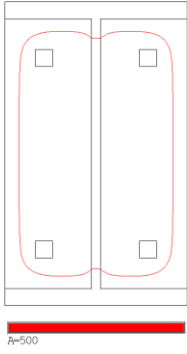
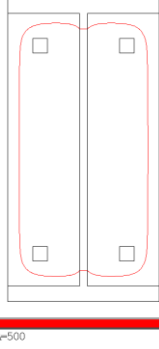
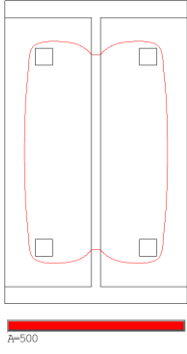
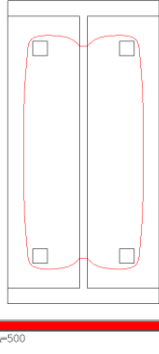
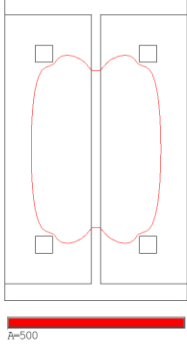
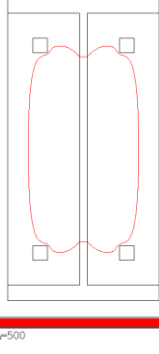
	HEB 500	HEB 600
R30	<p>ANSYS R18.2 Academic HEB_500</p> <p>MODAL SOLUTION TIME=1800 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =-39.6507 SMX =791.397</p>  <p>A=500</p>	<p>ANSYS R18.2 Academic HEB_600</p> <p>MODAL SOLUTION TIME=1800 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =-33.1703 SMX =789.902</p>  <p>A=500</p>
R60	<p>ANSYS R18.2 Academic HEB_500</p> <p>MODAL SOLUTION TIME=3600 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =-103.97 SMX =929.968</p>  <p>A=500</p>	<p>ANSYS R18.2 Academic HEB_600</p> <p>MODAL SOLUTION TIME=3600 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =-93.3285 SMX =929.075</p>  <p>A=500</p>
R90	<p>ANSYS R18.2 Academic HEB_500</p> <p>MODAL SOLUTION TIME=5400 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =-179.161 SMX =999.133</p>  <p>A=500</p>	<p>ANSYS R18.2 Academic HEB_600</p> <p>MODAL SOLUTION TIME=5400 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =-142.213 SMX =996.636</p>  <p>A=500</p>
R120	<p>ANSYS R18.2 Academic HEB_500</p> <p>MODAL SOLUTION STEP=1 SUB =127 TIME=7200 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =-293.084 SMX =1044.65</p>  <p>A=500</p>	<p>ANSYS R18.2 Academic HEB_600</p> <p>MODAL SOLUTION STEP=1 SUB =126 TIME=7200 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =-239.81 SMX =1044.48</p>  <p>A=500</p>

Tabela 96 – Temperaturas em HEB 700 e HEB 900, para R30, R60, R90 e R120.

	HEB 700	HEB 900
R30	<p>ANSYS R18.2 Academic HEB_700</p> <p>NODAL SOLUTION TIME=1800 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =29.1986 SMX =788.354</p> <p>A=500</p>	<p>ANSYS R18.2 Academic HEB_900</p> <p>NODAL SOLUTION TIME=1800 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =24.6715 SMX =786.414</p> <p>A=500</p>
	<p>ANSYS R18.1 Academic HEB_700</p> <p>NODAL SOLUTION TIME=3600 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =79.8611 SMX =928.143</p> <p>A=500</p>	<p>ANSYS R18.2 Academic HEB_900</p> <p>NODAL SOLUTION TIME=3600 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =60.6874 SMX =926.864</p> <p>A=500</p>
R90	<p>ANSYS R18.2 Academic HEB_700</p> <p>NODAL SOLUTION TIME=5400 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =123.905 SMX =998.491</p> <p>A=500</p>	<p>ANSYS R18.2 Academic HEB_900</p> <p>NODAL SOLUTION TIME=5400 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =104.058 SMX =997.888</p> <p>A=500</p>
	<p>ANSYS R18.1 Academic HEB_700</p> <p>NODAL SOLUTION STEP=1 SUB =126 TIME=7200 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =200.887 SMX =1043.64</p> <p>A=500</p>	<p>ANSYS R18.2 Academic HEB_900</p> <p>NODAL SOLUTION STEP=1 SUB =125 TIME=7200 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =150.006 SMX =1043.97</p> <p>A=500</p>

Tabela 97 – Temperaturas em HD 260x54.1 e HD 260x142, para R30, R60, R90 e R120.

HD 260x54.1

HD 260x142



Tabela 98 – Temperaturas em HD 260x225 e HD 320x127, para R30, R60, R90 e R120.

	HD 260x225	HD 320x127
R30	<p>ANSYS R18.2 Academic HD_260x225</p> <p>NODAL SOLUTION TIME=1800 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =91.997 SMX =782.46</p> <p>A=500</p>	<p>ANSYS R18.2 Academic HD_320x127</p> <p>NODAL SOLUTION TIME=1800 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =60.9314 SMX =798.318</p> <p>A=500</p>
	<p>ANSYS R18.1 Academic HD_260x225</p> <p>NODAL SOLUTION TIME=3600 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =264.235 SMX =924.67</p> <p>A=500</p>	<p>ANSYS R18.2 Academic HD_320x127</p> <p>NODAL SOLUTION TIME=3600 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =144.381 SMX =933.388</p> <p>A=500</p>
R90	<p>ANSYS R18.2 Academic HD_260x225</p> <p>NODAL SOLUTION TIME=5400 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =436.613 SMX =997.391</p> <p>A=500</p>	<p>ANSYS R18.2 Academic HD_320x127</p> <p>NODAL SOLUTION TIME=5400 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =306.683 SMX =1000.25</p> <p>A=500</p>
	<p>ANSYS R18.1 Academic HD_260x225</p> <p>NODAL SOLUTION STEP=1 SUB =124 TIME=7200 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =569.647 SMX =1043.41</p> <p>A=500</p>	<p>ANSYS R18.2 Academic HD_320x127</p> <p>NODAL SOLUTION STEP=1 SUB =123 TIME=7200 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =429.168 SMX =1044.96</p> <p>A=500</p>

Tabela 99 – Temperaturas em HD 320x300 e HD 400x237, para R30, R60, R90 e R120.

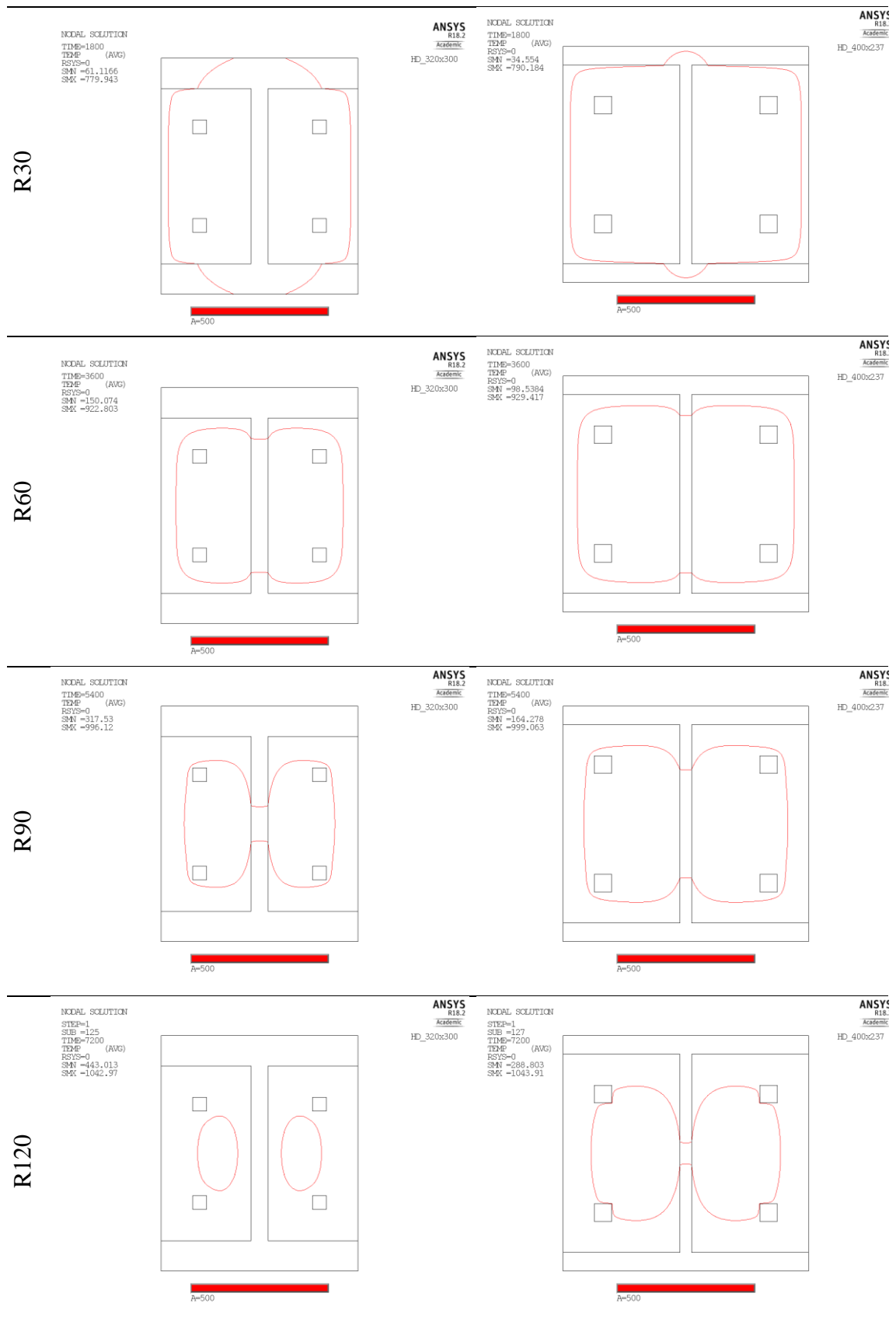


Tabela 100 – Temperaturas em HD 400x382 e HD 400x551, para R30, R60, R90 e R120.

	HD 400x382	HD 400x551
R30	<p>ANSYS R18.2 Academic HD_400x382</p> <p>MODAL SOLUTION TIME=1800 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =33.874 SMX =780.128</p> <p>A=500</p>	<p>ANSYS R18.2 Academic HD_400x551</p> <p>MODAL SOLUTION TIME=1800 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =32.8289 SMX =774.554</p> <p>A=500</p>
R60	<p>ANSYS R18.2 Academic HD_400x382</p> <p>MODAL SOLUTION TIME=3600 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =97.8109 SMX =922.838</p> <p>A=500</p>	<p>ANSYS R18.2 Academic HD_400x551</p> <p>MODAL SOLUTION TIME=3600 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =96.1154 SMX =918.678</p> <p>A=500</p>
R90	<p>ANSYS R18.2 Academic HD_400x382</p> <p>MODAL SOLUTION TIME=5400 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =162.949 SMX =996.179</p> <p>A=500</p>	<p>ANSYS R18.2 Academic HD_400x551</p> <p>MODAL SOLUTION TIME=5400 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =157.916 SMX =992.744</p> <p>A=500</p>
R120	<p>ANSYS R18.2 Academic HD_400x382</p> <p>MODAL SOLUTION STEP=1 SUB =125 TIME=7200 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =287.964 SMX =1042.68</p> <p>A=500</p>	<p>ANSYS R18.2 Academic HD_400x551</p> <p>MODAL SOLUTION STEP=1 SUB =124 TIME=7200 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =282.485 SMX =1041.12</p> <p>A=500</p>

Tabela 101 – Temperaturas em HD 400x818 e HD 400x1299, para R30, R60, R90 e R120.

	HD 400x818	HD 400x1299
R30	<p>ANSYS R18.2 Academic HD_400x818</p> <p>NODAL SOLUTION TIME=1800 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =31.0605 SMX =770.656</p> <p>A=500</p>	<p>ANSYS R18.2 Academic HD_400x1299</p> <p>NODAL SOLUTION TIME=1800 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =29.0439 SMX =769.129</p> <p>A=500</p>
	R60	<p>ANSYS R18.1 Academic HD_400x818</p> <p>NODAL SOLUTION TIME=3600 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =92.3567 SMX =915.091</p> <p>A=500</p>
R90		<p>ANSYS R18.2 Academic HD_400x818</p> <p>NODAL SOLUTION TIME=5400 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =148.184 SMX =988.773</p> <p>A=500</p>
	R120	<p>ANSYS R18.1 Academic HD_400x818</p> <p>NODAL SOLUTION STEP=1 SUB =126 TIME=7200 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =270.05 SMX =1038.8</p> <p>A=500</p>

Tabela 102 – Temperaturas em UC 254x254x73 e UC 254x254x132, para R30, R60, R90 e R120.

UC 254x254x73

UC 254x254x132

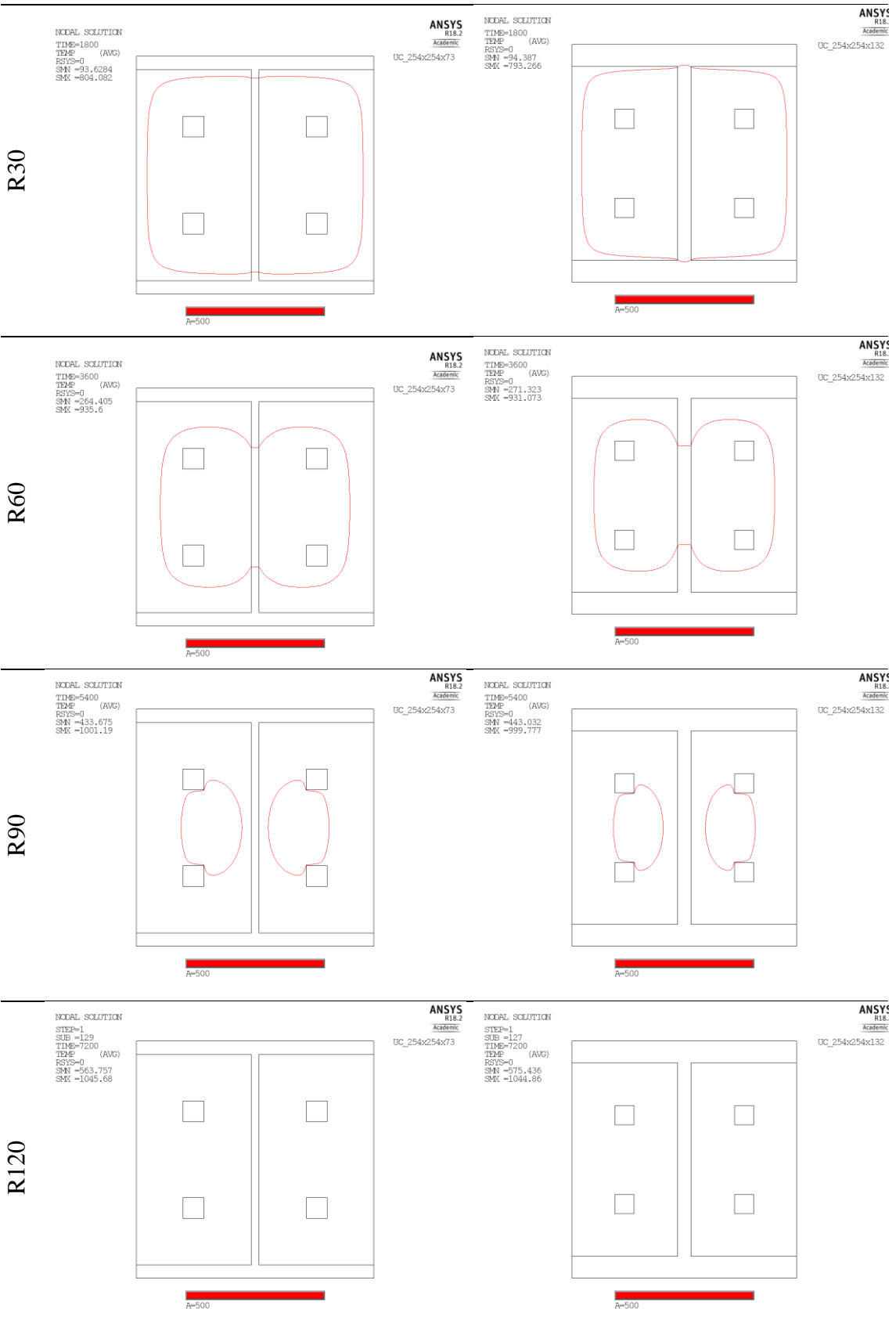


Tabela 103 – Temperaturas em UC 305x305x97 e UC 305x305x137, para R30, R60, R90 e R120.

UC 305x305x97

UC 305x305x137



Tabela 104 – Temperaturas em UC 305x305x198 e UC 356x368x129, para R30, R60, R90 e R120.
 UC 305x305x198 UC 356x368x129

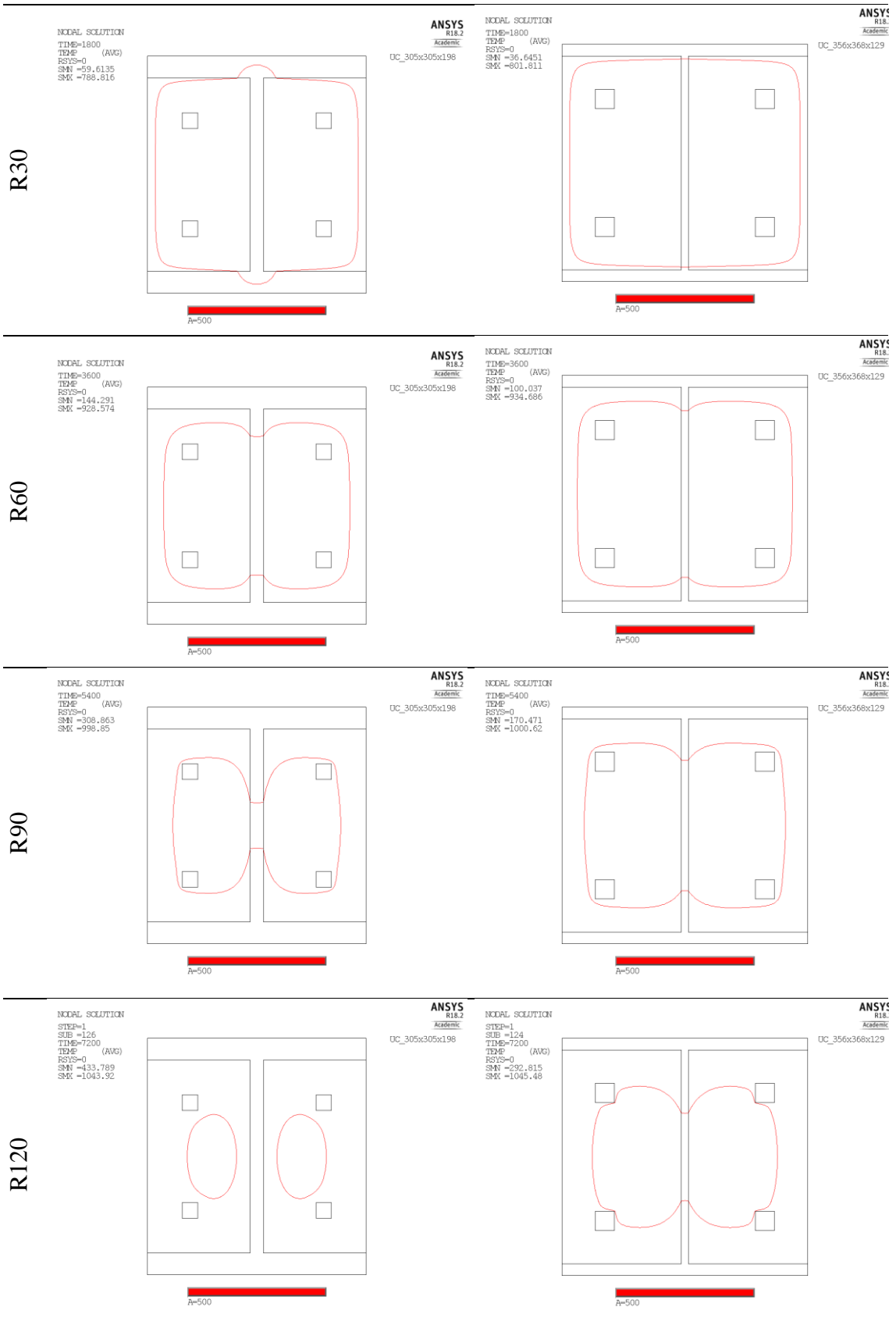


Tabela 105 – Temperaturas em UC 356x368x177 e UC 356x406x340, para R30, R60, R90 e R120.
 UC 356x368x177 UC 356x406x340

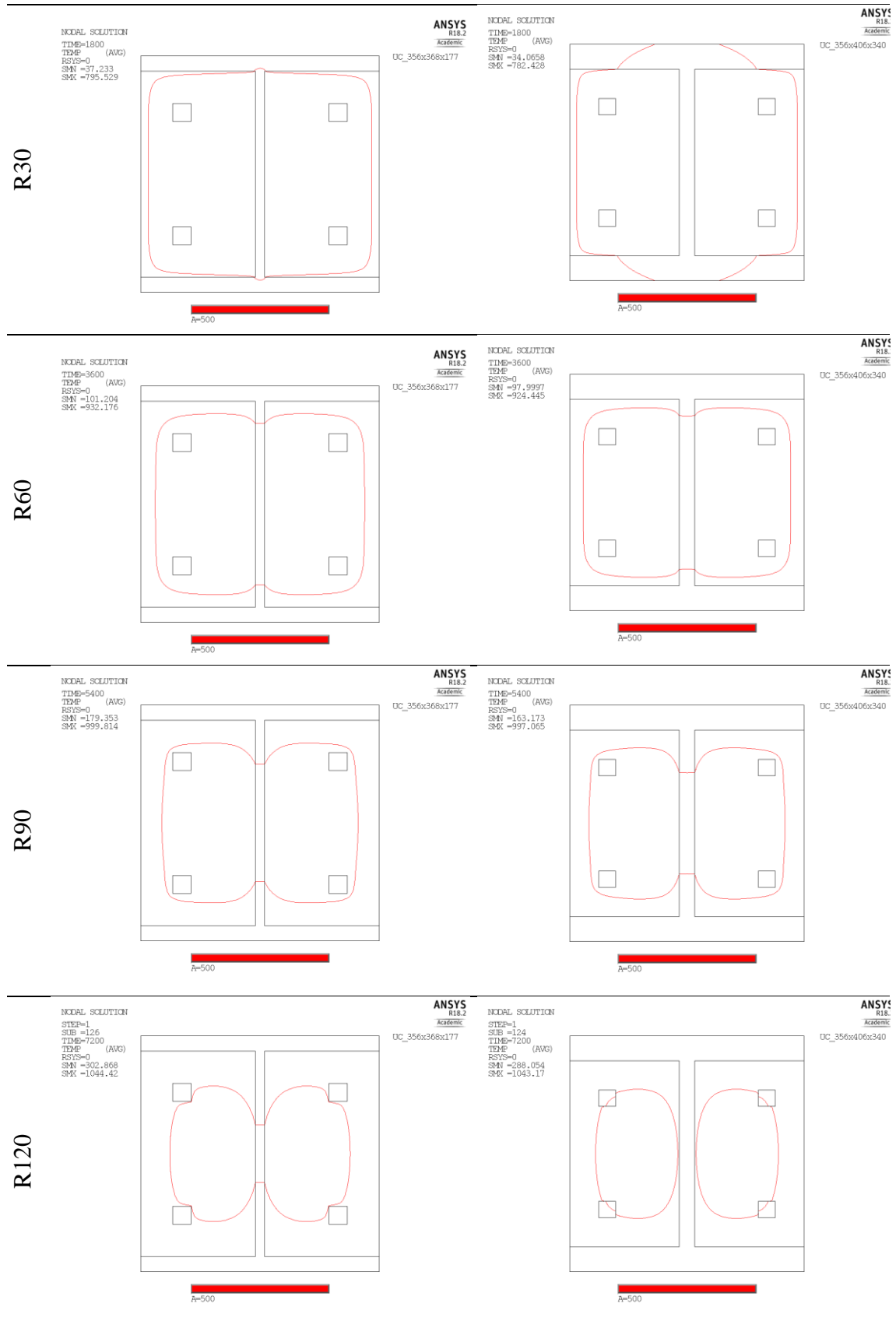


Tabela 106 – Temperaturas em UC 356x406x744 e UC 356x406x1086, para R30, R60, R90 e R120.
 UC 356x406x744 UC 356x406x1086

R30	<p> NODAL SOLUTION TIME=1800 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =-31.5046 SMX =771.449 </p> <p style="text-align: center;">A=500</p>	<p> ANSYS R18.2 Academic UC_356x406x744 </p> <p> NODAL SOLUTION TIME=1800 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =29.7804 SMX =769.129 </p>	<p> ANSYS R18. Academic UC_356x406x1086 </p> <p style="text-align: center;">A=500</p>
	<p> NODAL SOLUTION TIME=3600 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =-93.3933 SMX =915.953 </p> <p style="text-align: center;">A=500</p>	<p> ANSYS R18.1 Academic UC_356x406x744 </p> <p> NODAL SOLUTION TIME=3600 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =-89.0524 SMX =912.438 </p>	<p> ANSYS R18. Academic UC_356x406x1086 </p> <p style="text-align: center;">A=500</p>
	<p> NODAL SOLUTION TIME=5400 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =-150.671 SMX =989.698 </p> <p style="text-align: center;">A=500</p>	<p> ANSYS R18.2 Academic UC_356x406x744 </p> <p> NODAL SOLUTION TIME=5400 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =-141.2 SMX =986.293 </p>	<p> ANSYS R18. Academic UC_356x406x1086 </p> <p style="text-align: center;">A=500</p>
	<p> NODAL SOLUTION STEP=1 SUB =126 TIME=7200 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =-273.398 SMX =1039.52 </p> <p style="text-align: center;">A=500</p>	<p> ANSYS R18.1 Academic UC_356x406x744 </p> <p> NODAL SOLUTION STEP=1 SUB =126 TIME=7200 TEMP (AVG) RSYS=0 SMN =-259.533 SMX =1036.57 </p>	<p> ANSYS R18. Academic UC_356x406x1086 </p> <p style="text-align: center;">A=500</p>

Esta página foi deixada intencionalmente em branco.

ANEXO C

Método Simplificado de Cálculo – Aprimoramento

ANEXO C - MÉTODO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO - APRIMORAMENTO

C.1 - Banzos

Tabela 107 – Temperatura média dos banzos - APRIMORAMENTO.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	$\theta_{f,t}$ [°C]			
		R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	667,67	879,41		
HEB 260	15,38	661,02	874,89		
HEB 280	14,29	655,00	870,75		
HEB 300	13,33	647,23	865,03	963,71	1019,36
HEB 340	12,55	633,29	854,01	959,15	1016,06
HEB 450	11,11	608,11	834,13	950,90	1010,08
HEB 500	10,67	597,59	825,69	947,51	1007,69
HEB 600	10,00	586,30	816,80	943,80	1005,00
HEB 700	9,52	575,67	808,30	940,36	1002,57
HEB 900	8,89	559,99	795,71	935,32	999,03
HD 260x54,1	15,89	712,68	905,66		
HD 260x142	14,74	659,28	863,34		
HD 260x225	13,85	613,25	826,13		
HD 320x127	12,92	640,42	858,81	970,60	1038,07
HD 320x300	11,72	565,24	796,14	917,17	994,81
HD 400x237	10,33	577,22	817,77	944,61	1021,66
HD 400x382	9,73	531,60	778,78	910,62	993,76
HD 400x551	9,18	483,04	736,70	873,52	963,09
HD 400x818	8,47	412,19	674,62	818,26	917,14
HD 400x1299	7,54	310,42	584,78	737,79	849,99
UC 254x254x73	15,73	681,97	885,66		
UC 254x254x132	14,89	646,50	857,05		
UC 305x305x97	13,05	667,59	877,13	979,58	1035,53
UC 305x305x137	12,71	648,01	861,17	966,18	1026,00
UC 305x305x198	12,24	618,08	836,72	945,62	1011,32
UC 356x368x129	11,05	653,40	867,86	972,76	1032,24
UC 356x368x177	10,80	634,17	852,08	959,47	1022,71
UC 356x406x340	9,88	575,25	803,94	918,98	993,81
UC 356x406x744	8,65	437,27	690,02	822,67	924,28
UC 356x406x1086	7,92	329,99	601,13	747,40	869,73

Tabela 108 – Fatores de redução da tensão de escoamento e módulo de elasticidade do aço estrutural para o banzo- APRIMORAMENTO.

$k_{v,\theta}$				$k_{E,\theta}$			
R30	R60	R90	R120	R30	R60	R90	R120
0,3076	0,0703			0,1882	0,0721		
0,3236	0,0726			0,2002	0,0731		
0,3380	0,0746			0,2110	0,0741		
0,3566	0,0775	0,0473	0,0361	0,2250	0,0754	0,0532	0,0406
0,3901	0,0830	0,0482	0,0368	0,2501	0,0778	0,0542	0,0414
0,4505	0,0929	0,0498	0,0380	0,2954	0,0823	0,0560	0,0427
0,4775	0,0972	0,0505	0,0385	0,3170	0,0842	0,0568	0,0433
0,5125	0,1016	0,0512	0,0390	0,3497	0,0862	0,0576	0,0439
0,5454	0,1059	0,0519	0,0395	0,3806	0,0881	0,0584	0,0444
0,5940	0,1151	0,0529	0,0402	0,4260	0,0917	0,0596	0,0452
0,2148	0,0589			0,1249	0,0662		
0,3277	0,0783			0,2033	0,0757		
0,4382	0,0969			0,2862	0,0841		
0,3730	0,0806	0,0459	0,0324	0,2372	0,0768	0,0516	0,0364

0,5778	0,1146	0,0566	0,0410	0,4108	0,0915	0,0636	0,0462
0,5406	0,1011	0,0511	0,0357	0,3761	0,0860	0,0575	0,0401
0,6820	0,1355	0,0579	0,0412	0,5084	0,0985	0,0651	0,0464
0,8173	0,1860	0,0732	0,0474	0,6170	0,1153	0,0735	0,0533
0,9732	0,2909	0,1009	0,0566	0,6878	0,1757	0,0859	0,0636
1,0000	0,5172	0,1847	0,0850	0,7896	0,3541	0,1149	0,0788
0,2733	0,0672			0,1625	0,0707		
0,3584	0,0815			0,2263	0,0772		
0,3078	0,0714	0,0441	0,0329	0,1883	0,0726	0,0496	0,0370
0,3548	0,0794	0,0468	0,0348	0,2236	0,0762	0,0526	0,0392
0,4266	0,0916	0,0509	0,0377	0,2774	0,0817	0,0572	0,0425
0,3418	0,0761	0,0454	0,0336	0,2139	0,0747	0,0511	0,0377
0,3880	0,0840	0,0481	0,0355	0,2485	0,0783	0,0541	0,0399
0,5467	0,1080	0,0562	0,0412	0,3818	0,0891	0,0632	0,0464
0,9180	0,2540	0,0987	0,0551	0,6627	0,1480	0,0849	0,0620
1,0000	0,4673	0,1731	0,0751	0,7700	0,3080	0,1110	0,0743

Tabela 109 – Propriedades mecânicas do aço estrutural reduzidas de acordo com a temperatura média do banzo - APRIMORAMENTO.

$f_{av,ft}$ [Pa]				$E_{a,ft}$ [Pa]			
R30	R60	R90	R120	R30	R60	R90	R120
1,06E+08	2,43E+07			3,95E+10	1,51E+10		
1,12E+08	2,50E+07			4,20E+10	1,54E+10		
1,17E+08	2,57E+07			4,43E+10	1,56E+10		
1,23E+08	2,67E+07	1,63E+07	1,25E+07	4,72E+10	1,58E+10	1,12E+10	8,54E+09
1,35E+08	2,86E+07	1,66E+07	1,27E+07	5,25E+10	1,63E+10	1,14E+10	8,69E+09
1,55E+08	3,21E+07	1,72E+07	1,31E+07	6,20E+10	1,73E+10	1,18E+10	8,97E+09
1,65E+08	3,35E+07	1,74E+07	1,33E+07	6,66E+10	1,77E+10	1,19E+10	9,09E+09
1,77E+08	3,51E+07	1,77E+07	1,35E+07	7,34E+10	1,81E+10	1,21E+10	9,21E+09
1,88E+08	3,65E+07	1,79E+07	1,36E+07	7,99E+10	1,85E+10	1,23E+10	9,33E+09
2,05E+08	3,97E+07	1,83E+07	1,39E+07	8,95E+10	1,93E+10	1,25E+10	9,50E+09
7,62E+07	2,09E+07			2,62E+10	1,39E+10		
1,13E+08	2,70E+07			4,27E+10	1,59E+10		
1,47E+08	3,25E+07			6,01E+10	1,77E+10		
1,29E+08	2,78E+07	1,58E+07	1,12E+07	4,98E+10	1,61E+10	1,08E+10	7,65E+09
1,94E+08	3,84E+07	1,89E+07	1,37E+07	8,63E+10	1,92E+10	1,34E+10	9,70E+09
1,87E+08	3,49E+07	1,76E+07	1,23E+07	7,90E+10	1,81E+10	1,21E+10	8,43E+09
2,28E+08	4,54E+07	1,94E+07	1,38E+07	1,07E+11	2,07E+10	1,37E+10	9,74E+09
2,66E+08	6,04E+07	2,38E+07	1,54E+07	1,30E+11	2,42E+10	1,54E+10	1,12E+10
3,07E+08	9,16E+07	3,18E+07	1,78E+07	1,44E+11	3,69E+10	1,80E+10	1,34E+10
2,95E+08	1,53E+08	5,45E+07	2,51E+07	1,66E+11	7,44E+10	2,41E+10	1,65E+10
9,70E+07	2,38E+07			3,41E+10	1,49E+10		
1,24E+08	2,81E+07			4,75E+10	1,62E+10		
1,09E+08	2,54E+07	1,56E+07	1,17E+07	3,95E+10	1,53E+10	1,04E+10	7,77E+09
1,22E+08	2,74E+07	1,61E+07	1,20E+07	4,70E+10	1,60E+10	1,10E+10	8,22E+09
1,47E+08	3,16E+07	1,76E+07	1,30E+07	5,83E+10	1,72E+10	1,20E+10	8,92E+09
1,18E+08	2,62E+07	1,57E+07	1,16E+07	4,49E+10	1,57E+10	1,07E+10	7,93E+09
1,34E+08	2,90E+07	1,66E+07	1,22E+07	5,22E+10	1,64E+10	1,14E+10	8,38E+09
1,83E+08	3,62E+07	1,88E+07	1,38E+07	8,02E+10	1,87E+10	1,33E+10	9,74E+09
2,89E+08	8,00E+07	3,11E+07	1,74E+07	1,39E+11	3,11E+10	1,78E+10	1,30E+10
2,95E+08	1,38E+08	5,11E+07	2,22E+07	1,62E+11	6,47E+10	2,33E+10	1,56E+10

Tabela 110 – Resistência plástica à compressão axial dos banzos - APRIMORAMENTO.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	$N_{fi,pl,rd,f}$ [N]			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	2815200	865956	197890		
HEB 260	15,38	3139500	1015797	227783		
HEB 280	14,29	3477600	1175429	259518		

HEB 300	13,33	3933000	1402665	304755	185863	142094
HEB 340	12,55	4450500	1736124	369367	214381	163728
HEB 450	11,11	5382000	2424770	500179	268134	204427
HEB 500	10,67	5796000	2767482	563101	292690	222922
HEB 600	10,00	6210000	3182439	630936	318200	242190
HEB 700	9,52	6624000	3612950	701154	343966	261558
HEB 900	8,89	7245000	4303780	834238	383518	291209
HD 260x54,1	15,89	1753700	376659	103236		
HD 260x142	14,74	4845525	1588045	379544		
HD 260x225	13,85	7625940	3341744	739209		
HD 320x127	12,92	4243500	1582783	342000	194695	137429
HD 320x300	11,72	10066080	5815807	1153862	569400	413085
HD 400x237	10,33	8231010	4449826	832279	420417	293579
HD 400x382	9,73	13056960	8905427	1768809	755674	538576
HD 400x551	9,18	18366920	15011554	3415425	1345164	870278
HD 400x818	8,47	26705070	25988954	7768626	2693757	1510771
HD 400x1299	7,54	39317600	39317600	20334273	7260064	3342123
UC 254x254x73	15,73	2566877	701466	172415		
UC 254x254x132	14,89	4561514	1634894	371653		
UC 305x305x97	13,05	3338150	1027402	238461	147156	109806
UC 305x305x137	12,71	4629652	1642480	367655	216498	161116
UC 305x305x198	12,24	6813957	2906814	624420	346667	257131
UC 356x368x129	11,05	4450845	1521483	338586	202280	149337
UC 356x368x177	10,80	6118837	2374030	513728	294351	216962
UC 356x406x340	9,88	11583429	6333057	1251367	651033	477668
UC 356x406x744	8,65	24195024	22211338	6144493	2387164	1334212
UC 356x406x1086	7,92	33482500	33482500	15645772	5796479	2515788

Tabela 111 – Rigidez à flexão do banzo - APRIMORAMENTO.

Perfis	$\frac{Am}{V}$ [m ⁻¹]	20 °C	$(EI)_{fl,z}$ [Nm ²]			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	8225280	1547998	593306		
HEB 260	15,38	10765300	2154840	787473		
HEB 280	14,29	13829760	2918079	1024530		
HEB 300	13,33	17955000	4039516	1353250	954569	729776
HEB 340	12,55	20317500	5080845	1581667	1101033	840883
HEB 450	11,11	24570000	7257978	2022627	1377099	1049913
HEB 500	10,67	26460000	8387785	2228435	1503219	1144898
HEB 600	10,00	28350000	9914846	2444337	1634236	1243856
HEB 700	9,52	30240000	11508336	2665133	1766565	1343330
HEB 900	8,89	33075000	14091016	3033492	1969699	1495610
HD 260x54,1	15,89	5844020	730074	387027		
HD 260x142	14,74	17260427	3509059	1307442		
HD 260x225	13,85	29256691	8371966	2461076		
HD 320x127	12,92	19372500	4595980	1487172	999930	705819
HD 320x300	11,72	51516019	21163318	4715926	3278323	2378341
HD 400x237	10,33	65142778	24497676	5602394	3743224	2613907
HD 400x382	9,73	112431339	57156062	11073314	7320354	5217291
HD 400x551	9,18	172799939	106610865	19927015	12693415	9211230
HD 400x818	8,47	283324473	194873698	49773993	24335243	18031896
HD 400x1299	7,54	528465862	417267615	187148813	60712231	41617453
UC 254x254x73	15,73	8202223	1332508	580112		
UC 254x254x132	14,89	15798170	3575249	1219052		
UC 305x305x97	13,05	15338016	2888636	1114243	760667	567599
UC 305x305x137	12,71	22451545	5019728	1711613	1181146	879001
UC 305x305x198	12,24	34186894	9485077	2794344	1956702	1451332
UC 356x368x129	11,05	30674118	6560611	2292354	1568318	1157839
UC 356x368x177	10,80	43089708	10707376	3373120	2331969	1718860
UC 356x406x340	9,88	98274417	37519559	8757611	6213819	4559131

UC 356x406x744	8,65	250854009	166249236	37118285	21297141	15562245
UC 356x406x1086	7,92	409397905	315242399	126078813	45459497	30423106

C.2 - Alma

Tabela 112 – Temperatura média da alma - APRIMORAMENTO.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	$\theta_{w,t}$ [°C]			
		R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	324,33	567,33		
HEB 260	15,38	306,38	537,85		
HEB 280	14,29	279,10	492,71		
HEB 300	13,33	254,94	452,76	611,12	727,33
HEB 340	12,55	225,02	403,13	551,25	661,35
HEB 450	11,11	175,13	320,41	451,22	551,30
HEB 500	10,67	162,75	299,92	426,26	523,98
HEB 600	10,00	142,29	266,03	385,13	478,84
HEB 700	9,52	121,39	231,34	343,43	432,77
HEB 900	8,89	100,58	196,85	301,64	386,85
HD 260x54,1	15,89	319,82	525,95		
HD 260x142	14,74	328,27	552,40		
HD 260x225	13,85	312,58	535,35		
HD 320x127	12,92	262,76	461,23	596,94	718,60
HD 320x300	11,72	250,92	453,92	600,34	719,80
HD 400x237	10,33	201,40	385,20	521,10	639,49
HD 400x382	9,73	192,91	377,17	516,70	634,11
HD 400x551	9,18	180,98	362,93	503,27	619,92
HD 400x818	8,47	163,10	340,32	480,07	595,87
HD 400x1299	7,54	138,25	308,30	446,34	561,08
UC 254x254x73	15,73	329,12	530,04		
UC 254x254x132	14,89	316,10	542,47		
UC 305x305x97	13,05	262,04	443,86	583,88	694,78
UC 305x305x137	12,71	258,10	455,62	602,12	716,68
UC 305x305x198	12,24	249,43	455,50	604,98	721,89
UC 356x368x129	11,05	210,96	374,13	501,67	611,26
UC 356x368x177	10,80	208,98	387,55	521,62	634,70
UC 356x406x340	9,88	190,59	380,75	518,29	634,91
UC 356x406x744	8,65	161,73	351,60	486,55	604,67
UC 356x406x1086	7,92	143,75	329,15	460,62	578,74

Tabela 113 – Fatores de redução da tensão de escoamento e módulo de elasticidade do aço estrutural para a alma - APRIMORAMENTO.

$k_{y,\theta}$				$k_{E,\theta}$			
R30	R60	R90	R120	R30	R60	R90	R120
1,0000	0,5713			0,7757	0,4047		
1,0000	0,6627			0,7936	0,4902		
1,0000	0,7960			0,8209	0,6073		
1,0000	0,8839	0,4433	0,1972	0,8451	0,6472	0,2900	0,1191
1,0000	0,9931	0,6211	0,3228	0,8750	0,6969	0,4514	0,1996
1,0000	1,0000	0,8873	0,6210	0,9249	0,7796	0,6488	0,4512
1,0000	1,0000	0,9422	0,7057	0,9373	0,8001	0,6737	0,5305
1,0000	1,0000	1,0000	0,8266	0,9577	0,8340	0,7149	0,6212
1,0000	1,0000	1,0000	0,9279	0,9786	0,8687	0,7566	0,6672
1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,9994	0,9032	0,7984	0,7131
1,0000	0,6996			0,7802	0,5248		
1,0000	0,6176			0,7717	0,4480		
1,0000	0,6704			0,7874	0,4975		
1,0000	0,8653	0,4795	0,2077	0,8372	0,6388	0,3189	0,1226

Bruno Alfredo

1,0000	0,8814	0,4692	0,2062	0,8491	0,6461	0,3094	0,1221
1,0000	1,0000	0,7146	0,3752	0,8986	0,7148	0,5388	0,2389
1,0000	1,0000	0,7282	0,3881	0,9071	0,7228	0,5516	0,2486
1,0000	1,0000	0,7699	0,4222	0,9190	0,7371	0,5905	0,2741
1,0000	1,0000	0,8239	0,4828	0,9369	0,7597	0,6199	0,3220
1,0000	1,0000	0,8981	0,5907	0,9617	0,7917	0,6537	0,4229
1,0000	0,6869			0,7709	0,5129		
1,0000	0,6483			0,7839	0,4768		
1,0000	0,9035	0,5200	0,2425	0,8380	0,6561	0,3568	0,1394
1,0000	0,8776	0,4649	0,2100	0,8419	0,6444	0,3062	0,1233
1,0000	0,8779	0,4581	0,2037	0,8506	0,6445	0,3010	0,1212
1,0000	1,0000	0,7748	0,4430	0,8890	0,7259	0,5952	0,2897
1,0000	1,0000	0,7130	0,3867	0,8910	0,7124	0,5373	0,2475
1,0000	1,0000	0,7233	0,3862	0,9094	0,7192	0,5470	0,2472
1,0000	1,0000	0,8096	0,4588	0,9383	0,7484	0,6135	0,3016
1,0000	1,0000	0,8666	0,5359	0,9563	0,7708	0,6394	0,3716

Tabela 114 – Propriedades mecânicas do aço estrutural reduzidas de acordo com a temperatura média da alma - APRIMORAMENTO.

$f_{av,w,t}$ [Pa]				$E_{a,w,t}$ [Pa]			
R30	R60	R90	R120	R30	R60	R90	R120
3,45E+08	1,97E+08			1,63E+11	8,50E+10		
3,45E+08	2,29E+08			1,67E+11	1,03E+11		
3,45E+08	2,75E+08			1,72E+11	1,28E+11		
3,45E+08	3,05E+08	1,53E+08	6,80E+07	1,77E+11	1,36E+11	6,09E+10	2,50E+10
3,45E+08	3,43E+08	2,14E+08	1,11E+08	1,84E+11	1,46E+11	9,48E+10	4,19E+10
3,45E+08	3,45E+08	3,06E+08	2,14E+08	1,94E+11	1,64E+11	1,36E+11	9,48E+10
3,45E+08	3,45E+08	3,25E+08	2,43E+08	1,97E+11	1,68E+11	1,41E+11	1,11E+11
3,45E+08	3,45E+08	3,45E+08	2,85E+08	2,01E+11	1,75E+11	1,50E+11	1,30E+11
3,45E+08	3,45E+08	3,45E+08	3,20E+08	2,06E+11	1,82E+11	1,59E+11	1,40E+11
3,45E+08	3,45E+08	3,45E+08	3,45E+08	2,10E+11	1,90E+11	1,68E+11	1,50E+11
3,55E+08	2,48E+08			1,64E+11	1,10E+11		
3,45E+08	2,13E+08			1,62E+11	9,41E+10		
3,35E+08	2,25E+08			1,65E+11	1,04E+11		
3,45E+08	2,99E+08	1,65E+08	7,17E+07	1,76E+11	1,34E+11	6,70E+10	2,57E+10
3,35E+08	2,95E+08	1,57E+08	6,91E+07	1,78E+11	1,36E+11	6,50E+10	2,56E+10
3,45E+08	3,45E+08	2,47E+08	1,29E+08	1,89E+11	1,50E+11	1,13E+11	5,02E+10
3,35E+08	3,35E+08	2,44E+08	1,30E+08	1,90E+11	1,52E+11	1,16E+11	5,22E+10
3,25E+08	3,25E+08	2,50E+08	1,37E+08	1,93E+11	1,55E+11	1,24E+11	5,76E+10
3,15E+08	3,15E+08	2,60E+08	1,52E+08	1,97E+11	1,60E+11	1,30E+11	6,76E+10
2,95E+08	2,95E+08	2,65E+08	1,74E+08	2,02E+11	1,66E+11	1,37E+11	8,88E+10
3,55E+08	2,44E+08			1,62E+11	1,08E+11		
3,45E+08	2,24E+08			1,65E+11	1,00E+11		
3,55E+08	3,21E+08	1,85E+08	8,61E+07	1,76E+11	1,38E+11	7,49E+10	2,93E+10
3,45E+08	3,03E+08	1,60E+08	7,24E+07	1,77E+11	1,35E+11	6,43E+10	2,59E+10
3,45E+08	3,03E+08	1,58E+08	7,03E+07	1,79E+11	1,35E+11	6,32E+10	2,55E+10
3,45E+08	3,45E+08	2,67E+08	1,53E+08	1,87E+11	1,52E+11	1,25E+11	6,08E+10
3,45E+08	3,45E+08	2,46E+08	1,33E+08	1,87E+11	1,50E+11	1,13E+11	5,20E+10
3,35E+08	3,35E+08	2,42E+08	1,29E+08	1,91E+11	1,51E+11	1,15E+11	5,19E+10
3,15E+08	3,15E+08	2,55E+08	1,45E+08	1,97E+11	1,57E+11	1,29E+11	6,33E+10
2,95E+08	2,95E+08	2,56E+08	1,58E+08	2,01E+11	1,62E+11	1,34E+11	7,80E+10

Tabela 115 – Resistência plástica à compressão axial da alma - APRIMORAMENTO.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	$N_{fi,pl,Rd,w}$ [N]			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	710700	710700	405999		
HEB 260	15,38	776250	776250	514403		
HEB 280	14,29	883890	883890	703602		

HEB 300	13,33	994290	994290	878886	440778	196074
HEB 340	12,55	1229580	1229580	1221120	763704	396851
HEB 450	11,11	1922340	1922340	1922340	1705714	1193706
HEB 500	10,67	2221110	2221110	2221110	2092771	1567374
HEB 600	10,00	2887650	2887650	2887650	2887650	2386801
HEB 700	9,52	3730140	3730140	3730140	3730140	3461240
HEB 900	8,89	5297475	5297475	5297475	5297475	5297475
HD 260x54,1	15,89	519188	519188	363207		
HD 260x142	14,74	1203188	1203188	743046		
HD 260x225	13,85	1809000	1809000	1212766		
HD 320x127	12,92	1106933	1106933	957817	530752	229891
HD 320x300	11,72	2523555	2523555	2224176	1184040	520460
HD 400x237	10,33	2083952	2083952	2083952	1489142	781953
HD 400x382	9,73	3194560	3194560	3194560	2326341	1239937
HD 400x551	9,18	4365270	4365270	4365270	3360711	1842954
HD 400x818	8,47	6098400	6098400	6098400	5024185	2944418
HD 400x1299	7,54	9440000	9440000	9440000	8477598	5575883
UC 254x254x73	15,73	689062	689062	473303		
UC 254x254x132	14,89	1191357	1191357	772413		
UC 305x305x97	13,05	973868	973868	879890	506395	236187
UC 305x305x137	12,71	1319273	1319273	1157835	613351	277023
UC 305x305x198	12,24	1825950	1825950	1602991	836391	372006
UC 356x368x129	11,05	1150313	1150313	1150313	891282	509560
UC 356x368x177	10,80	1592741	1592741	1592741	1135573	615943
UC 356x406x340	9,88	2856867	2856867	2856867	2066386	1103371
UC 356x406x744	8,65	5607983	5607983	5607983	4540201	2572831
UC 356x406x1086	7,92	7340190	7340190	7340190	6361304	3933573

Tabela 116 – Rigidez à flexão da alma - APRIMORAMENTO.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	$(EI)_{fi,w,z}$ [Nm ²]			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	3605	2796	1459		
HEB 260	15,38	3938	3125	1930		
HEB 280	14,29	4943	4058	3002		
HEB 300	13,33	6103	5157	3950	1770	727
HEB 340	12,55	8981	7858	6259	4054	1792
HEB 450	11,11	19112	17676	14899	12399	8624
HEB 500	10,67	23688	22201	18952	15959	12566
HEB 600	10,00	35191	33702	29348	25157	21859
HEB 700	9,52	54682	53512	47500	41371	36485
HEB 900	8,89	91967	91914	83060	73422	65586
HD 260x54,1	15,89	1081	844	567		
HD 260x142	14,74	14663	11316	6570		
HD 260x225	13,85	54432	42861	27079		
HD 320x127	12,92	7426	6217	4743	2368	910
HD 320x300	11,72	96102	81599	62089	29734	11732
HD 400x237	10,33	37760	33931	26991	20345	9022
HD 400x382	9,73	148196	134428	107120	81739	36842
HD 400x551	9,18	414633	381056	305616	244853	113667
HD 400x818	8,47	1240093	1161846	942074	768775	399299
HD 400x1299	7,54	5600000	5385798	4433517	3660493	2368132
UC 254x254x73	15,73	2512	1937	1289		
UC 254x254x132	14,89	14146	11089	6746		
UC 305x305x97	13,05	4705	3943	3087	1679	656
UC 305x305x137	12,71	12744	10729	8212	3902	1572
UC 305x305x198	12,24	33789	28740	21777	10172	4097
UC 356x368x129	11,05	6311	5611	4581	3756	1829
UC 356x368x177	10,80	16753	14927	11936	9001	4147
UC 356x406x340	9,88	105596	96029	75949	57757	26099

UC 356x406x744	8,65	963127	903673	720802	590833	290465
UC 356x406x1086	7,92	2649187	2533294	2042123	1693842	984554

C.3 - Concreto

Tabela 117 – Temperatura média do concreto - APRIMORAMENTO.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	$\theta_{c,t}$ [°C]			
		R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	252,67	407,33		
HEB 260	15,38	233,69	368,23		
HEB 280	14,29	218,52	339,24		
HEB 300	13,33	205,42	314,30	416,18	488,21
HEB 340	12,55	195,56	297,58	388,50	456,78
HEB 450	11,11	177,02	265,03	340,45	403,41
HEB 500	10,67	171,00	253,82	327,25	389,52
HEB 600	10,00	162,16	237,71	306,42	367,06
HEB 700	9,52	156,42	228,59	288,13	345,64
HEB 900	8,89	148,12	213,76	267,58	323,12
HD 260x54,1	15,89	231,70	361,46		
HD 260x142	14,74	235,20	383,73		
HD 260x225	13,85	226,10	373,18		
HD 320x127	12,92	198,83	320,45	418,92	471,93
HD 320x300	11,72	191,50	317,82	415,08	485,35
HD 400x237	10,33	163,99	270,17	358,57	421,05
HD 400x382	9,73	158,97	265,60	352,86	421,86
HD 400x551	9,18	152,16	256,34	341,69	413,65
HD 400x818	8,47	142,04	241,25	323,63	397,41
HD 400x1299	7,54	128,04	219,71	297,89	372,91
UC 254x254x73	15,73	241,14	371,73		
UC 254x254x132	14,89	235,73	382,41		
UC 305x305x97	13,05	200,88	308,11	398,90	462,61
UC 305x305x137	12,71	199,91	317,66	411,28	476,58
UC 305x305x198	12,24	195,61	318,14	412,55	479,17
UC 356x368x129	11,05	169,89	256,42	337,41	403,14
UC 356x368x177	10,80	170,02	267,15	351,14	418,30
UC 356x406x340	9,88	160,37	263,00	347,29	416,71
UC 356x406x744	8,65	143,70	241,89	322,79	394,20
UC 356x406x1086	7,92	132,96	225,34	303,24	375,54

Tabela 118 – Redução vertical do concreto - APRIMORAMENTO.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	$b_{c,fi,v}$ [mm]			
		R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	7,34	30,70		
HEB 260	15,38	6,36	28,18		
HEB 280	14,29	5,58	26,19		
HEB 300	13,33	5,00	24,62	46,94	93,71
HEB 340	12,55	4,70	23,51	44,09	84,48
HEB 450	11,11	4,21	21,67	40,04	70,67
HEB 500	10,67	4,12	21,19	40,61	70,63
HEB 600	10,00	3,94	20,46	39,40	66,00
HEB 700	9,52	3,87	20,00	40,14	66,39
HEB 900	8,89	3,82	19,46	42,22	69,49
HD 260x54,1	15,89	10,01	30,33		
HD 260x142	14,74	8,59	26,24		
HD 260x225	13,85	7,61	22,96		
HD 320x127	12,92	6,26	23,41	50,32	98,27

HD 320x300	11,72	5,21	18,66	41,69	80,25
HD 400x237	10,33	3,65	18,34	37,31	59,52
HD 400x382	9,73	3,29	15,75	33,15	52,51
HD 400x551	9,18	3,02	13,08	29,10	46,48
HD 400x818	8,47	2,75	9,29	23,64	39,49
HD 400x1299	7,54	2,50	3,97	16,36	31,50
UC 254x254x73	15,73	8,42	30,74		
UC 254x254x132	14,89	7,52	27,74		
UC 305x305x97	13,05	6,68	25,88	54,01	88,29
UC 305x305x137	12,71	6,30	24,53	51,21	84,42
UC 305x305x198	12,24	5,76	22,56	47,34	79,14
UC 356x368x129	11,05	5,56	22,67	41,78	69,83
UC 356x368x177	10,80	5,25	21,52	39,78	67,18
UC 356x406x340	9,88	4,26	17,88	33,13	58,26
UC 356x406x744	8,65	2,38	10,50	22,80	45,40
UC 356x406x1086	7,92	1,03	5,08	16,18	37,59

Tabela 119 – Redução horizontal do concreto - APRIMORAMENTO.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	$b_{c,f,i,h}$ [mm]			
		R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	11,68	29,09		
HEB 260	15,38	11,68	27,03		
HEB 280	14,29	11,68	25,89		
HEB 300	13,33	11,68	25,02	38,62	71,36
HEB 340	12,55	11,68	24,77	37,34	64,93
HEB 450	11,11	11,68	24,29	34,71	53,36
HEB 500	10,67	11,68	24,05	33,37	49,14
HEB 600	10,00	11,68	23,82	32,07	44,08
HEB 700	9,52	11,68	23,94	32,90	43,36
HEB 900	8,89	11,68	23,84	32,43	40,06
HD 260x54,1	15,89	11,68	27,03		
HD 260x142	14,74	11,68	27,00		
HD 260x225	13,85	11,68	26,57		
HD 320x127	12,92	11,68	25,47	41,73	60,22
HD 320x300	11,72	11,68	25,20	42,01	60,83
HD 400x237	10,33	11,68	24,24	36,50	48,59
HD 400x382	9,73	11,68	24,13	36,54	48,68
HD 400x551	9,18	11,68	23,95	35,95	47,38
HD 400x818	8,47	11,68	23,70	34,87	44,99
HD 400x1299	7,54	11,68	23,38	33,41	41,74
UC 254x254x73	15,73	11,68	26,82		
UC 254x254x132	14,89	11,68	26,82		
UC 305x305x97	13,05	11,68	25,01	40,96	59,14
UC 305x305x137	12,71	11,68	25,16	41,63	60,30
UC 305x305x198	12,24	11,68	25,12	41,45	59,81
UC 356x368x129	11,05	11,68	23,82	35,48	48,14
UC 356x368x177	10,80	11,68	24,03	36,43	49,87
UC 356x406x340	9,88	11,68	23,95	36,07	48,96
UC 356x406x744	8,65	11,68	23,61	34,49	45,69
UC 356x406x1086	7,92	11,68	23,36	33,36	43,39

Tabela 120 – Fatores de redução da resistência e elasticidade do concreto - APRIMORAMENTO.

k_c				$\varepsilon_{cu,\theta}$			
R30	R60	R90	R120	R30	R60	R90	R120
0,8973	0,7390			0,0063	0,0104		
0,9163	0,7818			0,0060	0,0090		
0,9315	0,8108			0,0058	0,0082		
0,9446	0,8357	0,7257	0,6177	0,0056	0,0074	0,0108	0,0144

0,9522	0,8524	0,7615	0,6648	0,0054	0,0070	0,0097	0,0128
0,9615	0,8850	0,8095	0,7449	0,0052	0,0065	0,0082	0,0102
0,9645	0,8962	0,8228	0,7605	0,0051	0,0063	0,0078	0,0097
0,9689	0,9123	0,8436	0,7829	0,0049	0,0061	0,0072	0,0090
0,9718	0,9214	0,8619	0,8044	0,0048	0,0059	0,0068	0,0084
0,9759	0,9362	0,8824	0,8269	0,0047	0,0057	0,0065	0,0077
0,9183	0,7885			0,0060	0,0088		
0,9148	0,7663			0,0060	0,0095		
0,9239	0,7768			0,0059	0,0092		
0,9506	0,8295	0,7216	0,6421	0,0055	0,0076	0,0109	0,0136
0,9542	0,8322	0,7274	0,6220	0,0054	0,0075	0,0108	0,0143
0,9680	0,8798	0,7914	0,7184	0,0050	0,0066	0,0088	0,0111
0,9705	0,8844	0,7971	0,7172	0,0049	0,0065	0,0086	0,0111
0,9739	0,8937	0,8083	0,7295	0,0048	0,0063	0,0083	0,0107
0,9790	0,9087	0,8264	0,7526	0,0046	0,0061	0,0077	0,0099
0,9860	0,9303	0,8521	0,7771	0,0044	0,0058	0,0070	0,0092
0,9089	0,7783			0,0061	0,0092		
0,9143	0,7676			0,0060	0,0095		
0,9491	0,8419	0,7511	0,6561	0,0055	0,0072	0,0100	0,0131
0,9500	0,8323	0,7331	0,6351	0,0055	0,0075	0,0106	0,0138
0,9522	0,8319	0,7312	0,6312	0,0054	0,0075	0,0106	0,0140
0,9651	0,8936	0,8126	0,7453	0,0050	0,0063	0,0081	0,0102
0,9650	0,8828	0,7989	0,7226	0,0051	0,0065	0,0085	0,0109
0,9698	0,8870	0,8027	0,7249	0,0049	0,0064	0,0084	0,0108
0,9782	0,9081	0,8272	0,7558	0,0047	0,0061	0,0077	0,0098
0,9835	0,9247	0,8468	0,7745	0,0045	0,0059	0,0071	0,0093

Tabela 121 – Módulo de elasticidade secante à elevadas temperaturas - APRIMORAMENTO.

$E_{c,sec,\theta}$ [Pa]			
R30	R60	R90	R120
2,85E+09	1,43E+09		
3,05E+09	1,73E+09		
3,22E+09	1,98E+09		
3,38E+09	2,25E+09	1,34E+09	8,57E+08
3,51E+09	2,45E+09	1,58E+09	1,04E+09
3,73E+09	2,73E+09	1,97E+09	1,46E+09
3,81E+09	2,84E+09	2,10E+09	1,57E+09
3,93E+09	3,01E+09	2,35E+09	1,74E+09
4,01E+09	3,11E+09	2,53E+09	1,92E+09
4,13E+09	3,28E+09	2,71E+09	2,15E+09
3,07E+09	1,78E+09		
3,04E+09	1,61E+09		
3,14E+09	1,69E+09		
3,47E+09	2,18E+09	1,32E+09	9,45E+08
3,55E+09	2,21E+09	1,35E+09	8,72E+08
3,90E+09	2,69E+09	1,81E+09	1,30E+09
3,97E+09	2,73E+09	1,86E+09	1,29E+09
4,07E+09	2,82E+09	1,96E+09	1,37E+09
4,23E+09	2,97E+09	2,14E+09	1,52E+09
4,46E+09	3,21E+09	2,45E+09	1,69E+09
2,97E+09	1,70E+09		
3,03E+09	1,62E+09		
3,44E+09	2,32E+09	1,51E+09	9,99E+08
3,46E+09	2,21E+09	1,39E+09	9,19E+08
3,50E+09	2,21E+09	1,38E+09	9,04E+08
3,82E+09	2,82E+09	2,00E+09	1,47E+09
3,82E+09	2,71E+09	1,87E+09	1,32E+09
3,95E+09	2,75E+09	1,91E+09	1,34E+09
4,20E+09	2,96E+09	2,15E+09	1,54E+09

4,38E+09 3,14E+09 2,39E+09 1,67E+09

Tabela 122 – Resistência plástica à compressão axial do concreto - APRIMORAMENTO.

Perfis	$\frac{Am}{V}$ [m ⁻¹]	20 °C	$N_{fi,pl,Rd,c}$ [N]			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	793319	590753	299821		
HEB 260	15,38	933726	727328	417868		
HEB 280	14,29	1097264	886730	554383		
HEB 300	13,33	1268576	1055635	702573	419883	115905
HEB 340	12,55	1415890	1193893	826767	541305	231566
HEB 450	11,11	1902513	1638955	1232733	913954	548331
HEB 500	10,67	2124977	1841601	1420006	1077519	699285
HEB 600	10,00	2587107	2262180	1804446	1427966	1035395
HEB 700	9,52	3040465	2672789	2169915	1741658	1321992
HEB 900	8,89	3932240	3479096	2897780	2375285	1907549
HD 260x54,1	15,89	947271	714116	417937		
HD 260x142	14,74	931791	708540	418638		
HD 260x225	13,85	922116	714365	437618		
HD 320x127	12,92	1350680	1123079	759016	429540	153072
HD 320x300	11,72	1338683	1125509	786915	469805	208335
HD 400x237	10,33	2012138	1780573	1353973	967024	651488
HD 400x382	9,73	2015276	1792274	1390248	1010295	699820
HD 400x551	9,18	2012882	1799584	1431411	1061298	760091
HD 400x818	8,47	2016927	1815994	1500275	1143337	852323
HD 400x1299	7,54	2014175	1829206	1592548	1254649	961764
UC 254x254x73	15,73	921208	696253	396581		
UC 254x254x132	14,89	921208	706667	406389		
UC 305x305x97	13,05	1374138	1139189	772225	440907	200904
UC 305x305x137	12,71	1374138	1143690	772008	442495	206729
UC 305x305x198	12,24	1374138	1151146	785642	462857	226790
UC 356x368x129	11,05	1919900	1666676	1264349	906668	566290
UC 356x368x177	10,80	1919900	1670006	1258311	900868	558246
UC 356x406x340	9,88	2020261	1784155	1378430	1023999	668504
UC 356x406x744	8,65	2017671	1819503	1488112	1155340	808130
UC 356x406x1086	7,92	2007708	1836275	1566196	1244286	896492

Tabela 123 – Rigidez à flexão do concreto - APRIMORAMENTO.

Perfis	$\frac{Am}{V}$ [m ⁻¹]	20 °C	$(EI)_{fi,c,z}$ [Nm ²]			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	1848847	444792	94423		
HEB 260	15,38	2535105	676740	190221		
HEB 280	14,29	3442822	1005891	344657		
HEB 300	13,33	4558074	1437975	578609	181477	20723
HEB 340	12,55	5086651	1664897	721833	262861	54415
HEB 450	11,11	6904266	2442767	1195199	576285	178719
HEB 500	10,67	7732091	2804122	1427734	739255	274208
HEB 600	10,00	9459653	3560493	1912827	1106674	505081
HEB 700	9,52	11186911	4314355	2372831	1420792	719362
HEB 900	8,89	14530351	5785857	3307249	2050225	1205772
HD 260x54,1	15,89	2535214	656865	190784		
HD 260x142	14,74	2683359	700615	195830		
HD 260x225	13,85	2867860	786699	235983		
HD 320x127	12,92	4864024	1561840	608426	172952	37572
HD 320x300	11,72	5521121	1850860	755365	234144	60143
HD 400x237	10,33	12568269	4939569	2445344	1104890	482536
HD 400x382	9,73	13667250	5511690	2794972	1307380	582826
HD 400x551	9,18	14902911	6205406	3259325	1607839	758619
HD 400x818	8,47	17023814	7431325	4123980	2206365	1127755

HD 400x1299	7,54	21883447	10233893	6153678	3673840	1961912
UC 254x254x73	15,73	2388653	604407	168802		
UC 254x254x132	14,89	2581146	677305	184985		
UC 305x305x97	13,05	5090543	1624312	677825	205349	54752
UC 305x305x137	12,71	5287931	1704107	681178	203041	55570
UC 305x305x198	12,24	5563968	1834129	736517	228566	66229
UC 356x368x129	11,05	10237733	3834610	1971489	925565	361378
UC 356x368x177	10,80	10575671	3977077	1982432	900354	337953
UC 356x406x340	9,88	13392656	5331697	2720376	1321930	546640
UC 356x406x744	8,65	16462501	7145348	3933594	2157338	1020427
UC 356x406x1086	7,92	18991788	8734905	5112038	3042723	1496882

C.4 - Reforços

Tabela 124 – Temperatura média dos reforços - APRIMORAMENTO.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	$\theta_{s,t}$ [°C]			
		R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	153,50	388,17		
HEB 260	15,38	146,85	369,92		
HEB 280	14,29	141,14	354,29		
HEB 300	13,33	136,20	340,73	497,07	613,60
HEB 340	12,55	132,13	329,57	482,53	597,27
HEB 450	11,11	124,67	309,11	455,89	567,33
HEB 500	10,67	122,36	302,79	447,65	558,08
HEB 600	10,00	118,90	293,30	435,30	544,20
HEB 700	9,52	116,43	286,52	426,48	534,29
HEB 900	8,89	113,13	277,49	414,71	521,07
HD 260x54,1	15,89	149,46	377,10		
HD 260x142	14,74	143,51	360,77		
HD 260x225	13,85	138,89	348,12		
HD 320x127	12,92	134,04	334,80	489,35	604,93
HD 320x300	11,72	127,84	317,82	467,23	580,08
HD 400x237	10,33	120,59	297,95	441,35	551,00
HD 400x382	9,73	117,52	289,51	430,37	538,66
HD 400x551	9,18	114,65	281,64	420,11	527,13
HD 400x818	8,47	110,95	271,50	406,91	512,30
HD 400x1299	7,54	106,11	258,22	389,62	492,88
UC 254x254x73	15,73	148,62	374,79		
UC 254x254x132	14,89	144,29	362,92		
UC 305x305x97	13,05	134,71	336,65	491,75	607,63
UC 305x305x137	12,71	132,96	331,84	485,49	600,59
UC 305x305x198	12,24	130,54	325,22	476,87	590,91
UC 356x368x129	11,05	124,35	308,24	454,76	566,07
UC 356x368x177	10,80	123,05	304,68	450,12	560,85
UC 356x406x340	9,88	118,30	291,65	433,15	541,79
UC 356x406x744	8,65	111,87	274,03	410,20	516,00
UC 356x406x1086	7,92	108,11	263,70	396,76	500,90

Tabela 125 – Fatores de redução da tensão de escoamento e módulo de elasticidade do aço de reforço para os reforços - APRIMORAMENTO.

$k_{sy,\theta}$				$k_{sE,\theta}$			
R30	R60	R90	R120	R30	R60	R90	R120
1,0000	0,9471			0,9305	0,5789		
1,0000	0,9580			0,9391	0,6081		
1,0000	0,9674			0,9465	0,6331		
1,0000	0,9756	0,6779	0,3619	0,9529	0,6548	0,4047	0,2182
1,0000	0,9823	0,7172	0,4074	0,9582	0,6727	0,4279	0,2444

1,0000	0,9945	0,7891	0,4882	0,9679	0,7054	0,4706	0,2923
1,0000	0,9983	0,8113	0,5132	0,9709	0,7155	0,4838	0,3071
1,0000	1,0000	0,8447	0,5507	0,9754	0,7301	0,5035	0,3293
1,0000	1,0000	0,8685	0,5774	0,9786	0,7402	0,5176	0,3451
1,0000	1,0000	0,9003	0,6131	0,9829	0,7538	0,5365	0,3663
1,0000	0,9537			0,9357	0,5966		
1,0000	0,9635			0,9434	0,6228		
1,0000	0,9711			0,9494	0,6430		
1,0000	0,9791	0,6988	0,3862	0,9558	0,6643	0,4170	0,2321
1,0000	0,9893	0,7585	0,4538	0,9638	0,6915	0,4524	0,2719
1,0000	1,0000	0,8284	0,5323	0,9732	0,7231	0,4938	0,3184
1,0000	1,0000	0,8580	0,5656	0,9772	0,7357	0,5114	0,3381
1,0000	1,0000	0,8857	0,5967	0,9810	0,7475	0,5278	0,3566
1,0000	1,0000	0,9214	0,6368	0,9858	0,7628	0,5489	0,3803
1,0000	1,0000	0,9462	0,6892	0,9921	0,7827	0,5766	0,4114
1,0000	0,9551			0,9368	0,6003		
1,0000	0,9622			0,9424	0,6193		
1,0000	0,9780	0,6923	0,3786	0,9549	0,6614	0,4132	0,2278
1,0000	0,9809	0,7092	0,3983	0,9572	0,6691	0,4232	0,2391
1,0000	0,9849	0,7325	0,4246	0,9603	0,6796	0,4370	0,2545
1,0000	0,9951	0,7921	0,4916	0,9683	0,7068	0,4724	0,2943
1,0000	0,9972	0,8047	0,5057	0,9700	0,7125	0,4798	0,3026
1,0000	1,0000	0,8505	0,5572	0,9762	0,7325	0,5070	0,3331
1,0000	1,0000	0,9124	0,6268	0,9846	0,7590	0,5437	0,3744
1,0000	1,0000	0,9419	0,6676	0,9895	0,7744	0,5652	0,3986

Tabela 126 – Propriedades mecânicas do aço de reforço reduzidas de acordo com a temperatura média do reforço - APRIMORAMENTO.

$f_{sv,s,t}$ [Pa]				$E_{s,s,t}$ [Pa]			
R30	R60	R90	R120	R30	R60	R90	R120
5,00E+08	4,74E+08			1,95E+11	1,22E+11		
5,00E+08	4,79E+08			1,97E+11	1,28E+11		
5,00E+08	4,84E+08			1,99E+11	1,33E+11		
5,00E+08	4,88E+08	3,39E+08	1,81E+08	2,00E+11	1,38E+11	8,50E+10	4,58E+10
5,00E+08	4,91E+08	3,59E+08	2,04E+08	2,01E+11	1,41E+11	8,99E+10	5,13E+10
5,00E+08	4,97E+08	3,95E+08	2,44E+08	2,03E+11	1,48E+11	9,88E+10	6,14E+10
5,00E+08	4,99E+08	4,06E+08	2,57E+08	2,04E+11	1,50E+11	1,02E+11	6,45E+10
5,00E+08	5,00E+08	4,22E+08	2,75E+08	2,05E+11	1,53E+11	1,06E+11	6,91E+10
5,00E+08	5,00E+08	4,34E+08	2,89E+08	2,06E+11	1,55E+11	1,09E+11	7,25E+10
5,00E+08	5,00E+08	4,50E+08	3,07E+08	2,06E+11	1,58E+11	1,13E+11	7,69E+10
5,00E+08	4,77E+08			1,96E+11	1,25E+11		
5,00E+08	4,82E+08			1,98E+11	1,31E+11		
5,00E+08	4,86E+08			1,99E+11	1,35E+11		
5,00E+08	4,90E+08	3,49E+08	1,93E+08	2,01E+11	1,40E+11	8,76E+10	4,87E+10
5,00E+08	4,95E+08	3,79E+08	2,27E+08	2,02E+11	1,45E+11	9,50E+10	5,71E+10
5,00E+08	5,00E+08	4,14E+08	2,66E+08	2,04E+11	1,52E+11	1,04E+11	6,69E+10
5,00E+08	5,00E+08	4,29E+08	2,83E+08	2,05E+11	1,55E+11	1,07E+11	7,10E+10
5,00E+08	5,00E+08	4,43E+08	2,98E+08	2,06E+11	1,57E+11	1,11E+11	7,49E+10
5,00E+08	5,00E+08	4,61E+08	3,18E+08	2,07E+11	1,60E+11	1,15E+11	7,99E+10
5,00E+08	5,00E+08	4,73E+08	3,45E+08	2,08E+11	1,64E+11	1,21E+11	8,64E+10
5,00E+08	4,78E+08			1,97E+11	1,26E+11		
5,00E+08	4,81E+08			1,98E+11	1,30E+11		
5,00E+08	4,89E+08	3,46E+08	1,89E+08	2,01E+11	1,39E+11	8,68E+10	4,78E+10
5,00E+08	4,90E+08	3,55E+08	1,99E+08	2,01E+11	1,41E+11	8,89E+10	5,02E+10
5,00E+08	4,92E+08	3,66E+08	2,12E+08	2,02E+11	1,43E+11	9,18E+10	5,35E+10
5,00E+08	4,98E+08	3,96E+08	2,46E+08	2,03E+11	1,48E+11	9,92E+10	6,18E+10
5,00E+08	4,99E+08	4,02E+08	2,53E+08	2,04E+11	1,50E+11	1,01E+11	6,36E+10
5,00E+08	5,00E+08	4,25E+08	2,79E+08	2,05E+11	1,54E+11	1,06E+11	7,00E+10
5,00E+08	5,00E+08	4,56E+08	3,13E+08	2,07E+11	1,59E+11	1,14E+11	7,86E+10

Bruno Alfredo

5,00E+08 5,00E+08 4,71E+08 3,34E+08 2,08E+11 1,63E+11 1,19E+11 8,37E+10

Tabela 127 – Momento de segunda ordem das barras de reforço em relação ao eixo Z - APRIMORAMENTO.

$I_{s,z}$
6,19E-06
1,26E-05
1,60E-05
1,97E-05
3,24E-05
3,24E-05
3,24E-05
3,24E-05
3,24E-05
5,08E-05
1,26E-05
1,34E-05
1,44E-05
1,97E-05
2,23E-05
7,02E-05
7,55E-05
8,15E-05
9,15E-05
1,14E-04
1,18E-05
1,28E-05
2,08E-05
2,16E-05
2,27E-05
5,82E-05
6,00E-05
7,40E-05
8,89E-05
1,01E-04

Tabela 128 – Resistência plástica à compressão axial do reforço - APRIMORAMENTO.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	$N_{fi,pl,Rd,s}$ [N]			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	628400	628400	595158		
HEB 260	15,38	981800	981800	940610		
HEB 280	14,29	981800	981800	949821		
HEB 300	13,33	981800	981800	957805	665582	0
HEB 340	12,55	1608400	1608400	1579861	1153480	0
HEB 450	11,11	1608400	1608400	1599607	1269188	785221
HEB 500	10,67	1608400	1608400	1605711	1304953	825405
HEB 600	10,00	1608400	1608400	1608400	1358599	885682
HEB 700	9,52	1608400	1608400	1608400	1396918	928736
HEB 900	8,89	2513200	2513200	2513200	2262584	1540893
HD 260x54,1	15,89	981800	981800	936381		
HD 260x142	14,74	981800	981800	946001		
HD 260x225	13,85	981800	981800	953452		
HD 320x127	12,92	981800	981800	961298	686049	0
HD 320x300	11,72	981800	981800	971303	744677	0
HD 400x237	10,33	1608400	1608400	1608400	1332330	856166
HD 400x382	9,73	1608400	1608400	1608400	1380020	909750

HD 400x551	9,18	1608400	1608400	1608400	1424561	959795
HD 400x818	8,47	1608400	1608400	1608400	1481903	1024223
HD 400x1299	7,54	1608400	1608400	1608400	1521909	1108552
UC 254x254x73	15,73	981800	981800	937745		
UC 254x254x132	14,89	981800	981800	944735		
UC 305x305x97	13,05	981800	981800	960209	679669	0
UC 305x305x137	12,71	981800	981800	963042	696271	0
UC 305x305x198	12,24	981800	981800	966941	719121	0
UC 356x368x129	11,05	1608400	1608400	1600443	1274087	790725
UC 356x368x177	10,80	1608400	1608400	1603886	1294262	813394
UC 356x406x340	9,88	1608400	1608400	1608400	1367931	896166
UC 356x406x744	8,65	1608400	1608400	1608400	1467580	1008131
UC 356x406x1086	7,92	1608400	1608400	1608400	1515021	1073724

Tabela 129 – Rigidez à flexão do reforço - APRIMORAMENTO.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	$(EI)_{fl.s.z}$ [Nm ²]			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	1299677	1209284	752426		
HEB 260	15,38	2655045	2493352	1614594		
HEB 280	14,29	3356012	3176514	2124835		
HEB 300	13,33	4139447	3944645	2710620	1675207	0
HEB 340	12,55	6798917	6514938	4573522	2909574	0
HEB 450	11,11	6798917	6580899	4796107	3199419	1987097
HEB 500	10,67	6798917	6601286	4864906	3289008	2087757
HEB 600	10,00	6798917	6631868	4963550	3423391	2238747
HEB 700	9,52	6798917	6653712	5032656	3519379	2346598
HEB 900	8,89	10661309	10479285	8036139	5719389	3905166
HD 260x54,1	15,89	2655045	2484317	1584102		
HD 260x142	14,74	2822555	2662911	1757796		
HD 260x225	13,85	3030372	2877146	1948543		
HD 320x127	12,92	4139447	3956282	2749890	1726343	0
HD 320x300	11,72	4692903	4523039	3245087	2123225	0
HD 400x237	10,33	14741064	14346409	10658998	7279749	4693634
HD 400x382	9,73	15857610	15496469	11666951	8109776	5362213
HD 400x551	9,18	17122273	16796275	12799698	9037524	6105564
HD 400x818	8,47	19224134	18950543	14663338	10553076	7311393
HD 400x1299	7,54	23920515	23730616	18721753	13792614	9840747
UC 254x254x73	15,73	2479922	2323177	1488801		
UC 254x254x132	14,89	2698102	2542745	1671006		
UC 305x305x97	13,05	4360880	4164095	2884095	1801898	0
UC 305x305x137	12,71	4527519	4333540	3029144	1916122	0
UC 305x305x198	12,24	4759005	4570043	3234423	2079724	0
UC 356x368x129	11,05	12228113	11841021	8642932	5776349	3598668
UC 356x368x177	10,80	12593731	12216368	8973242	6042673	3811448
UC 356x406x340	9,88	15549044	15179169	11390066	7882712	5180053
UC 356x406x744	8,65	18659190	18371233	14161536	10144488	6985901
UC 356x406x1086	7,92	21208109	20984623	16424467	11986424	8452735

C.5 - Soma Ponderada

Tabela 130 – Resistência plástica à compressão axial da seção transversal - APRIMORAMENTO.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	$N_{fl.pl.Rd}$ [N]			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	4947619	2795808	1498868		
HEB 260	15,38	5831276	3501176	2100663		
HEB 280	14,29	6440554	3927849	2467324		

HEB 300	13,33	7177666	4434390	2844019	1712106	454073
HEB 340	12,55	8704370	5767997	3997115	2672870	792144
HEB 450	11,11	10815253	7594465	5254860	4156989	2731685
HEB 500	10,67	11750487	8438593	5809927	4767932	3314985
HEB 600	10,00	13293157	9940669	6931432	5992415	4550067
HEB 700	9,52	15003005	11624279	8209608	7212683	5973527
HEB 900	8,89	18987915	15593551	11542692	10318862	9037126
HD 260x54,1	15,89	4201959	2591763	1820762		
HD 260x142	14,74	7962304	4481573	2487229		
HD 260x225	13,85	11338856	6846909	3343045		
HD 320x127	12,92	7682912	4794594	3020131	1841036	520392
HD 320x300	11,72	14910118	10446671	5136256	2967921	1141880
HD 400x237	10,33	13935500	9922751	5878604	4208913	2583185
HD 400x382	9,73	19875196	15500661	7962017	5472330	3388083
HD 400x551	9,18	26353472	22784808	10820507	7191734	4433117
HD 400x818	8,47	36428797	35511748	16975702	10343182	6331735
HD 400x1299	7,54	52380175	52195206	32975221	18514220	10988321
UC 254x254x73	15,73	5158947	3068580	1980044		
UC 254x254x132	14,89	7655879	4514718	2495189		
UC 305x305x97	13,05	6667956	4122258	2850784	1774127	546897
UC 305x305x137	12,71	8304863	5087243	3260540	1968614	644868
UC 305x305x198	12,24	10995845	6865710	3979995	2365036	855927
UC 356x368x129	11,05	9129458	5946871	4353691	3274317	2015911
UC 356x368x177	10,80	11239878	7245177	4968667	3625055	2204544
UC 356x406x340	9,88	18068957	12582478	7095063	5109349	3145709
UC 356x406x744	8,65	33429078	31247224	14848988	9550286	5723303
UC 356x406x1086	7,92	44438798	44267365	26160558	14917090	8419576

Tabela 131 – Rigidez efetiva à flexão da seção transversal - APRIMORAMENTO.

Perfis	$\frac{Am}{V}$ [m ⁻¹]	20 °C	$(EI)_{fi,eff.z}$ [Nm ²]			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	10637870	3115912	1288157		
HEB 260	15,38	14945345	5192710	2315967		
HEB 280	14,29	19256409	6903364	3113156		
HEB 300	13,33	24835394	9139697	4124321	2250772	747082
HEB 340	12,55	30177389	12935559	6123396	3422827	886207
HEB 450	11,11	35530588	15810766	7107919	4134643	3188609
HEB 500	10,67	37921860	17254570	7545146	4441145	3464587
HEB 600	10,00	40859900	19428810	8226707	4956597	3908528
HEB 700	9,52	43805745	21667044	8873775	5406759	4301903
HEB 900	8,89	52546487	29290900	12691527	7864873	6430980
HD 260x54,1	15,89	10021275	3740725	1927211		
HD 260x142	14,74	21707661	6743777	2921947		
HD 260x225	13,85	34062211	11921333	4184522		
HD 320x127	12,92	26437787	9807951	4304840	2321748	736786
HD 320x300	11,72	59617696	27248643	7831293	4538287	2438188
HD 400x237	10,33	87462564	42829670	16618519	9722635	7702591
HD 400x382	9,73	136637495	77196311	22809337	13471748	11082608
HD 400x551	9,18	199278592	128752520	32367117	18915875	16037357
HD 400x818	8,47	314002988	220931147	62234855	30444521	26644791
HD 400x1299	7,54	571116445	454571143	194639968	66203441	55395861
UC 254x254x73	15,73	12117849	4141147	1998352		
UC 254x254x132	14,89	20059106	6670928	2755785		
UC 305x305x97	13,05	22757927	8356123	4143851	2216010	612056
UC 305x305x137	12,71	30164567	10727283	4819836	2644149	925028
UC 305x305x198	12,24	42318068	15551164	6036881	3422165	1508411
UC 356x368x129	11,05	49051182	21474931	11423529	6619941	5047438
UC 356x368x177	10,80	62045595	26120333	12709607	7428998	5804817
UC 356x406x340	9,88	121964650	57060116	20385160	12392526	10202596

UC 356x406x744	8,65	280353827	191240421	50019515	27470007	23654952
UC 356x406x1086	7,92	444650273	345748240	134384706	50084757	41057901

C.6 - Resistência Crítica

Tabela 132 – Resistência crítica à flambagem para $L_{\theta} = 3,0$ m.
Comprimento de Flambagem 3 m

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	$N_{fi,cr,z}$ [N]			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	11665730	3416980	1412622		
HEB 260	15,38	16389405	5694444	2539742		
HEB 280	14,29	21117015	7570386	3413958		
HEB 300	13,33	27235058	10022800	4522824	2468247	819267
HEB 340	12,55	33093211	14185428	6715055	3753550	971835
HEB 450	11,11	38963650	17338445	7794706	4534143	3496701
HEB 500	10,67	41585973	18921753	8274178	4870260	3799344
HEB 600	10,00	44807894	21306075	9021594	5435517	4286180
HEB 700	9,52	48038375	23760572	9731183	5929175	4717564
HEB 900	8,89	57623671	32121066	13917817	8624798	7052359
HD 260x54,1	15,89	10989557	4102164	2113423		
HD 260x142	14,74	23805114	7395379	3204274		
HD 260x225	13,85	37353394	13073204	4588842		
HD 320x127	12,92	28992278	10755622	4720785	2546081	807977
HD 320x300	11,72	65378120	29881481	8587974	4976789	2673772
HD 400x237	10,33	95913434	46967989	18224245	10662063	8446837
HD 400x382	9,73	149839780	84655228	25013237	14773424	12153439
HD 400x551	9,18	218533430	141192938	35494516	20743578	17586930
HD 400x818	8,47	344342808	242278114	68248156	33386153	29219283
HD 400x1299	7,54	626299264	498493040	213446610	72600196	60748359
UC 254x254x73	15,73	13288709	4541276	2191438		
UC 254x254x132	14,89	21997271	7315491	3022057		
UC 305x305x97	13,05	24956859	9163514	4544241	2430127	671195
UC 305x305x137	12,71	33079150	11763782	5285542	2899634	1014407
UC 305x305x198	12,24	46406955	17053759	6620181	3752824	1654158
UC 356x368x129	11,05	53790641	23549897	12527302	7259578	5535135
UC 356x368x177	10,80	68040608	28644150	13937644	8146808	6365694
UC 356x406x340	9,88	133749205	62573419	22354829	13589926	11188398
UC 356x406x744	8,65	307442374	209718589	54852536	30124233	25940558
UC 356x406x1086	7,92	487613588	379155372	147369321	54924082	45025027

Tabela 133 - Resistência crítica à flambagem para $L_{\theta} = 2,1$ m.
Comprimento de Flambagem 2,1 m

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	$N_{fi,cr,z}$ [N]			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	23807612	6973429	2882902		
HEB 260	15,38	33447766	11621313	5183148		
HEB 280	14,29	43095950	15449766	6967261		
HEB 300	13,33	55581750	20454693	9230252	5037240	1671973
HEB 340	12,55	67537164	28949853	13704193	7660307	1983337
HEB 450	11,11	79517654	35384582	15907563	9253353	7136125
HEB 500	10,67	84869332	38615823	16886079	9939306	7753764
HEB 600	10,00	91444681	43481785	18411416	11092892	8747307
HEB 700	9,52	98037500	48490964	19859557	12100357	9627682
HEB 900	8,89	117599328	65553196	28403709	17601629	14392570
HD 260x54,1	15,89	22427668	8371764	4313108		
HD 260x142	14,74	48581865	15092611	6539334		
HD 260x225	13,85	76231417	26680008	9364984		

HD 320x127	12,92	59167914	21950249	9634256	5196084	1648932
HD 320x300	11,72	133424734	60982614	17526477	10156712	5456678
HD 400x237	10,33	195741702	95853040	37192337	21759311	17238442
HD 400x382	9,73	305795470	172765771	51047422	30149845	24802938
HD 400x551	9,18	445986593	288148853	72437787	42333833	35891693
HD 400x818	8,47	702740425	494445130	139281951	68135007	59631191
HD 400x1299	7,54	1278161764	1017332734	435605326	148163666	123976243
UC 254x254x73	15,73	27119814	9267910	4472323		
UC 254x254x132	14,89	44892390	14929573	6167463		
UC 305x305x97	13,05	50932366	18701049	9273962	4959442	1369785
UC 305x305x137	12,71	67508469	24007718	10786820	5917621	2070219
UC 305x305x198	12,24	94708071	34803590	13510573	7658825	3375833
UC 356x368x129	11,05	109776818	48061014	25565922	14815465	11296194
UC 356x368x177	10,80	138858384	58457450	28444171	16626138	12991213
UC 356x406x340	9,88	272957562	127700855	45622100	27734543	22833465
UC 356x406x744	8,65	627433416	427997120	111943952	61478027	52939914
UC 356x406x1086	7,92	995129772	773786474	300753716	112089964	91887810

Tabela 134 – Resistência crítica à flambagem para $L_{\theta} = 1,5$ m.

Perfis	Am/V [m^{-1}]	20 °C	Comprimento de Flambagem 1,5 m			
			$N_{fi,cr,z}$ [N]			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	46662920	13667920	5650487		
HEB 260	15,38	65557621	22777774	10158970		
HEB 280	14,29	84468061	30281542	13655832		
HEB 300	13,33	108940230	40091199	18091295	9872990	3277066
HEB 340	12,55	132372842	56741712	26860219	15014201	3887340
HEB 450	11,11	155854601	69353781	31178823	18136572	13986804
HEB 500	10,67	166343891	75687014	33096714	19481040	15197377
HEB 600	10,00	179231576	85224299	36086376	21742069	17144722
HEB 700	9,52	192153500	95042290	38924732	23716699	18870257
HEB 900	8,89	230494682	128484265	55671269	34499193	28209436
HD 260x54,1	15,89	43958229	16408658	8453692		
HD 260x142	14,74	95220455	29581518	12817095		
HD 260x225	13,85	149413577	52292816	18355369		
HD 320x127	12,92	115969111	43022488	18883141	10184325	3231907
HD 320x300	11,72	261512479	119525924	34351895	19907155	10695089
HD 400x237	10,33	383653735	187871957	72896981	42648250	33787346
HD 400x382	9,73	599359120	338620911	100052947	59093697	48613758
HD 400x551	9,18	874133721	564771751	141978063	82974312	70347719
HD 400x818	8,47	1377371233	969112454	272992623	133544614	116877134
HD 400x1299	7,54	2505197058	1993972158	853786439	290400786	242993437
UC 254x254x73	15,73	53154836	18165103	8765752		
UC 254x254x132	14,89	87989085	29261963	12088227		
UC 305x305x97	13,05	99827437	36654056	18176965	9720507	2684780
UC 305x305x137	12,71	132316599	47055128	21142167	11598537	4057629
UC 305x305x198	12,24	185627818	68215037	26480723	15011297	6616633
UC 356x368x129	11,05	215162563	94199588	50109207	29038312	22140539
UC 356x368x177	10,80	272162433	114576602	55750575	32587231	25462777
UC 356x406x340	9,88	534996821	250293676	89419316	54359703	44753592
UC 356x406x744	8,65	1229769496	838874355	219410145	120496933	103762232
UC 356x406x1086	7,92	1950454352	1516621489	589477283	219696330	180100108

Tabela 135 – Resistência crítica à flambagem para $L_{\theta} = 4,0$ m.

Perfis	Am/V [m^{-1}]	20 °C	Comprimento de Flambagem 4,0 m			
			$N_{fi,cr,z}$ [N]			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	6561973	1922051	794600		

HEB 260	15,38	9219040	3203125	1428605		
HEB 280	14,29	11878321	4258342	1920351		
HEB 300	13,33	15319720	5637825	2544088	1388389	460837
HEB 340	12,55	18614931	7979303	3777218	2111372	546657
HEB 450	11,11	21917053	9752875	4384522	2550455	1966894
HEB 500	10,67	23392110	10643486	4654225	2739521	2137131
HEB 600	10,00	25204440	11984667	5074647	3057478	2410976
HEB 700	9,52	27021586	13365322	5473790	3335161	2653630
HEB 900	8,89	32413315	18068100	7828772	4851449	3966952
HD 260x54,1	15,89	6181626	2307467	1188800		
HD 260x142	14,74	13390377	4159901	1802404		
HD 260x225	13,85	21011284	7353677	2581224		
HD 320x127	12,92	16308156	6050037	2655442	1432171	454487
HD 320x300	11,72	36775192	16808333	4830735	2799444	1503997
HD 400x237	10,33	53951306	26419494	10251138	5997410	4751346
HD 400x382	9,73	84284876	47618566	14069946	8310051	6836310
HD 400x551	9,18	122925055	79421028	19965665	11668263	9892648
HD 400x818	8,47	193692830	136281439	38389588	18779711	16435847
HD 400x1299	7,54	352293336	280402335	120063718	40837611	34170952
UC 254x254x73	15,73	7474899	2554468	1232684		
UC 254x254x132	14,89	12373465	4114964	1699907		
UC 305x305x97	13,05	14038233	5154477	2556136	1366946	377547
UC 305x305x137	12,71	18607022	6617127	2973117	1631044	570604
UC 305x305x198	12,24	26103912	9592740	3723852	2110964	930464
UC 356x368x129	11,05	30257235	13246817	7046607	4083513	3113513
UC 356x368x177	10,80	38272842	16112335	7839925	4582579	3580703
UC 356x406x340	9,88	75233928	35197548	12574591	7644333	6293474
UC 356x406x744	8,65	172936335	117966706	30854552	16944881	14591564
UC 356x406x1086	7,92	274282643	213274897	82895243	30894796	25326578

Tabela 136 – Resistência crítica à flambagem para $L_{\theta} = 2,8$ m.

Perfis	Am/V [m^{-1}]	20 °C	Comprimento de Flambagem 2,8 m			
			$N_{fi,cr,z}$ [N]			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	13391782	3922554	1621632		
HEB 260	15,38	18814368	6536989	2915521		
HEB 280	14,29	24241472	8690494	3919085		
HEB 300	13,33	31264734	11505765	5192017	2833447	940485
HEB 340	12,55	37989655	16284292	7708609	4308923	1115627
HEB 450	11,11	44728680	19903827	8948004	5205011	4014070
HEB 500	10,67	47738999	21721401	9498419	5590860	4361492
HEB 600	10,00	51437633	24458504	10356422	6239752	4920360
HEB 700	9,52	55146094	27276167	11171001	6806451	5415571
HEB 900	8,89	66149622	36873673	15977086	9900916	8095820
HD 260x54,1	15,89	12615563	4709117	2426123		
HD 260x142	14,74	27327299	8489594	3678376		
HD 260x225	13,85	42880172	15007505	5267804		
HD 320x127	12,92	33281952	12347015	5419269	2922797	927524
HD 320x300	11,72	75051413	34302721	9858643	5713150	3069381
HD 400x237	10,33	110104707	53917335	20920690	12239613	9696624
HD 400x382	9,73	172009952	97180746	28714175	16959288	13951652
HD 400x551	9,18	250867458	162083730	40746255	23812781	20189078
HD 400x818	8,47	395291489	278125385	78346097	38325941	33542545
HD 400x1299	7,54	718965992	572249663	245027996	83342062	69736637
UC 254x254x73	15,73	15254895	5213199	2515681		
UC 254x254x132	14,89	25251970	8397885	3469198		
UC 305x305x97	13,05	28649456	10519340	5216604	2789686	770504
UC 305x305x137	12,71	37973514	13504342	6067586	3328662	1164498
UC 305x305x198	12,24	53273290	19577020	7599697	4308089	1898906

UC 356x368x129	11,05	61749460	27034320	14380831	8333699	6354109
UC 356x368x177	10,80	78107841	32882316	15999846	9352203	7307557
UC 356x406x340	9,88	153538629	71831731	25662431	15600680	12843824
UC 356x406x744	8,65	352931297	240748380	62968473	34581390	29778702
UC 356x406x1086	7,92	559760497	435254892	169173965	63050605	51686893

Tabela 137 – Resistência crítica à flambagem para $L_{\theta} = 2,0$ m.

Perfis	Am/V [m^{-1}]	20 °C	Comprimento de Flambagem 2,0 m			
			$N_{fi,cr,z}$ [N]			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	26247893	7688205	3178399		
HEB 260	15,38	36876162	12812498	5714420		
HEB 280	14,29	47513285	17033368	7681406		
HEB 300	13,33	61278879	22551300	10176353	5553557	1843350
HEB 340	12,55	74459724	31917213	15108873	8445488	2186629
HEB 450	11,11	87668213	39011502	17538088	10201822	7867577
HEB 500	10,67	93568438	42573945	18616902	10958085	8548525
HEB 600	10,00	100817761	47938668	20298587	12229914	9643906
HEB 700	9,52	108086344	53461288	21895162	13340643	10614520
HEB 900	8,89	129653259	72272399	31315089	19405796	15867808
HD 260x54,1	15,89	24726504	9229870	4755202		
HD 260x142	14,74	53561506	16639604	7209616		
HD 260x225	13,85	84045137	29414709	10324895		
HD 320x127	12,92	65232625	24200150	10621767	5728683	1817948
HD 320x300	11,72	147100769	67233332	19322941	11197775	6015988
HD 400x237	10,33	215805226	105677976	41004552	23989641	19005382
HD 400x382	9,73	337139505	190474262	56279783	33240205	27345239
HD 400x551	9,18	491700218	317684110	79862660	46673051	39570592
HD 400x818	8,47	774771318	545125755	153558351	75118845	65743388
HD 400x1299	7,54	1409173345	1121609339	480254872	163350442	136683808
UC 254x254x73	15,73	29899595	10217870	4930736		
UC 254x254x132	14,89	49493860	16459854	6799628		
UC 305x305x97	13,05	56152933	20617906	10224543	5467785	1510188
UC 305x305x137	12,71	74428087	26468510	11892469	6524177	2282416
UC 305x305x198	12,24	104415648	38370959	14895407	8443855	3721856
UC 356x368x129	11,05	121028942	52987268	28186429	16334050	12454053
UC 356x368x177	10,80	153091369	64449338	31359698	18330317	14322812
UC 356x406x340	9,88	300935712	140790193	50298365	30577333	25173895
UC 356x406x744	8,65	691745341	471866825	123418207	67779525	58366256
UC 356x406x1086	7,92	1097130573	853099588	331580972	123579186	101306311

C.7 - Esbeltez Adimensional

Tabela 138 – Esbeltez adimensional para $L_{\theta} = 3,0$ m.

Perfis	Am/V [m^{-1}]	20 °C	Comprimento de Flambagem 3,0 m			
			λ_{θ}			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	0,6512	0,9045	1,0301		
HEB 260	15,38	0,5965	0,7841	0,9095		
HEB 280	14,29	0,5523	0,7203	0,8501		
HEB 300	13,33	0,5134	0,6652	0,7930	0,8329	0,7445
HEB 340	12,55	0,5129	0,6377	0,7715	0,8439	0,9028
HEB 450	11,11	0,5269	0,6618	0,8211	0,9575	0,8839
HEB 500	10,67	0,5316	0,6678	0,8380	0,9894	0,9341
HEB 600	10,00	0,5447	0,6831	0,8765	1,0500	1,0303
HEB 700	9,52	0,5588	0,6994	0,9185	1,1029	1,1253

HEB 900	8,89	0,5740	0,6968	0,9107	1,0938	1,1320
HD 260x54,1	15,89	0,6184	0,7949	0,9282		
HD 260x142	14,74	0,5783	0,7785	0,8810		
HD 260x225	13,85	0,5510	0,7237	0,8535		
HD 320x127	12,92	0,5148	0,6677	0,7998	0,8503	0,8025
HD 320x300	11,72	0,4776	0,5913	0,7734	0,7722	0,6535
HD 400x237	10,33	0,3812	0,4596	0,5680	0,6283	0,5530
HD 400x382	9,73	0,3642	0,4279	0,5642	0,6086	0,5280
HD 400x551	9,18	0,3473	0,4017	0,5521	0,5888	0,5021
HD 400x818	8,47	0,3253	0,3829	0,4987	0,5566	0,4655
HD 400x1299	7,54	0,2892	0,3236	0,3931	0,5050	0,4253
UC 254x254x73	15,73	0,6231	0,8220	0,9505		
UC 254x254x132	14,89	0,5899	0,7856	0,9087		
UC 305x305x97	13,05	0,5169	0,6707	0,7920	0,8544	0,9027
UC 305x305x137	12,71	0,5011	0,6576	0,7854	0,8240	0,7973
UC 305x305x198	12,24	0,4868	0,6345	0,7754	0,7939	0,7193
UC 356x368x129	11,05	0,4120	0,5025	0,5895	0,6716	0,6035
UC 356x368x177	10,80	0,4064	0,5029	0,5971	0,6671	0,5885
UC 356x406x340	9,88	0,3676	0,4484	0,5634	0,6132	0,5302
UC 356x406x744	8,65	0,3297	0,3860	0,5203	0,5631	0,4697
UC 356x406x1086	7,92	0,3019	0,3417	0,4213	0,5211	0,4324

Tabela 139 – Esbeltez adimensional para $L_{\theta} = 2,1$ m.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	Comprimento de Flambagem 2,1 m λ_{θ}			
			R30	R60	R90	R120
			HEB 240	16,67	0,4559	0,6332
HEB 260	15,38	0,4175	0,5489	0,6366		
HEB 280	14,29	0,3866	0,5042	0,5951		
HEB 300	13,33	0,3594	0,4656	0,5551	0,5830	0,5211
HEB 340	12,55	0,3590	0,4464	0,5401	0,5907	0,6320
HEB 450	11,11	0,3688	0,4633	0,5747	0,6703	0,6187
HEB 500	10,67	0,3721	0,4675	0,5866	0,6926	0,6539
HEB 600	10,00	0,3813	0,4781	0,6136	0,7350	0,7212
HEB 700	9,52	0,3912	0,4896	0,6429	0,7721	0,7877
HEB 900	8,89	0,4018	0,4877	0,6375	0,7657	0,7924
HD 260x54,1	15,89	0,4328	0,5564	0,6497		
HD 260x142	14,74	0,4048	0,5449	0,6167		
HD 260x225	13,85	0,3857	0,5066	0,5975		
HD 320x127	12,92	0,3603	0,4674	0,5599	0,5952	0,5618
HD 320x300	11,72	0,3343	0,4139	0,5413	0,5406	0,4575
HD 400x237	10,33	0,2668	0,3217	0,3976	0,4398	0,3871
HD 400x382	9,73	0,2549	0,2995	0,3949	0,4260	0,3696
HD 400x551	9,18	0,2431	0,2812	0,3865	0,4122	0,3514
HD 400x818	8,47	0,2277	0,2680	0,3491	0,3896	0,3259
HD 400x1299	7,54	0,2024	0,2265	0,2751	0,3535	0,2977
UC 254x254x73	15,73	0,4362	0,5754	0,6654		
UC 254x254x132	14,89	0,4130	0,5499	0,6361		
UC 305x305x97	13,05	0,3618	0,4695	0,5544	0,5981	0,6319
UC 305x305x137	12,71	0,3507	0,4603	0,5498	0,5768	0,5581
UC 305x305x198	12,24	0,3407	0,4442	0,5428	0,5557	0,5035
UC 356x368x129	11,05	0,2884	0,3518	0,4127	0,4701	0,4224
UC 356x368x177	10,80	0,2845	0,3521	0,4179	0,4669	0,4119
UC 356x406x340	9,88	0,2573	0,3139	0,3944	0,4292	0,3712
UC 356x406x744	8,65	0,2308	0,2702	0,3642	0,3941	0,3288
UC 356x406x1086	7,92	0,2113	0,2392	0,2949	0,3648	0,3027

Tabela 140 – Esbeltez adimensional para $L_{\theta} = 1,5$ m.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	Comprimento de Flambagem 1,5 m			
			λ_{θ}			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	0,3256	0,4523	0,5150		
HEB 260	15,38	0,2982	0,3921	0,4547		
HEB 280	14,29	0,2761	0,3602	0,4251		
HEB 300	13,33	0,2567	0,3326	0,3965	0,4164	0,3722
HEB 340	12,55	0,2564	0,3188	0,3858	0,4219	0,4514
HEB 450	11,11	0,2634	0,3309	0,4105	0,4788	0,4419
HEB 500	10,67	0,2658	0,3339	0,4190	0,4947	0,4670
HEB 600	10,00	0,2723	0,3415	0,4383	0,5250	0,5152
HEB 700	9,52	0,2794	0,3497	0,4592	0,5515	0,5626
HEB 900	8,89	0,2870	0,3484	0,4553	0,5469	0,5660
HD 260x54,1	15,89	0,3092	0,3974	0,4641		
HD 260x142	14,74	0,2892	0,3892	0,4405		
HD 260x225	13,85	0,2755	0,3618	0,4268		
HD 320x127	12,92	0,2574	0,3338	0,3999	0,4252	0,4013
HD 320x300	11,72	0,2388	0,2956	0,3867	0,3861	0,3268
HD 400x237	10,33	0,1906	0,2298	0,2840	0,3141	0,2765
HD 400x382	9,73	0,1821	0,2140	0,2821	0,3043	0,2640
HD 400x551	9,18	0,1736	0,2009	0,2761	0,2944	0,2510
HD 400x818	8,47	0,1626	0,1914	0,2494	0,2783	0,2328
HD 400x1299	7,54	0,1446	0,1618	0,1965	0,2525	0,2127
UC 254x254x73	15,73	0,3115	0,4110	0,4753		
UC 254x254x132	14,89	0,2950	0,3928	0,4543		
UC 305x305x97	13,05	0,2584	0,3354	0,3960	0,4272	0,4513
UC 305x305x137	12,71	0,2505	0,3288	0,3927	0,4120	0,3987
UC 305x305x198	12,24	0,2434	0,3173	0,3877	0,3969	0,3597
UC 356x368x129	11,05	0,2060	0,2513	0,2948	0,3358	0,3017
UC 356x368x177	10,80	0,2032	0,2515	0,2985	0,3335	0,2942
UC 356x406x340	9,88	0,1838	0,2242	0,2817	0,3066	0,2651
UC 356x406x744	8,65	0,1649	0,1930	0,2601	0,2815	0,2349
UC 356x406x1086	7,92	0,1509	0,1708	0,2107	0,2606	0,2162

Tabela 141 – Esbeltez adimensional para $L_{\theta} = 4,0$ m.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	Comprimento de Flambagem 4,0 m			
			λ_{θ}			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	0,8683	1,2061	1,3734		
HEB 260	15,38	0,7953	1,0455	1,2126		
HEB 280	14,29	0,7363	0,9604	1,1335		
HEB 300	13,33	0,6845	0,8869	1,0573	1,1105	0,9926
HEB 340	12,55	0,6838	0,8502	1,0287	1,1251	1,2038
HEB 450	11,11	0,7025	0,8824	1,0948	1,2767	1,1785
HEB 500	10,67	0,7088	0,8904	1,1173	1,3193	1,2454
HEB 600	10,00	0,7262	0,9107	1,1687	1,4000	1,3738
HEB 700	9,52	0,7451	0,9326	1,2247	1,4706	1,5004
HEB 900	8,89	0,7654	0,9290	1,2142	1,4584	1,5093
HD 260x54,1	15,89	0,8245	1,0598	1,2376		
HD 260x142	14,74	0,7711	1,0379	1,1747		
HD 260x225	13,85	0,7346	0,9649	1,1380		
HD 320x127	12,92	0,6864	0,8902	1,0665	1,1338	1,0701
HD 320x300	11,72	0,6367	0,7884	1,0311	1,0297	0,8713
HD 400x237	10,33	0,5082	0,6128	0,7573	0,8377	0,7373
HD 400x382	9,73	0,4856	0,5705	0,7523	0,8115	0,7040
HD 400x551	9,18	0,4630	0,5356	0,7362	0,7851	0,6694
HD 400x818	8,47	0,4337	0,5105	0,6650	0,7421	0,6207
HD 400x1299	7,54	0,3856	0,4314	0,5241	0,6733	0,5671

UC 254x254x73	15,73	0,8308	1,0960	1,2674		
UC 254x254x132	14,89	0,7866	1,0474	1,2115		
UC 305x305x97	13,05	0,6892	0,8943	1,0561	1,1392	1,2036
UC 305x305x137	12,71	0,6681	0,8768	1,0472	1,0986	1,0631
UC 305x305x198	12,24	0,6490	0,8460	1,0338	1,0585	0,9591
UC 356x368x129	11,05	0,5493	0,6700	0,7860	0,8955	0,8047
UC 356x368x177	10,80	0,5419	0,6706	0,7961	0,8894	0,7846
UC 356x406x340	9,88	0,4901	0,5979	0,7512	0,8175	0,7070
UC 356x406x744	8,65	0,4397	0,5147	0,6937	0,7507	0,6263
UC 356x406x1086	7,92	0,4025	0,4556	0,5618	0,6949	0,5766

Tabela 142 – Esbeltez adimensional para $L_{\theta} = 2,8$ m.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	λ_{θ}			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	0,6078	0,8442	0,9614		
HEB 260	15,38	0,5567	0,7318	0,8488		
HEB 280	14,29	0,5154	0,6723	0,7935		
HEB 300	13,33	0,4791	0,6208	0,7401	0,7773	0,6948
HEB 340	12,55	0,4787	0,5952	0,7201	0,7876	0,8426
HEB 450	11,11	0,4917	0,6177	0,7663	0,8937	0,8249
HEB 500	10,67	0,4961	0,6233	0,7821	0,9235	0,8718
HEB 600	10,00	0,5084	0,6375	0,8181	0,9800	0,9616
HEB 700	9,52	0,5216	0,6528	0,8573	1,0294	1,0503
HEB 900	8,89	0,5358	0,6503	0,8500	1,0209	1,0565
HD 260x54,1	15,89	0,5771	0,7419	0,8663		
HD 260x142	14,74	0,5398	0,7266	0,8223		
HD 260x225	13,85	0,5142	0,6754	0,7966		
HD 320x127	12,92	0,4805	0,6232	0,7465	0,7937	0,7490
HD 320x300	11,72	0,4457	0,5519	0,7218	0,7208	0,6099
HD 400x237	10,33	0,3558	0,4290	0,5301	0,5864	0,5161
HD 400x382	9,73	0,3399	0,3994	0,5266	0,5680	0,4928
HD 400x551	9,18	0,3241	0,3749	0,5153	0,5496	0,4686
HD 400x818	8,47	0,3036	0,3573	0,4655	0,5195	0,4345
HD 400x1299	7,54	0,2699	0,3020	0,3668	0,4713	0,3969
UC 254x254x73	15,73	0,5815	0,7672	0,8872		
UC 254x254x132	14,89	0,5506	0,7332	0,8481		
UC 305x305x97	13,05	0,4824	0,6260	0,7392	0,7975	0,8425
UC 305x305x137	12,71	0,4677	0,6138	0,7331	0,7690	0,7442
UC 305x305x198	12,24	0,4543	0,5922	0,7237	0,7409	0,6714
UC 356x368x129	11,05	0,3845	0,4690	0,5502	0,6268	0,5633
UC 356x368x177	10,80	0,3793	0,4694	0,5573	0,6226	0,5493
UC 356x406x340	9,88	0,3431	0,4185	0,5258	0,5723	0,4949
UC 356x406x744	8,65	0,3078	0,3603	0,4856	0,5255	0,4384
UC 356x406x1086	7,92	0,2818	0,3189	0,3932	0,4864	0,4036

Tabela 143 – Esbeltez adimensional para $L_{\theta} = 2,0$ m.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	λ_{θ}			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	0,4342	0,6030	0,6867		
HEB 260	15,38	0,3977	0,5227	0,6063		
HEB 280	14,29	0,3682	0,4802	0,5668		
HEB 300	13,33	0,3422	0,4434	0,5287	0,5552	0,4963
HEB 340	12,55	0,3419	0,4251	0,5143	0,5626	0,6019
HEB 450	11,11	0,3512	0,4412	0,5474	0,6383	0,5892
HEB 500	10,67	0,3544	0,4452	0,5586	0,6596	0,6227
HEB 600	10,00	0,3631	0,4554	0,5844	0,7000	0,6869

HEB 700	9,52	0,3726	0,4663	0,6123	0,7353	0,7502
HEB 900	8,89	0,3827	0,4645	0,6071	0,7292	0,7547
HD 260x54,1	15,89	0,4122	0,5299	0,6188		
HD 260x142	14,74	0,3856	0,5190	0,5874		
HD 260x225	13,85	0,3673	0,4825	0,5690		
HD 320x127	12,92	0,3432	0,4451	0,5332	0,5669	0,5350
HD 320x300	11,72	0,3184	0,3942	0,5156	0,5148	0,4357
HD 400x237	10,33	0,2541	0,3064	0,3786	0,4189	0,3687
HD 400x382	9,73	0,2428	0,2853	0,3761	0,4057	0,3520
HD 400x551	9,18	0,2315	0,2678	0,3681	0,3925	0,3347
HD 400x818	8,47	0,2168	0,2552	0,3325	0,3711	0,3103
HD 400x1299	7,54	0,1928	0,2157	0,2620	0,3367	0,2835
UC 254x254x73	15,73	0,4154	0,5480	0,6337		
UC 254x254x132	14,89	0,3933	0,5237	0,6058		
UC 305x305x97	13,05	0,3446	0,4471	0,5280	0,5696	0,6018
UC 305x305x137	12,71	0,3340	0,4384	0,5236	0,5493	0,5315
UC 305x305x198	12,24	0,3245	0,4230	0,5169	0,5292	0,4796
UC 356x368x129	11,05	0,2746	0,3350	0,3930	0,4477	0,4023
UC 356x368x177	10,80	0,2710	0,3353	0,3980	0,4447	0,3923
UC 356x406x340	9,88	0,2450	0,2989	0,3756	0,4088	0,3535
UC 356x406x744	8,65	0,2198	0,2573	0,3469	0,3754	0,3131
UC 356x406x1086	7,92	0,2013	0,2278	0,2809	0,3474	0,2883

C.8 - Fator de Redução

Os campos das tabelas preenchidos com “-”, representam que as colunas possuem um comprimento de flambagem maior que o permitido, para a aplicação do modelo, de acordo com a EN 1994-1-2 anexo G [1].

Tabela 144 – Fator de redução para $L_{\theta} = 3,0$ m.

Perfis	Am/V [m^{-1}]	20 °C	Comprimento de Flambagem 3,0 m			
			χ_z			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	-	-	-		
HEB 260	15,38	-	-	-		
HEB 280	14,29	-	-	-		
HEB 300	13,33	0,8355	0,7461	0,6666	0,6415	0,6970
HEB 340	12,55	0,8358	0,7628	0,6800	0,6347	0,5981
HEB 450	11,11	0,8279	0,7482	0,6489	0,5650	0,6098
HEB 500	10,67	0,8252	0,7445	0,6383	0,5461	0,5790
HEB 600	10,00	0,8177	0,7351	0,6143	0,5115	0,5225
HEB 700	9,52	0,8095	0,7250	0,5885	0,4827	0,4710
HEB 900	8,89	0,8007	0,7267	0,5933	0,4876	0,4675
HD 260x54,1	15,89	-	-	-		
HD 260x142	14,74	-	-	-		
HD 260x225	13,85	-	-	-		
HD 320x127	12,92	0,8347	0,7446	0,6623	0,6306	0,6606
HD 320x300	11,72	0,8555	0,7905	0,6789	0,6796	0,7532
HD 400x237	10,33	0,9072	0,8653	0,8042	0,7685	0,8129
HD 400x382	9,73	0,9161	0,8825	0,8064	0,7803	0,8272
HD 400x551	9,18	0,9249	0,8964	0,8134	0,7920	0,8418
HD 400x818	8,47	0,9362	0,9064	0,8437	0,8108	0,8621
HD 400x1299	7,54	0,9547	0,9371	0,9010	0,8402	0,8839
UC 254x254x73	15,73	-	-	-		

UC 254x254x132	14,89	-	-	-		
UC 305x305x97	13,05	0,8335	0,7427	0,6671	0,6281	0,5982
UC 305x305x137	12,71	0,8424	0,7507	0,6713	0,6471	0,6638
UC 305x305x198	12,24	0,8504	0,7648	0,6776	0,6660	0,7127
UC 356x368x129	11,05	0,8910	0,8416	0,7916	0,7422	0,7833
UC 356x368x177	10,80	0,8939	0,8414	0,7871	0,7450	0,7922
UC 356x406x340	9,88	0,9144	0,8714	0,8069	0,7776	0,8259
UC 356x406x744	8,65	0,9339	0,9047	0,8316	0,8071	0,8598
UC 356x406x1086	7,92	0,9482	0,9278	0,8860	0,8311	0,8800

Tabela 145 – Fator de redução para $L_{\theta} = 2,1$ m.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	χ_z			
			Comprimento de Flambagem 2,1 m			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	0,8673	0,7655	0,7116		
HEB 260	15,38	0,8880	0,8153	0,7635		
HEB 280	14,29	0,9044	0,8406	0,7883		
HEB 300	13,33	0,9186	0,8620	0,8117	0,7954	0,8311
HEB 340	12,55	0,9188	0,8725	0,8203	0,7909	0,7663
HEB 450	11,11	0,9137	0,8633	0,8002	0,7430	0,7742
HEB 500	10,67	0,9120	0,8610	0,7933	0,7293	0,7530
HEB 600	10,00	0,9072	0,8551	0,7773	0,7029	0,7115
HEB 700	9,52	0,9020	0,8488	0,7596	0,6797	0,6699
HEB 900	8,89	0,8964	0,8498	0,7630	0,6837	0,6669
HD 260x54,1	15,89	0,8798	0,8109	0,7555		
HD 260x142	14,74	0,8948	0,8175	0,7754		
HD 260x225	13,85	0,9049	0,8393	0,7869		
HD 320x127	12,92	0,9181	0,8611	0,8089	0,7882	0,8078
HD 320x300	11,72	0,9316	0,8899	0,8196	0,8200	0,8665
HD 400x237	10,33	0,9660	0,9380	0,8986	0,8761	0,9041
HD 400x382	9,73	0,9721	0,9494	0,9000	0,8835	0,9133
HD 400x551	9,18	0,9781	0,9587	0,9044	0,8909	0,9227
HD 400x818	8,47	0,9859	0,9654	0,9239	0,9028	0,9359
HD 400x1299	7,54	0,9988	0,9865	0,9618	0,9217	0,9503
UC 254x254x73	15,73	0,8780	0,7999	0,7460		
UC 254x254x132	14,89	0,8904	0,8147	0,7638		
UC 305x305x97	13,05	0,9173	0,8599	0,8121	0,7865	0,7663
UC 305x305x137	12,71	0,9231	0,8649	0,8147	0,7991	0,8099
UC 305x305x198	12,24	0,9283	0,8737	0,8188	0,8113	0,8410
UC 356x368x129	11,05	0,9551	0,9226	0,8906	0,8596	0,8854
UC 356x368x177	10,80	0,9570	0,9224	0,8878	0,8613	0,8910
UC 356x406x340	9,88	0,9709	0,9420	0,9003	0,8818	0,9125
UC 356x406x744	8,65	0,9843	0,9643	0,9161	0,9004	0,9344
UC 356x406x1086	7,92	0,9942	0,9801	0,9517	0,9158	0,9478

Tabela 146 – Fator de redução para $L_{\theta} = 1,5$ m.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	χ_z			
			Comprimento de Flambagem 1,5 m			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	0,9360	0,8693	0,8345		
HEB 260	15,38	0,9500	0,9015	0,8680		
HEB 280	14,29	0,9613	0,9182	0,8840		
HEB 300	13,33	0,9712	0,9325	0,8992	0,8886	0,9119
HEB 340	12,55	0,9713	0,9395	0,9048	0,8857	0,8698
HEB 450	11,11	0,9678	0,9333	0,8917	0,8548	0,8749
HEB 500	10,67	0,9666	0,9318	0,8872	0,8459	0,8612
HEB 600	10,00	0,9632	0,9278	0,8769	0,8289	0,8345
HEB 700	9,52	0,9596	0,9236	0,8655	0,8138	0,8073

HEB 900	8,89	0,9558	0,9243	0,8676	0,8164	0,8053
HD 260x54,1	15,89	0,9445	0,8987	0,8629		
HD 260x142	14,74	0,9547	0,9030	0,8757		
HD 260x225	13,85	0,9616	0,9173	0,8831		
HD 320x127	12,92	0,9708	0,9318	0,8974	0,8839	0,8966
HD 320x300	11,72	0,9803	0,9514	0,9043	0,9046	0,9355
HD 400x237	10,33	1,0000	0,9848	0,9573	0,9419	0,9611
HD 400x382	9,73	1,0000	0,9929	0,9583	0,9469	0,9675
HD 400x551	9,18	1,0000	0,9996	0,9613	0,9520	0,9741
HD 400x818	8,47	1,0000	1,0000	0,9749	0,9602	0,9833
HD 400x1299	7,54	1,0000	1,0000	1,0000	0,9733	0,9936
UC 254x254x73	15,73	0,9433	0,8915	0,8567		
UC 254x254x132	14,89	0,9517	0,9011	0,8682		
UC 305x305x97	13,05	0,9703	0,9310	0,8994	0,8828	0,8698
UC 305x305x137	12,71	0,9743	0,9344	0,9012	0,8910	0,8980
UC 305x305x198	12,24	0,9779	0,9403	0,9038	0,8989	0,9185
UC 356x368x129	11,05	0,9969	0,9739	0,9518	0,9308	0,9483
UC 356x368x177	10,80	0,9984	0,9738	0,9499	0,9320	0,9521
UC 356x406x340	9,88	1,0000	0,9877	0,9585	0,9458	0,9669
UC 356x406x744	8,65	1,0000	1,0000	0,9694	0,9586	0,9823
UC 356x406x1086	7,92	1,0000	1,0000	0,9946	0,9692	0,9917

Tabela 147 – Fator de redução para $L_{\theta} = 4,0$ m.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	Comprimento de Flambagem 4,0 m			
			χ_z			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	-	-	-		
HEB 260	15,38	-	-	-		
HEB 280	14,29	-	-	-		
HEB 300	13,33	0,7343	0,6079	0,5074	0,4787	0,5442
HEB 340	12,55	0,7347	0,6307	0,5235	0,4710	0,4320
HEB 450	11,11	0,7232	0,6107	0,4870	0,3988	0,4442
HEB 500	10,67	0,7193	0,6057	0,4751	0,3808	0,4127
HEB 600	10,00	0,7084	0,5932	0,4490	0,3492	0,3591
HEB 700	9,52	0,6966	0,5799	0,4222	0,3243	0,3144
HEB 900	8,89	0,6839	0,5821	0,4270	0,3284	0,3115
HD 260x54,1	15,89	-	-	-		
HD 260x142	14,74	-	-	-		
HD 260x225	13,85	-	-	-		
HD 320x127	12,92	0,7331	0,6059	0,5024	0,4666	0,5004
HD 320x300	11,72	0,7634	0,6695	0,5221	0,5229	0,6175
HD 400x237	10,33	0,8384	0,7777	0,6890	0,6385	0,7015
HD 400x382	9,73	0,8510	0,8027	0,6921	0,6549	0,7222
HD 400x551	9,18	0,8634	0,8229	0,7022	0,6715	0,7435
HD 400x818	8,47	0,8794	0,8371	0,7462	0,6985	0,7731
HD 400x1299	7,54	0,9049	0,8806	0,8294	0,7411	0,8047
UC 254x254x73	15,73	-	-	-		
UC 254x254x132	14,89	-	-	-		
UC 305x305x97	13,05	0,7314	0,6033	0,5081	0,4638	0,4321
UC 305x305x137	12,71	0,7443	0,6141	0,5130	0,4850	0,5042
UC 305x305x198	12,24	0,7560	0,6333	0,5206	0,5068	0,5640
UC 356x368x129	11,05	0,8150	0,7432	0,6709	0,6026	0,6592
UC 356x368x177	10,80	0,8193	0,7428	0,6646	0,6064	0,6718
UC 356x406x340	9,88	0,8485	0,7866	0,6928	0,6511	0,7204
UC 356x406x744	8,65	0,8761	0,8348	0,7286	0,6931	0,7697
UC 356x406x1086	7,92	0,8960	0,8675	0,8078	0,7279	0,7992

Tabela 148 – Fator de redução para $L_{\theta} = 2,8$ m.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	Comprimento de Flambagem 2,8 m			
			χ_z			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	-	-	-		
HEB 260	15,38	-	-	-		
HEB 280	14,29	0,8343	0,7418	0,6663		
HEB 300	13,33	0,8546	0,7730	0,6997	0,6764	0,7279
HEB 340	12,55	0,8548	0,7883	0,7122	0,6699	0,6354
HEB 450	11,11	0,8476	0,7748	0,6833	0,6037	0,6465
HEB 500	10,67	0,8452	0,7715	0,6734	0,5855	0,6172
HEB 600	10,00	0,8383	0,7629	0,6508	0,5516	0,5625
HEB 700	9,52	0,8308	0,7537	0,6263	0,5231	0,5113
HEB 900	8,89	0,8228	0,7552	0,6308	0,5279	0,5079
HD 260x54,1	15,89	-	-	-		
HD 260x142	14,74	-	-	-		
HD 260x225	13,85	-	-	-		
HD 320x127	12,92	0,8539	0,7716	0,6957	0,6661	0,6941
HD 320x300	11,72	0,8729	0,8135	0,7112	0,7118	0,7795
HD 400x237	10,33	0,9205	0,8819	0,8260	0,7934	0,8339
HD 400x382	9,73	0,9287	0,8976	0,8280	0,8042	0,8470
HD 400x551	9,18	0,9368	0,9105	0,8344	0,8149	0,8604
HD 400x818	8,47	0,9473	0,9197	0,8621	0,8320	0,8789
HD 400x1299	7,54	0,9645	0,9481	0,9147	0,8589	0,8989
UC 254x254x73	15,73	-	-	-		
UC 254x254x132	14,89	-	-	-		
UC 305x305x97	13,05	0,8528	0,7699	0,7003	0,6637	0,6355
UC 305x305x137	12,71	0,8609	0,7772	0,7041	0,6816	0,6972
UC 305x305x198	12,24	0,8682	0,7900	0,7100	0,6992	0,7423
UC 356x368x129	11,05	0,9055	0,8602	0,8145	0,7694	0,8069
UC 356x368x177	10,80	0,9082	0,8599	0,8104	0,7719	0,8150
UC 356x406x340	9,88	0,9271	0,8875	0,8284	0,8017	0,8458
UC 356x406x744	8,65	0,9452	0,9181	0,8510	0,8286	0,8768
UC 356x406x1086	7,92	0,9584	0,9395	0,9009	0,8506	0,8954

Tabela 149 – Fator de redução para $L_{\theta} = 2,0$ m.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	Comprimento de Flambagem 2,0 m			
			χ_z			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	0,8791	0,7836	0,7329		
HEB 260	15,38	0,8986	0,8302	0,7816		
HEB 280	14,29	0,9140	0,8540	0,8049		
HEB 300	13,33	0,9275	0,8741	0,8268	0,8116	0,8450
HEB 340	12,55	0,9277	0,8840	0,8349	0,8073	0,7843
HEB 450	11,11	0,9228	0,8753	0,8161	0,7624	0,7917
HEB 500	10,67	0,9212	0,8731	0,8096	0,7495	0,7718
HEB 600	10,00	0,9167	0,8676	0,7946	0,7247	0,7328
HEB 700	9,52	0,9117	0,8616	0,7781	0,7027	0,6934
HEB 900	8,89	0,9064	0,8626	0,7812	0,7065	0,6906
HD 260x54,1	15,89	0,8908	0,8261	0,7742		
HD 260x142	14,74	0,9049	0,8323	0,7929		
HD 260x225	13,85	0,9145	0,8527	0,8036		
HD 320x127	12,92	0,9270	0,8732	0,8242	0,8048	0,8232
HD 320x300	11,72	0,9398	0,9004	0,8342	0,8347	0,8783
HD 400x237	10,33	0,9725	0,9459	0,9086	0,8873	0,9138
HD 400x382	9,73	0,9782	0,9567	0,9099	0,8943	0,9224
HD 400x551	9,18	0,9840	0,9655	0,9141	0,9013	0,9314
HD 400x818	8,47	0,9914	0,9719	0,9325	0,9125	0,9439
HD 400x1299	7,54	1,0000	0,9920	0,9685	0,9304	0,9575

UC 254x254x73	15,73	0,8892	0,8158	0,7652		
UC 254x254x132	14,89	0,9009	0,8296	0,7820		
UC 305x305x97	13,05	0,9263	0,8721	0,8272	0,8032	0,7843
UC 305x305x137	12,71	0,9317	0,8768	0,8297	0,8150	0,8252
UC 305x305x198	12,24	0,9366	0,8851	0,8335	0,8265	0,8544
UC 356x368x129	11,05	0,9621	0,9312	0,9010	0,8718	0,8961
UC 356x368x177	10,80	0,9639	0,9311	0,8984	0,8734	0,9014
UC 356x406x340	9,88	0,9771	0,9497	0,9102	0,8927	0,9217
UC 356x406x744	8,65	0,9899	0,9709	0,9251	0,9103	0,9424
UC 356x406x1086	7,92	0,9994	0,9858	0,9589	0,9248	0,9551

C.9 - Resistência à Flambagem

Tabela 150 – Resistência à flambagem da coluna para $L_{\theta} = 3,0$ m.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	$N_{fi,Rd,z}$ [N]			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	-	-	-	-	-
HEB 260	15,38	-	-	-	-	-
HEB 280	14,29	-	-	-	-	-
HEB 300	13,33	5996850	3308643	1895724	1098387	316486
HEB 340	12,55	7274874	4400074	2718200	1696367	473775
HEB 450	11,11	8953468	5681924	3410027	2348543	1665720
HEB 500	10,67	9696209	6282590	3708757	2603724	1919510
HEB 600	10,00	10869472	7307880	4258078	3065110	2377618
HEB 700	9,52	12144914	8427968	4831409	3481465	2813391
HEB 900	8,89	15202970	11331822	6848034	5030965	4224836
HD 260x54,1	15,89	-	-	-	-	-
HD 260x142	14,74	-	-	-	-	-
HD 260x225	13,85	-	-	-	-	-
HD 320x127	12,92	6412853	3570042	2000088	1160972	343750
HD 320x300	11,72	12754951	8258566	3486958	2016972	860108
HD 400x237	10,33	12642743	8586058	4727648	3234501	2099811
HD 400x382	9,73	18207596	13678713	6420572	4269863	2802648
HD 400x551	9,18	24373874	20424630	8801199	5695833	3731957
HD 400x818	8,47	34105423	32186179	14322382	8386255	5458460
HD 400x1299	7,54	50005012	48911132	29710318	15555577	9712085
UC 254x254x73	15,73	-	-	-	-	-
UC 254x254x132	14,89	-	-	-	-	-
UC 305x305x97	13,05	5557723	3061727	1901900	1114254	327149
UC 305x305x137	12,71	6996005	3819190	2188851	1273917	428090
UC 305x305x198	12,24	9350422	5250559	2696955	1575152	610008
UC 356x368x129	11,05	8134078	5004787	3446284	2430173	1579089
UC 356x368x177	10,80	10047437	6095744	3910937	2700551	1746413
UC 356x406x340	9,88	16521364	10964280	5724853	3972809	2598125
UC 356x406x744	8,65	31219912	28269349	12348030	7707661	4920738
UC 356x406x1086	7,92	42136206	41069587	23177793	12397467	7409472

Tabela 151 – Resistência à flambagem da coluna para $L_{\theta} = 2,1$ m.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	$N_{fi,Rd,z}$ [N]			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	4291292	2140317	1066620		
HEB 260	15,38	5178202	2854349	1603796		
HEB 280	14,29	5824791	3301871	1944971		
HEB 300	13,33	6593517	3822553	2308424	1361833	377380

HEB 340	12,55	7997573	5032630	3278903	2113930	606997
HEB 450	11,11	9881929	6556304	4205190	3088689	2114987
HEB 500	10,67	10716238	7265669	4609102	3477063	2496257
HEB 600	10,00	12059295	8500608	5387866	4212232	3237410
HEB 700	9,52	13532219	9866465	6236392	4902495	4001595
HEB 900	8,89	17019924	13251847	8806539	7055166	6027102
HD 260x54,1	15,89	3696910	2101699	1375648		
HD 260x142	14,74	7124342	3663833	1928667		
HD 260x225	13,85	10260214	5746615	2630582		
HD 320x127	12,92	7053694	4128441	2442969	1451107	420374
HD 320x300	11,72	13889932	9297013	4209588	2433785	989419
HD 400x237	10,33	13462166	9307774	5282552	3687242	2335506
HD 400x382	9,73	19320001	14716103	7165787	4834606	3094291
HD 400x551	9,18	25775921	21844378	9786506	6406882	4090522
HD 400x818	8,47	35915431	34284368	15684297	9337782	5925962
HD 400x1299	7,54	52315030	51490738	31715859	17063775	10442367
UC 254x254x73	15,73	4529696	2454439	1477100		
UC 254x254x132	14,89	6817131	3677972	1905851		
UC 305x305x97	13,05	6116733	3544691	2314988	1395366	419108
UC 305x305x137	12,71	7666082	4400026	2656462	1573047	522292
UC 305x305x198	12,24	10206935	5998623	3258722	1918808	719846
UC 356x368x129	11,05	8719274	5486319	3877407	2814449	1784858
UC 356x368x177	10,80	10757036	6682993	4411117	3122239	1964222
UC 356x406x340	9,88	17542694	11853272	6387688	4505214	2870348
UC 356x406x744	8,65	32904612	30132238	13603067	8599233	5347863
UC 356x406x1086	7,92	44182333	43384899	24897893	13660823	7979807

Tabela 152 – Resistência à flambagem da coluna para $L_{\theta} = 1,5$ m.

Perfis	Am/V [m^{-1}]	20 °C	Comprimento de Flambagem 1,5 m			
			$N_{fi,Rd,z}$ [N]			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	4631144	2430399	1250873		
HEB 260	15,38	5539970	3156352	1823303		
HEB 280	14,29	6191323	3606556	2181074		
HEB 300	13,33	6970817	4134886	2557273	1521373	414073
HEB 340	12,55	8454642	5419137	3616690	2367259	688982
HEB 450	11,11	10466548	7088029	4685943	3553375	2389971
HEB 500	10,67	11357573	7862869	5154781	4033379	2854993
HEB 600	10,00	12804385	9223413	6078077	4967193	3796917
HEB 700	9,52	14397305	10736308	7105431	5869420	4822454
HEB 900	8,89	18147980	14413245	10014808	8424242	7278031
HD 260x54,1	15,89	3968585	2329162	1571054		
HD 260x142	14,74	7601359	4046870	2177997		
HD 260x225	13,85	10903830	6280813	2952148		
HD 320x127	12,92	7458746	4467665	2710150	1627338	466609
HD 320x300	11,72	14615956	9938686	4644942	2684891	1068176
HD 400x237	10,33	13935500	9772135	5627662	3964447	2482734
HD 400x382	9,73	19875196	15390428	7629758	5182011	3277864
HD 400x551	9,18	26353472	22774847	10402142	6846541	4318079
HD 400x818	8,47	36428797	35511748	16549539	9931522	6226186
HD 400x1299	7,54	52380175	52195206	32975221	18020028	10917458
UC 254x254x73	15,73	4866194	2735591	1696333		
UC 254x254x132	14,89	7286188	4068327	2166283		
UC 305x305x97	13,05	6469826	3837938	2564056	1566252	475697
UC 305x305x137	12,71	8091472	4753515	2938301	1753968	579111
UC 305x305x198	12,24	10753194	6456019	3597180	2126037	786130
UC 356x368x129	11,05	9101580	5791870	4143930	3047741	1911601
UC 356x368x177	10,80	11221411	7055577	4719713	3378439	2098911
UC 356x406x340	9,88	18068957	12427341	6800468	4832359	3041576

UC 356x406x744	8,65	33429078	31247224	14394946	9154510	5621783
UC 356x406x1086	7,92	44438798	44267365	26018327	14457739	8350002

Tabela 153 – Resistência à flambagem da coluna para $L_{\theta} = 4,0$ m.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	$N_{fi,Rd,z}$ [N]			
			R30	R60	R90	R120
			Comprimento de Flambagem 4,0 m			
HEB 240	16,67	-	-	-	-	-
HEB 260	15,38	-	-	-	-	-
HEB 280	14,29	-	-	-	-	-
HEB 300	13,33	5270326	2695750	1443136	819591	247118
HEB 340	12,55	6394952	3637803	2092364	1259038	342185
HEB 450	11,11	7821156	4637655	2559332	1657857	1213316
HEB 500	10,67	8451712	5111523	2760505	1815578	1367953
HEB 600	10,00	9416730	5897246	3112007	2092730	1633983
HEB 700	9,52	10450837	6741406	3465845	2338775	1878188
HEB 900	8,89	12985746	9077316	4929053	3388679	2815316
HD 260x54,1	15,89	-	-	-	-	-
HD 260x142	14,74	-	-	-	-	-
HD 260x225	13,85	-	-	-	-	-
HD 320x127	12,92	5632390	2904820	1517252	858986	260409
HD 320x300	11,72	11382373	6993671	2681559	1552005	705155
HD 400x237	10,33	11683218	7717344	4050245	2687361	1811986
HD 400x382	9,73	16913918	12442453	5510699	3584040	2446933
HD 400x551	9,18	22754693	18748742	7597976	4829444	3296123
HD 400x818	8,47	32034025	29727604	12667958	7224285	4894826
HD 400x1299	7,54	47399465	45961026	27350836	13721465	8842591
UC 254x254x73	15,73	-	-	-	-	-
UC 254x254x132	14,89	-	-	-	-	-
UC 305x305x97	13,05	4876732	2487155	1448528	822814	236300
UC 305x305x137	12,71	6181671	3124297	1672776	954742	325165
UC 305x305x198	12,24	8312429	4348190	2071854	1198561	482747
UC 356x368x129	11,05	7440647	4419442	2921024	1973191	1328950
UC 356x368x177	10,80	9208321	5381840	3302219	2198060	1481008
UC 356x406x340	9,88	15331973	9897754	4915538	3326894	2266031
UC 356x406x744	8,65	29288347	26083757	10818501	6619049	4405209
UC 356x406x1086	7,92	39816721	38401863	21132653	10857647	6728753

Tabela 154 – Resistência à flambagem da coluna para $L_{\theta} = 2,8$ m.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	$N_{fi,Rd,z}$ [N]			
			R30	R60	R90	R120
			Comprimento de Flambagem 2,8 m			
HEB 240	16,67	-	-	-	-	-
HEB 260	15,38	-	-	-	-	-
HEB 280	14,29	5373453	2913541	1643898	-	-
HEB 300	13,33	6133894	3427703	1990024	1158054	330510
HEB 340	12,55	7440856	4546648	2846815	1790676	503344
HEB 450	11,11	9167056	5884510	3590631	2509674	1766039
HEB 500	10,67	9930983	6510329	3912414	2791508	2046155
HEB 600	10,00	11143701	7584033	4510917	3305652	2559416
HEB 700	9,52	12465085	8760714	5141612	3772695	3054541
HEB 900	8,89	15622819	11776031	7281598	5447466	4589536
HD 260x54,1	15,89	-	-	-	-	-
HD 260x142	14,74	-	-	-	-	-
HD 260x225	13,85	-	-	-	-	-
HD 320x127	12,92	6560069	3699401	2101146	1226388	361225

HD 320x300	11,72	13014425	8498801	3652665	2112570	890072
HD 400x237	10,33	12827379	8750634	4855811	3339395	2154177
HD 400x382	9,73	18457597	13914156	6592637	4400626	2869747
HD 400x551	9,18	24688164	20745554	9028455	5860304	3814199
HD 400x818	8,47	34509861	32659077	14634621	8605810	5565157
HD 400x1299	7,54	50518653	49487395	30163048	15901628	9877762
UC 254x254x73	15,73	-	-	-	-	-
UC 254x254x132	14,89	-	-	-	-	-
UC 305x305x97	13,05	5686172	3173601	1996306	1177565	347561
UC 305x305x137	12,71	7149676	3953774	2295852	1341812	449597
UC 305x305x198	12,24	9546481	5423892	2825731	1653663	635374
UC 356x368x129	11,05	8266567	5115239	3546010	2519185	1626723
UC 356x368x177	10,80	10207954	6230452	4026687	2798241	1796792
UC 356x406x340	9,88	16751014	11166668	5877886	4096106	2660772
UC 356x406x744	8,65	31596593	28689418	12636528	7913498	5018278
UC 356x406x1086	7,92	42591926	41588170	23567789	12687906	7539003

Tabela 155 – Resistência à flambagem da coluna para $L_{\theta} = 2,0$ m.

Perfis	Am/V [m ⁻¹]	20 °C	Comprimento de Flambagem 2,0 m			
			$N_{fi,Rd,z}$ [N]			
			R30	R60	R90	R120
HEB 240	16,67	4349447	2190754	1098512		
HEB 260	15,38	5239745	2906628	1641963		
HEB 280	14,29	5886840	3354356	1985979		
HEB 300	13,33	6657116	3876075	2351526	1389524	383714
HEB 340	12,55	8074614	5098675	3337327	2157920	621251
HEB 450	11,11	9980620	6647390	4288589	3169434	2162789
HEB 500	10,67	10824560	7368034	4703836	3573608	2558623
HEB 600	10,00	12185324	8624689	5507833	4342690	3334255
HEB 700	9,52	13678774	10016021	6387494	5068607	4142185
HEB 900	8,89	17211352	13451481	9016627	7290635	6241140
HD 260x54,1	15,89	3743237	2141102	1409621		
HD 260x142	14,74	7205329	3730116	1972007		
HD 260x225	13,85	10369154	5838663	2686440		
HD 320x127	12,92	7121982	4186585	2489266	1481716	428386
HD 320x300	11,72	14011844	9406111	4284897	2477219	1002899
HD 400x237	10,33	13552070	9385603	5341077	3734562	2360432
HD 400x382	9,73	19442482	14828769	7244435	4893784	3125284
HD 400x551	9,18	25930820	21999462	9890724	6481613	4128833
HD 400x818	8,47	36116244	34514492	15829914	9438343	5976312
HD 400x1299	7,54	52380175	51777022	31935342	17224818	10521725
UC 254x254x73	15,73	4587106	2503214	1515201		
UC 254x254x132	14,89	6896868	3745552	1951134		
UC 305x305x97	13,05	6176274	3594970	2358126	1425051	428947
UC 305x305x137	12,71	7737692	4460554	2705255	1604437	532136
UC 305x305x198	12,24	10298751	6076754	3317278	1954703	731263
UC 356x368x129	11,05	8783053	5537763	3922712	2854452	1806436
UC 356x368x177	10,80	10834467	6745726	4463618	3166151	1987115
UC 356x406x340	9,88	17655070	11949380	6457653	4560968	2899264
UC 356x406x744	8,65	33091367	30336418	13736650	8693347	5393821
UC 356x406x1086	7,92	44410280	43640976	25084977	13795268	8041686

Esta página foi deixada intencionalmente em branco.