



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Civil

Ano 2016

**Joel Ferreira
Amaral**

**Dimensionamento de vigas híbridas metálicas em caso
de incêndio**



**Joel Ferreira
Amaral**

**Dimensionamento de vigas híbridas metálicas em caso
de incêndio**

Dissertação de mestrado apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizado sob a orientação científica do Professor Doutor Nuno Filipe Ferreira Soares Borges Lopes, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil e coorientação científica do Professor Doutor Paulo Jorge de Melo Matias Faria de Vila Real, Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

o júri

presidente

Prof^ª. Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa
professora associada no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Paulo Alexandre Gonçalves Piloto
professor coordenador no Instituto Politécnico de Bragança (arguente)

Prof. Doutor Nuno Filipe Ferreira Soares Borges Lopes
professor auxiliar no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro (orientador)

agradecimentos

Terminando mais uma fase da minha vida aqui deixo algumas palavras de agradecimento a todos os que me ajudaram e apoiaram a concretizar este objetivo.

Quero agradecer ao meu orientador Prof. Nuno Lopes por todo o tempo disponibilizado para me auxiliar, dedicação, compreensão e paciência prestada durante todo este percurso, onde foi uma mais valia à conclusão deste trabalho.

Agradeço também ao meu coorientador Prof. Paulo Vila Real por toda a ajuda e apoio prestado, e sobretudo pelo conhecimento transmitido.

Quero também agradecer a todos os meus colegas do Departamento de Engenharia Civil, os meus companheiros de residência e todos aqueles que tive o prazer de conhecer, por todos estes cinco anos maravilhosos nesta cidade e por partilharem este percurso académico comigo. Ficarão sempre guardados todos estes momentos como uma das fases mais importante da minha vida.

Gostaria também de agradecer aos meus amigos de Viseu que me apoiaram à distância e pela profunda amizade que sempre fizeram questão de manter, um sincero obrigado por todo o apoio.

Por fim, o mais especial agradecimento, aos meus pais, e sobretudo à minha mãe por todo o apoio incondicional, motivação, conselhos, advertências e sobretudo por sempre acreditar e ter lutado com todas as forças para tornar tudo isto possível, a ela dedico este documento.

Palavras-chave

Aço Carbono, Aço inoxidável, Secções Híbridas, Vigas, Incêndio, Eurocódigo 3, Encurvadura lateral.

resumo

A presente dissertação tem como propósito aumentar o conhecimento sobre vigas híbridas metálicas compostas por aço carbono e aço inoxidável, analisar o comportamento à flexão em situação de incêndio e analisar a possível suscetibilidade à ocorrência de fenómenos de instabilidade, em particular a encurvadura lateral.

São referidas as vantagens de cada material em termos de comportamento ao fogo e apresentadas propostas de constituições de secções possíveis de modo a explorar mecanicamente a potencialidade dos materiais a atuarem em conjunto.

As metodologias de cálculo são preconizadas pelas partes 1-1, 1-2 e 1-4 do Eurocódigo 3 e comparadas com valores obtidos por simulação numérica através do programa de elementos finitos SAFIR.

Paralelamente é analisada a resistência à encurvadura lateral obtida e comparada pelos mesmos métodos de cálculo, analítico (Eurocódigo 3) e simulação numérica (SAFIR).

Keywords

Carbon steel, Stainless steel, Híbrid cross section, Beams, Fire, Lateral buckling, Eurocode 3.

abstract

This thesis aims to increase knowledge of híbrid metallic beams, composed of stainless steel and carbon steel, analyze the flexural behavior in fire situation and analyze the possible susceptibility to the occurrence of instability phenomena, in particular the lateral buckling.

The advantages of each material are referred in terms of fire behavior and proposals of constitutions sections so as to mechanically exploit the potential of the materials to act together.

The calculation methodologies are recommended for parts 1-1, 1-2 and 1-4 of Eurocode 3 and compared with values obtained by numerical simulation using the finite element program SAFIR.

The lateral torsional buckling resistance is determined and compared by the surface calculation method and by numerical simulation (SAFIR).

Índice

ÍNDICE DE FIGURAS	XV
ÍNDICE DE TABELAS.....	XXIII
NOMENCLATURA	XXV
LISTA DE ACRÓNIMOS.....	XXVII
1. INTRODUÇÃO.....	3
1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	3
1.2. APLICAÇÕES E VANTAGENS	5
1.3. OBJETIVOS	8
1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	8
2. MATERIAIS	13
2.1. AÇO INOXIDÁVEL.....	13
2.1.1. <i>Considerações gerais</i>	13
2.1.2. <i>Comportamento mecânico e propriedades térmicas</i>	14
2.1.3. <i>Aplicações Estruturais</i>	17
2.2. AÇO CARBONO	19
2.2.1. <i>Considerações gerais</i>	19
2.2.2. <i>Comportamento mecânico e propriedades térmicas</i>	20
3. CÁLCULO ANALÍTICO DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO	23
3.1. CASO DE ESTUDO	23
3.2. METODOLOGIA DE CÁLCULO DA RESISTÊNCIA DA SECÇÃO	25
3.2.1. <i>Alma</i>	28
3.2.2. <i>Banzo</i>	29
3.2.3. <i>Formulação de cálculo para a contabilização da encurvadura lateral</i>	31
3.3. MOMENTOS RESISTENTES EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA	39
4. DEFINIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO	47
4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	47
4.1.1. <i>Descrição geral do programa SAFIR</i>	47
4.2. RESISTÊNCIA DA SECÇÃO EM AÇO CARBONO	50
4.2.1. <i>Fogo 4 lados</i>	50
4.2.2. <i>Fogo 1 lado</i>	51
4.2.3. <i>Comparação com Estado Transitório “Trasient State”</i>	52
4.3. RESISTÊNCIA DE VIGAS COM ENCURVADURA LATERAL	56

5.	RESISTÊNCIA À FLEXÃO DE SECÇÕES MONOSSIMÉTRICAS HÍBRIDAS	63
5.1.	CONSIDERAÇÕES GERAIS	63
5.2.	RESISTÊNCIA DA SECÇÃO	63
5.2.1.	<i>Fogo 4 lados</i>	64
5.2.2.	<i>Fogo 1 lado</i>	67
5.2.3.	<i>Comparação com estado transitório</i>	71
5.3.	RESISTÊNCIA DE VIGAS HÍBRIDAS COM ENCURVADURA LATERAL	78
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
6.1.	CONCLUSÕES FINAIS	85
6.2.	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	86
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91
	ANEXOS: RESTANTES RESULTADOS OBTIDOS.....	97

Índice de figuras

Figura 1.1- Viga híbrida tipo.	3
Figura 1.2 - Comportamento de secções à flexão (Vila Real P. , 2003).	4
Figura 1.3 – Detalhe de vigamento com estrutura de vigas IFB (embebida no vigamento).	6
Figura 1.4 – Vista geral da entrada de um dos módulos do Edifício <i>Centre For The Unknown</i> da Fundação <i>Champalimaud</i> em Lisboa.	7
Figura 1.5 – Pormenor construtivo de vigamento da solução construtiva do Edifício <i>Centre For The Unknown</i> da Fundação <i>Champalimaud</i> em Lisboa.	7
Figura 2.1 – Tipos de aço inoxidável (ESDEP, 2000).	14
Figura 2.2- Comparação do fator de retenção de resistência $k_{y,\theta}$ do aço inoxidável e aço carbono (CEN, 2005b)	15
Figura 2.3- Comparação do fator de retenção de rigidez $k_{E,\theta}$ do aço inoxidável e aço carbono (Renaud, 2007)	16
Figura 2.4 - Leis constitutivas do aço carbono e do aço inoxidável 1.4301 à temperatura ambiente e a 600°C (Lopes, Vila Real, Piloto, Mesquita, & Simões da Silva).	17
Figura 2.5- Café em Berlim, Alemanha, estrutura em aço inoxidável (EuroInox, 2008)	18
Figura 2.6- Pavilhão em Zurique, Suíça (EuroInox, 2008).	18
Figura 2.7- Estação ferroviária em Gent, Bélgica (Baddoo, 2009)	19
Figura 3.1- Viga híbrida constituída por ½ HEB 400 em aço carbono e banzo inferior de aço inoxidável de dimensões 350x20 (mm).	23
Figura 3.2- Esquema do modelo em análise.	24
Figura 3.3- Ilustração das resultantes, pontos de aplicação e suas distâncias ao eixo neutro plástico da secção.	28
Figura 3.4- Ilustração das forças atuantes e respetivos braços e pontos de aplicação em relação ao eixo neutro para o caso 1.	28
Figura 3.5- Ilustração das forças atuantes e respetivos braços e pontos de aplicação em relação ao eixo neutro para o caso 2.	30
Figura 3.6- Representação gráfica do movimento da secção de uma viga (Vila Real & Piloto, 2000).	31
Figura 3.7- Encurvadura lateral de vigas (Vila Real P., 2003).	32

Figura 3.8- Exemplo de modelo numérico de viga impedida de se deslocar lateralmente.	33
Figura 3.9- Modelo numérico usado para o cálculo, viga simplesmente apoiada.	33
Figura 3.10- Condições de apoio e coluna-viga do tipo “forquilha” (Mendonça, 2006).	34
Figura 3.11- Viga simplesmente apoiada sujeita à flexão simples (Vila Real P., 2003)	35
Figura 3.12- Viga simplesmente apoiada sujeita a flexão simples a altas temperaturas (Vila Real P. , 2003).....	37
Figura 3.13- Ilustração dos 4 casos em análise.	39
Figura 3.14- Variação dos momentos resistentes M_{rd} em função do aumento da temperatura dos vários casos em análise para o banzo inferior em aço inoxidável austenítico 1.4301 e aço carbono S235 da secção S1	40
Figura 3.15 – Variação dos momentos resistentes M_{rd} em função do aumento da temperatura dos vários casos em análise para o banzo inferior em aço inoxidável ferrítico 1.4003 e aço carbono S235 da secção S1.....	42
Figura 3.16- Variação dos momentos resistentes M_{rd} em função do aumento da temperatura dos vários casos em análise para o banzo inferior em aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462 e aço carbono S235 da secção S1	43
Figura 4.1- Elemento finito de viga 3D (Lopes, 2009).....	49
Figura 4.2- Tensões residuais em I – perfis soldados (C – compressão, T – tração) (Gardner, 2004).....	50
Figura 4.3- Resultados numéricos para a secção S1 em aço carbono S235.....	51
Figura 4.4- Resultados numéricos para a secção S1 em aço carbono S235.....	52
Figura 4.5- Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S1 em aço carbono S235.....	54
Figura 4.6- Resultados Estado Transitório vs Carregamento com temperatura constante para a S1 em aço carbono S235.....	55
Figura 4.7- Resultados encurvadura lateral para 400°C, numérico e analítico para secção S2 aço carbono S235.....	57
Figura 4.8- Perfis transversais, a) tubular 260x260, b) IPE 240.	58
Figura 4.9- Valores numéricos de coeficiente de redução χ em função do vão do elemento viga.....	58

Figura 4.10- Gráficos de deslocamento vertical do nó a meio vão, gráfico a) S2, gráfico b) tubular 260x260, gráfico c) IPE 240.....	59
Figura 5.1- Resultados numéricos para secção S1 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável austenítico 1.4301.....	65
Figura 5.2- Resultados numéricos para secção S1 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável ferrítico 1.4003.....	66
Figura 5.3- Resultados numéricos para secção S1 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462.....	67
Figura 5.4- Resultados numéricos para secção S1 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável austenítico 1.4301.....	68
Figura 5.5- Resultados numéricos para secção S1 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável ferrítico 1.4003.....	69
Figura 5.6- Resultados numéricos para secção S1 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462.....	70
Figura 5.7- Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante, para secção S1 com banzo em aço inoxidável austenítico 1.4301.....	72
Figura 5.8- Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante, para secção S1 com banzo em aço inoxidável ferrítico 1.4003.....	73
Figura 5.9- Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante, para secção S1 com banzo em aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462.....	74
Figura 5.10- Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante, para secção S1 com banzo em aço inoxidável austenítico 1.4301.....	76
Figura 5.11- Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante, para secção S1 com banzo em aço inoxidável ferrítico 1.4003.....	77
Figura 5.12- Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante, para secção S1 com banzo em aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462.....	78
Figura 5.13- Perfil IPE 240 híbrido.....	79
Figura 5.14- Resultados encurvadura lateral para 400 °C, numérico e analítico para secção IPE 240 híbrida vs IPE 240 aço carbono S235.....	80
Figura 5.15- Resultados encurvadura lateral para 500 °C, numérico e analítico para secção IPE 240 híbrida vs IPE 240 aço carbono S235.....	80

Figura 5.16- Resultados encurvadura lateral para 600 °C, numérico e analítico para secção IPE 240 híbrida vs IPE 240 aço carbono S235.....	81
Figura 5.17- Resultados encurvadura lateral para 700 °C, numérico e analítico para secção IPE 240 híbrida vs IPE 240 aço carbono S235.....	81
Figura A. 1- Variação dos momentos resistentes M_{rd} em função do aumento da temperatura dos vários casos em análise para o banzo inferior em aço inoxidável austenítico 1.4301 e aço carbono S235 da secção S2.	97
Figura A. 2- Variação dos momentos resistentes M_{rd} em função do aumento da temperatura dos vários casos em análise para o banzo inferior em aço inoxidável austenítico 1.4301 e aço carbono S235 da secção S3.	98
Figura A. 3. Variação dos momentos resistentes M_{rd} em função do aumento da temperatura dos vários casos em análise para o banzo inferior em aço inoxidável austenítico 1.4301 e aço carbono S235 da secção S4.	99
Figura A. 4- Variação dos momentos resistentes M_{rd} em função do aumento da temperatura dos vários casos em análise para o banzo inferior em aço inoxidável ferrítico 1.4003 e aço carbono S235 da secção S2.....	100
Figura A. 5- Variação dos momentos resistentes M_{rd} em função do aumento da temperatura dos vários casos em análise para o banzo inferior em aço inoxidável ferrítico 1.4003 e aço carbono S235 da secção S3.....	101
Figura A. 6- Variação dos momentos resistentes M_{rd} em função do aumento da temperatura dos vários casos em análise para o banzo inferior em aço inoxidável ferrítico 1.4003 e aço carbono S235 da secção S4.....	102
Figura A. 7- Variação dos momentos resistentes M_{rd} em função do aumento da temperatura dos vários casos em análise para o banzo inferior em aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462 e aço carbono S235 da secção S2.	103
Figura A. 8- Variação dos momentos resistentes M_{rd} em função do aumento da temperatura dos vários casos em análise para o banzo inferior em aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462 e aço carbono S235 da secção S3.	104
Figura A. 9- Variação dos momentos resistentes M_{rd} em função do aumento da temperatura dos vários casos em análise para o banzo inferior em aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462 e aço carbono S235 da secção S4.	105

Figura A. 10- Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S2 em aço carbono S235.....	106
Figura A. 11- Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S3 em aço carbono S235.....	107
Figura A. 12- Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S4 em aço carbono S235.....	108
Figura A. 13- Resultados numéricos para secção S2 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável austenítico 1.4301.....	109
Figura A. 14- Resultados numéricos para secção S3 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável austenítico 1.4301.....	110
Figura A. 15- Resultados numéricos para secção S4 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável austenítico 1.4301.....	110
Figura A. 16. Resultados numéricos para secção S2 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável ferrítico 1.4003.	111
Figura A. 17. Resultados numéricos para secção S3 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável ferrítico 1.4003.	111
Figura A. 18. Resultados numéricos para secção S4 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável ferrítico 1.4003.	112
Figura A. 19. Resultados numéricos para secção S2 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462.	112
Figura A. 20. Resultados numéricos para secção S3 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462.	113
Figura A. 21. Resultados numéricos para secção S4 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462.	113
Figura A. 22. Resultados numéricos para secção S2 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável austenítico 1.4301.....	114
Figura A. 23. Resultados numéricos para secção S3 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável austenítico 1.4301.....	114
Figura A. 24. Resultados numéricos para secção S4 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável austenítico 1.4301.....	115
Figura A. 25. Resultados numéricos para secção S2 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável ferrítico 1.4003.	115

Figura A. 26. Resultados numéricos para secção S3 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável ferrítico 1.4003.	116
Figura A. 27. Resultados numéricos para secção S4 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável ferrítico 1.4003.	116
Figura A. 28. Resultados numéricos para secção S2 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462.	117
Figura A. 29. Resultados numéricos para secção S3 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462.	117
Figura A. 30. Resultados numéricos para secção S4 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462.	118
Figura A. 31. Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S2 com banzo em aço inoxidável austenítico 1.4301.	119
Figura A. 32. Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S3 com banzo em aço inoxidável austenítico 1.4301.	119
Figura A. 33. Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S4 com banzo em aço inoxidável austenítico 1.4301.	120
Figura A. 34. Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S2 com banzo em aço inoxidável ferrítico 1.4003.	120
Figura A. 35. Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S3 com banzo em aço inoxidável ferrítico 1.4003.	121
Figura A. 36. Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S4 com banzo em aço inoxidável ferrítico 1.4003.	121
Figura A. 37. Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S2 com banzo em aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462.	122
Figura A. 38. Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S3 com banzo em aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462.	122
Figura A. 39- Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S4 com banzo em aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462.	123
Figura A. 40- Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S2 com banzo em aço inoxidável austenítico 1.4301.	123
Figura A. 41- Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S3 com banzo em aço inoxidável austenítico 1.4301.	124

Figura A. 42. Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S4 com banzo em aço inoxidável austenítico 1.4301.	124
Figura A. 43. Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S2 com banzo em aço inoxidável ferrítico 1.4003.	125
Figura A. 44. Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S3 com banzo em aço inoxidável ferrítico 1.4003.	125
Figura A. 45. Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S4 com banzo em aço inoxidável ferrítico 1.4003.	126
Figura A. 46. Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S2 com banzo em aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462.	126
Figura A. 47. Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S3 com banzo em aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462.	127
Figura A. 48. Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S4 com banzo em aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462.	127

Índice de tabelas

Tabela 2.1– Comparação das propriedades dos aços S235 e 1.4301 a 20°C (CEN, 2005a) (CEN, 2006a).....	14
Tabela 3.1- Valores nominais da tensão de cedência f_y e da tensão última à tração f_u (CEN, 2005a), (CEN, 2006a).	24
Tabela 3.2- Valores em milímetros das dimensões para as várias secções do modelo em análise.....	24
Tabela 3.3- Relações máximas de largura e espessura para componentes comprimidos em aço inoxidável (CEN, 2006a).	25
Tabela 3.4- Fatores para a determinação da rigidez do aço inoxidável austenítico da Classe 1.4301 a temperaturas elevadas (CEN, 2005b).	27
Tabela 3.5- Valores recomendados dos fatores de imperfeição para as curvas de encurvadura lateral (CEN, 2005a)	36
Tabela 3.6- Curvas de encurvadura lateral recomendadas para secções transversais (CEN, 2005a).....	36
Tabela 3.7- Fatores para a determinação da extensão e da rigidez do aço carbono a temperaturas elevadas (CEN, 2005b)	38
Tabela 3.8- Valores do momento resistente M_{rd} para várias temperaturas do aço e os vários casos em análise de S1 híbrida em aço inoxidável austenítico 1.4301 e aço carbono S235	40
Tabela 3.9- Valores do momento resistente M_{rd} para várias temperaturas do aço e os vários casos em análise de S1 híbrida em aço inoxidável ferrítico 1.4003 e aço carbono S235	41
Tabela 3.10- Valores do momento resistente M_{rd} para várias temperaturas do aço e os vários casos em análise de S1 híbrida em aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462 e aço carbono S235	43
Tabela 4.1- Valores do momento resistente M_{rd} em função da temperatura para várias secções calculados a partir do SAFIR.....	50
Tabela 4.2- Valores do momento resistente M_{rd} em função da temperatura para várias secções calculadas a partir do SAFIR	52
Tabela 4.3- Valores de temperatura das fibras da secção S1 e momento resistente M_{rd} correspondente.....	53

Tabela 4.4- Valores de temperatura das fibras da secção S1 e momento resistente Mrd correspondente.....	55
Tabela 4.5- Valores referentes à encurvadura lateral para a secção S2 em aço carbono S235.	56
Tabela 5.1- Valores do momento resistente Mrd para a S1 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável austenítico 1.4301.	64
Tabela 5.2- Valores do momento resistente Mrd para a S1 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável ferrítico 1.4003.	65
Tabela 5.3- Valores do momento resistente Mrd para a S1 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462.	66
Tabela 5.4- Valores do momento resistente Mrd para a S1 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável austenítico 1.4301.	68
Tabela 5.5- Valores do momento resistente Mrd para a S1 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável ferrítico 1.4003.	69
Tabela 5.6- Valores do momento resistente Mrd para a S1 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462.	70
Tabela 5.7- Valores de temperatura das fibras da secção S1 e momento resistente Mrd correspondente para secção com banzo em aço inoxidável austenítico 1.4301.	72
Tabela 5.8- Valores de temperatura das fibras da secção S1 e momento resistente Mrd correspondente para secção com banzo em aço inoxidável ferrítico 1.4003.	73
Tabela 5.9- Valores de temperatura das fibras da secção S1 e momento resistente Mrd correspondente para secção com banzo em aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462.	74
Tabela 5.10- Valores de temperatura das fibras da secção S1 e momento resistente Mrd correspondente para secção com banzo em aço inoxidável austenítico 1.4301.	75
Tabela 5.11- Valores de temperatura das fibras da secção S1 e momento resistente Mrd correspondente para secção com banzo em aço inoxidável ferrítico 1.4003.	76
Tabela 5.12- Valores de temperatura das fibras da secção S1 e momento resistente Mrd correspondente para secção com banzo em aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462.	77
Tabela 5.13- Valores referentes à encurvadura lateral para a secção IPE 240 híbrido, para 400 °C de temperatura.....	79

Nomenclatura

Letras maiúsculas latinas

C_1	Coefficiente que depende do tipo de carregamento
E	Módulo de elasticidade do aço
E_a	Módulo de elasticidade do aço à temperatura normal
$E_{a,\theta}$	Inclinação da reta que representa o domínio elástico para o aço a temperaturas elevadas θ_a
G	Módulo de distorção
I	Momento de inércia da secção transversal em relação ao eixo neutro
I_t	Constante de torção uniforme
I_w	Constante de empenamento
I_y	Momento de inércia da secção transversal em relação ao eixo y
I_z	Momento de inércia da secção transversal em relação ao eixo z; momento de inércia de uma nervura de comprimento w
L	Comprimento de um elemento
$M_{b,fi,Rd}$	Valor de cálculo do momento fletor resistente à encurvadura lateral em situação de incêndio
$M_{b,Rd}$	Valor de cálculo do momento fletor resistente
M_{cr}	Momento crítico elástico de encurvadura lateral
M_{Ed}	Valor de cálculo do momento fletor atuante
M_{Rd}	Valor de cálculo do momento fletor resistente plástico
M_{pl}	Valor de cálculo do momento fletor plástico
$W_{pl,y}$	Módulo de flexão plástico segundo o eixo y-y

Letras minúsculas latinas

b	Largura da secção transversal
$f_{0,2p,\theta}$	Tensão limite convencional de proporcionalidade, referida à tensão de cedência a 20°C
$f_{y,\theta}$	Tensão de cedência efetiva do aço a temperaturas elevadas θ_a
f_y	Tensão de cedência a 20 °C
f_u	Tensão última do aço
h	Altura da secção transversal
$k_{0,2p,\theta}$	Fator de redução para o valor de cálculo da tensão de cedência do aço para secções da Classe 4
$k_{0,2p,\theta,com}$	Fator de redução da tensão de cedência do aço à temperatura máxima no banzo comprimido $\theta_{a,com}$ atingida no instante t

$k_{E,\theta}$	Fator de redução para a inclinação da reta que representa o domínio elástico à temperatura do aço θ_a Atingida no instante t
$k_{E,\theta,com}$	Fator de redução para a inclinação da reta que representa o domínio elástico à temperatura máxima do aço no banzo comprimido
$k_{y,\theta}$	Fator de redução da tensão de cedência do aço à temperatura atingida no instante t
$k_{y,\theta,com}$	Fator de redução para a tensão de cedência do aço à temperatura máxima no banzo comprimido
t_f	Espessura do banzo da secção transversal
t_w	Espessura da alma da secção transversal

Caracteres do alfabeto grego

α	Fator de imperfeição
α_{LT}	Fator de imperfeição relativo a encurvadura lateral
γ_{M0}	Fator parcial de segurança da resistência das secções transversais ($\gamma_{M0} = 1,0$)
γ_{M1}	Fator parcial de segurança da resistência do elemento a fenómenos de instabilidade ($\gamma_{M1} = 1,0$)
$\gamma_{M,fi}$	Fator parcial de segurança para o material em situação de incêndio ($\gamma_{M,fi} = 1,0$)
ε	Extensão
ε_θ	Extensão a altas temperaturas
θ	Temperatura
θ_a	Temperatura do aço (°C)
$\bar{\lambda}$	Coefficiente de esbelteza normalizada para a encurvadura por flexão
$\bar{\lambda}_\theta$	Coefficiente de esbelteza normalizada para a encurvadura por flexão em situação de incêndio
$\bar{\lambda}_{LT}$	Coefficiente de esbelteza normalizada relativo a encurvadura lateral
$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	Coefficiente de esbelteza normalizada relativo a encurvadura lateral em situação de incêndio
Φ	Parâmetro para determinar o coeficiente de redução χ
Φ_θ	Parâmetro para determinar o coeficiente de redução χ_{fi}
Φ_{LT}	Parâmetro para determinar o coeficiente de redução χ_{LT}
$\Phi_{LT,\theta,com}$	Parâmetro para determinar o coeficiente de redução $\chi_{LT,fi}$
χ	Fator de redução para a encurvadura por flexão
χ_{fi}	Fator de redução para a encurvadura por flexão em situação de incêndio
χ_{LT}	Fator de redução para a encurvadura lateral
$\chi_{LT,fi}$	Fator de redução para a encurvadura lateral em situação de incêndio

Lista de Acrónimos

CEN	Comité Europeu de Normalização
EC3	Eurocódigo 3
EN	Norma Europeia
EN 1993-1-1 (ou EC3-1-1)	Parte 1-1 do Eurocódigo 3
EN 1993-1-2 (ou EC3-1-2)	Parte 1-2 do Eurocódigo 3
EN 1993-1-4 (ou EC3-1-4)	Parte 1-5 do Eurocódigo 3
MEF	Método dos Elementos Finitos

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

1 Introdução

- 1.1 Considerações gerais
- 1.2 Aplicações e vantagens
- 1.3 Objetivos
- 1.4 Estrutura da Dissertação

1. Introdução

1.1. Considerações gerais

Nos últimos anos, os custos associados à manutenção e reabilitação de estruturas de edifícios e obras de arte com materiais tradicionais, nomeadamente com aço e betão armado, têm vindo a aumentar consideravelmente. A durabilidade limitada dos materiais tradicionais (muito em particular a corrosão do aço) tem provocado alterações nas práticas de dimensionamento e na própria regulamentação para ter em consideração esta problemática. Por outro lado, aquele problema também tem tido um efeito impulsionador no desenvolvimento de novos materiais estruturais, mais leves, menos sujeitos à degradação causada pelos agentes agressivos e com menores exigências de manutenção (Keller, 2003).

Para colmatar grande parte destes problemas, sobretudo o da corrosão, este presente documento destina-se ao estudo da aplicação do material aço inoxidável de modo a explorar as suas boas características de resistência ao fogo relativamente ao aço carbono, em soluções construtivas com soluções mistas de aço e betão, onde o aço carbono está presente embebido no betão, como ilustrado na figura 1.1, e no presente ainda não apresentam muito conhecimento do seu comportamento.

O bom comportamento ao fogo do aço inoxidável pode ser solução alternativa ao aço carbono onde assim podemos ter uma redução do tamanho das secções transversais dos perfis de aço ou a redução também da proporção de barras de reforço adicionais necessárias para atingir a resistência ao fogo exigida pela utilização de aço carbono (Renaud, 2007).

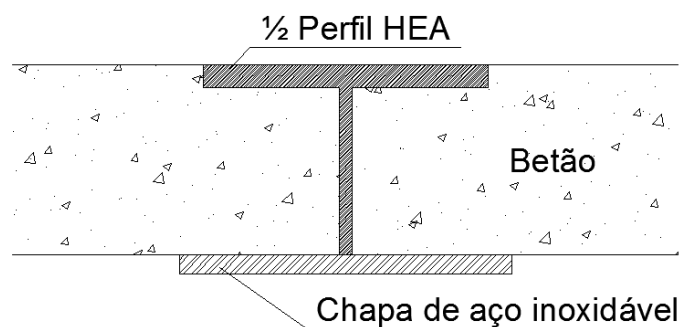


Figura 1.1- Viga híbrida tipo.

Em relação à classificação das secções transversais dos elementos estruturais, estas traduzem a forma como a resistência e a capacidade de rotação de uma secção são influenciados por fenómenos de encurvadura local (Simões, 2005). Numa secção “não esbelta” a zona comprimida pode plastificar completamente enquanto numa secção esbelta poderá não plastificar devido a ocorrência prévia de fenómenos de encurvadura local.

Para esta dissertação irão apenas analisadas secções de Classe 1, sendo estas as secções onde a encurvadura local não será um modo potencial de falha antes de se atingir a tensão de cedência numa ou mais partes da secção transversal de modo a que se apresenta a resistência máxima do elemento em estudo. Na figura 1.2 é ilustrado o comportamento à flexão de todas as classes de secções existentes no Eurocódigo 3.

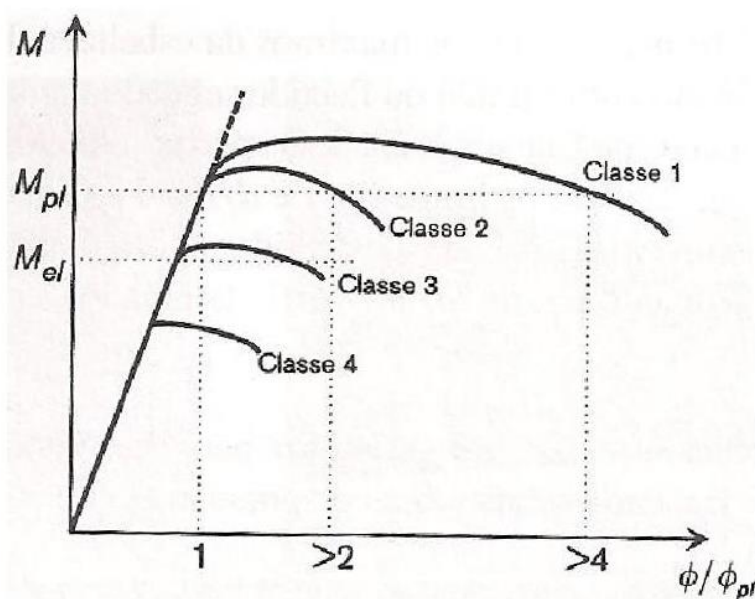


Figura 1.2 - Comportamento de secções à flexão (Vila Real P. , 2003).

O aço apresenta fraco desempenho a altas temperaturas (Vila Real P. , 2003). Possui uma condutividade térmica elevada que origina que a temperatura se propague mais rapidamente e, paralelamente as propriedades mecânicas do material se degradem com este aumento da temperatura.

Quanto à análise numérica e experimental para a encurvadura lateral de vigas I (de aço carbono) a altas temperaturas, estudos desenvolvidos por Piloto (Piloto P. , 2000)

concluíram que a curva de cálculo à encurvadura lateral, a temperaturas elevadas que melhor se ajusta aos resultados obtidos é a correspondente à proposta que se pretendia validar no estudo (esta possuía resultados mais seguros que a do Eurocódigo). Esta proposta teve como base documentos de aplicação nacionais do Eurocódigo 3 Belga e Francês. Na análise numérica ficou provado que a curva de cálculo à encurvadura lateral do Eurocódigo 3 não é segura a temperaturas elevadas.

1.2. Aplicações e vantagens

O modelo em estudo é também designado por “vigas integradas” ou do inglês *Integrated Floor Beam* (IFB), que são considerados elementos estruturais soldados por meio de perfis laminados e placas de aço de dimensões escolhidas pelo projetista.

Nos últimos tempos cada vez mais, arquitetos e proprietários dirigem as suas preferências para uma maior flexibilidade na construção de edifícios de vários andares, o que traz consigo, entre outros, um notável aumento do uso deste tipo de vigamentos.

Face às estruturas tradicionais, a utilização destes vigamentos, permitem que, em caso de existir uma determinada limitação da altura do edifício, o número de andares construídos para uma mesma altura seja maior.

Devido ao incremento na espessura das lajes, os vigamentos com estruturas embebidas convencionais são elementos mais pesados, portanto, exige maior número de fundações na hora de edificar sobre solos em condições deficientes.

O principal objetivo no desenvolvimento de um sistema de viga com estrutura embebida baseado em uma armação de aço, é de tentar maximizar as vantagens proporcionadas por este tipo de viga, evitando ao mesmo tempo os inconvenientes decorrentes de uma construção convencional, sem esquecer, logicamente, a rentabilidade do ponto de vista económico.

Na figura 1.3. apresenta-se o pormenor construtivo deste tipo de viga.

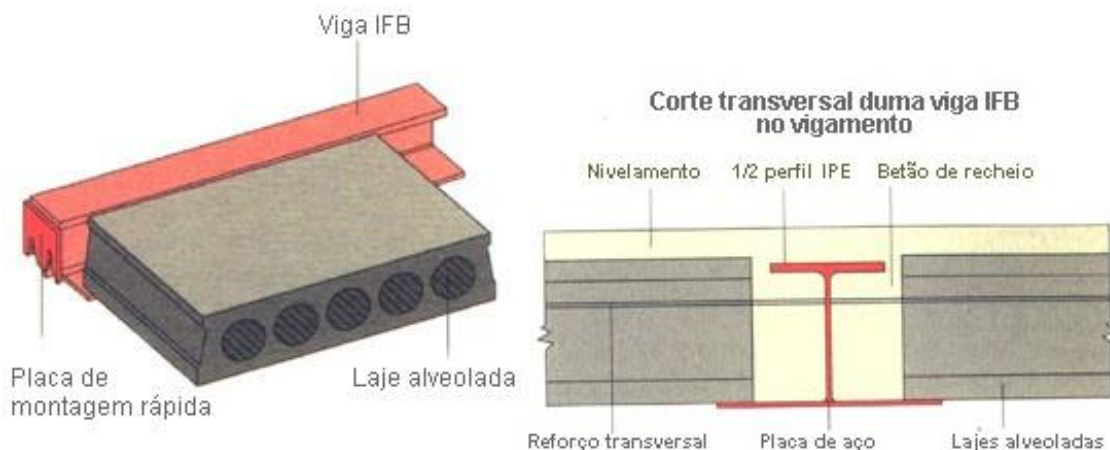


Figura 1.3 – Detalhe de vigamento com estrutura de vigas IFB (embebida no vigamento).

Apresentam-se de seguida vantagens apresentadas pelo sistema de vigamento com vigas IFB:

- Menor custo de projeto.
- Elementos de pré-engenharia e pré-fabricados feitos de aço e betão pré-esforçado.
- Eliminação de vigas soltas/ausência de obstruções na passagem de linhas de fornecimento.
- Construção mais leve (até 50% de redução no peso) e, portanto, menor investimento nas fundações.
- Menores períodos de edificação.
- Ausência de atrasos pelas condições meteorológicas.
- Montagem simples.
- Rentabilidade demonstrada.

(ArcelorMittal).

Em seguida exibem-se imagens da construção do Edifício *Centre For The Unknown* da Fundação Champalimaud em Lisboa. Na figura 1.4 apresenta-se a vista geral da entrada de um dos módulos da construção e na figura 1.5 a preparação para a betonagem da solução construtiva.



Figura 1.4 – Vista geral da entrada de um dos módulos do Edifício *Centre For The Unknown* da Fundação *Champalimaud* em Lisboa.



Figura 1.5 – Pormenor construtivo de vigamento da solução construtiva do Edifício *Centre For The Unknown* da Fundação *Champalimaud* em Lisboa.

Para esta dissertação interessa também o estudo do processo de soldadura no aço inoxidável, de modo a perceber se o processo construtivo se pode aplicar de forma acessível e altamente praticável no mercado.

De acordo com (Portal Met@lica, 2010) existem vários processos de soldadura de aços inoxidáveis o que torna viável a solução apresentada.

1.3. Objetivos

O aço inoxidável é um material associado a soluções leves com caracter estético importante. e apesar do seu preço inicial, possui várias características desejáveis num material estrutural, como a resistência à corrosão e a maior resistência ao fogo em relação ao aço convencional (aço carbono), embora no projeto de vigas soldadas, pode ser apropriado utilizar diferentes tipos de aço para as almas e banzos constituintes da secção transversal de um elemento. No entanto, não é ainda completamente conhecido o comportamento destes elementos a temperaturas elevadas. Assim, esta dissertação tem como objetivo estudar numericamente o comportamento estrutural de vigas híbridas metálicas, considerando aço carbono (convencional) e aço inoxidável, com o fim de analisar possíveis formulações de cálculo simplificado.

Com o auxílio do programa SAFIR (Franssen, 2011), será realizado um estudo numérico do comportamento ao fogo de vigas híbridas (aço carbono e aço inoxidável) de modo a fazer comparações com a metodologia de dimensionamento prevista pelo Eurocódigo 3, assim como verificar a resistência à encurvadura lateral de elementos viga com as secções nos materiais descritos em travamentos laterais.

1.4. Estrutura da Dissertação

A estrutura da dissertação divide-se em 6 capítulos:

No Capítulo 2 são apresentados os materiais, a sua produção, aplicações, comportamento mecânico e as suas propriedades térmicas.

O capítulo 3 é destinado ao cálculo analítico segundo o Eurocódigo 3, onde se apresenta cálculos relativos à resistência da secção até ao cálculo do momento resistente à encurvadura lateral,

O Capítulo 4 é dedicado à modelação numérica para as secções em aço carbono com vista à utilização dos mesmos modelos em secções híbridas, onde se faz uma breve descrição

dos programas utilizados, das secções definidas para os ensaios assim como a definição do modelo numérico utilizado.

O Capítulo 5 análogo ao Capítulo 4, com alteração dos materiais associados à secção transversal em estudo com especial foco na utilização não só de várias secções, mas também numa análise de vários tipos de aço inoxidável.

Por fim o Capítulo 6 com as respetivas conclusões tiradas do estudo deste presente documento.

CAPÍTULO 2. MATERIAIS

2 Materiais

2.1 Aço inoxidável

2.1.1 Considerações gerais

2.1.2 Comportamento mecânico e propriedades térmicas

2.1.3 Aplicações Estruturais

2.2 Aço carbono

2.2.1 Considerações gerais

2.2.2 Comportamento mecânico e propriedades térmicas

2.2.3 Aplicações Estruturais

2.3 Betão

2.3.1 Considerações gerais

2.3.2 Comportamento mecânico e propriedades térmicas

2.3.3 Aplicações Estruturais

2. Materiais

2.1. Aço inoxidável

2.1.1. Considerações gerais

O aço inoxidável tem características desejáveis para uma ampla variedade de aplicações na construção. A sua resistência à corrosão e longa duração torna as estruturas mais esbeltas e duráveis, o que proporciona uma fácil manutenção, mas também tem vantagens arquitetónicas com variadas formas e cores possíveis (Moreno & Baddoo, 2007).

A utilização do aço inoxidável para fins estruturais tem estado reservada a projetos de elevado valor arquitetónico em que o carácter inovador das soluções adotadas constitui fator da sua valorização. O alto custo inicial deste tipo de aço, aliado à existência de regras de dimensionamento limitadas, o número de secções disponíveis e a falta de conhecimento dos benefícios adicionais da sua utilização como material estrutural, são alguns dos motivos que levam os projetistas a não o utilizar (Gardner, 2005).

Existem diferentes classes de aço inoxidável que de acordo com a sua estrutura metalúrgica são classificados em 5 grupos: martensíticos, ferríticos (1.4003), austeníticos (1.4301), austeníticos-ferríticos ou duplex (1.4462) e os endurecidos por precipitação (Euro Inox, 2006). Os austeníticos e os duplex são habitualmente os mais usados em aplicações estruturais e adicionando os ferríticos (1.4003) serão as classes constituintes dos perfis híbridos aqui estudados nesta dissertação.

Todos estes tipos de aço inoxidável diferem na sua composição química, onde o aço com maior percentagem de níquel é o austenítico, e o ferrítico apresenta menor percentagem deste elemento citado onde por sua vez é substituído por uma maior percentagem de cromo, tal como ilustra a figura 2.1.

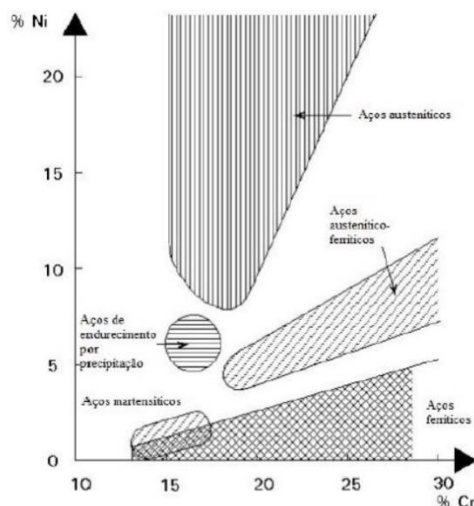


Figura 2.1 – Tipos de aço inoxidável (ESDEP, 2000).

2.1.2. Comportamento mecânico e propriedades térmicas

Quanto às características mecânicas do aço inoxidável, apresenta-se na tabela 2.1 a comparação das mesmas para o aço inoxidável 1.4301 e aço carbono S235 (CEN, 2005a) e (CEN, 2006a).

Tabela 2.1– Comparação das propriedades dos aços S235 e 1.4301 a 20°C (CEN, 2005a) (CEN, 2006a)

Propriedades mecânicas	Aço carbono S235	Aço inoxidável 1.4301
Tensão de rotura f_u (MPa)	360	520
Tensão convencional de cedência f_y (MPa)	235	210
Extensão após rotura	>15%	40%

O seu dimensionamento é semelhante ao aço carbono, contudo o aço inoxidável apresenta diferente comportamento de tensão do aço carbono o que afeta o procedimento de dimensionamento ao bambeamento e deformações, como referido em documentos europeus de dimensionamento e padronização como o Eurocódigo 3, Parte 1-4 (CEN, 2006a) e o Manual de Dimensionamento Europeu para Estruturas em Aço Inoxidável (Euro Inox & Institute, 2006).

Quanto ao comportamento ao fogo o aço inoxidável tem diferenças em relação ao aço carbono e também entre os vários tipos de aço inoxidável já descritos acima. Todos os

materiais perdem rigidez quando aquecidos, mas existe uma considerável variação na taxa de degradação das propriedades mecânicas dos vários metais. O aço inoxidável austenítico apresenta uma melhor retenção de resistência do que o aço carbono para temperaturas acima dos 550 °C e melhor retenção da rigidez para qualquer temperatura elevada tal como ilustra a figura 2.2 e 2.3 respetivamente.

Isto deve-se à diferença cristalina dos dois metais, onde os átomos do aço inoxidável austenítico estão mais compactados do que a estrutura atômica do aço carbono, que têm microestrutura ferrítica. O aço inoxidável austenítico tem também comparativamente com o aço carbono um nível mais elevado de elementos de liga, onde as adições destes elementos fazem diminuir as taxas de difusão dos átomos dentro da rede cristalina a uma dada temperatura, o que atrasa os mecanismos de deformação de amolecimento, de recristalização e de fluência que controlam a resistência e elasticidade a temperaturas elevadas (Renaud, 2007).

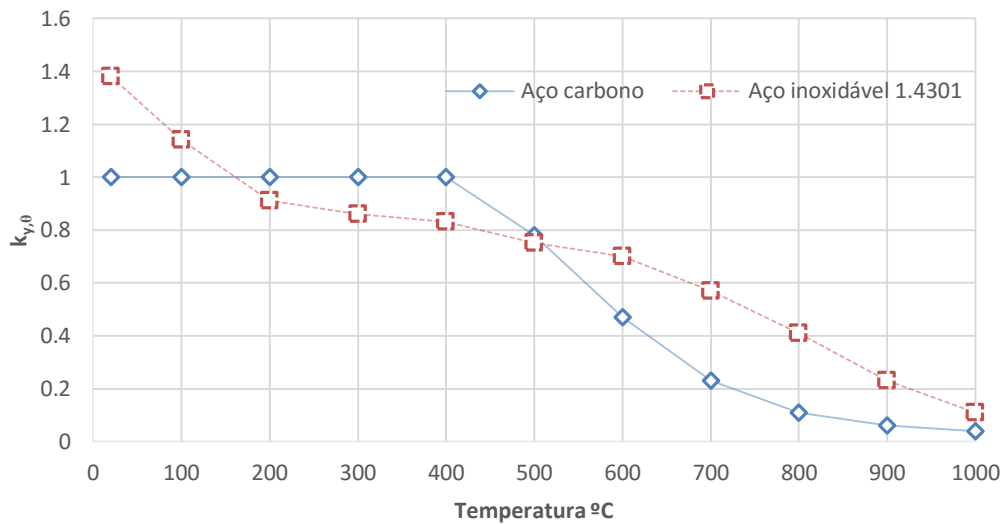


Figura 2.2- Comparação do fator de retenção de resistência $k_{y,\theta}$ do aço inoxidável e aço carbono (CEN, 2005b)

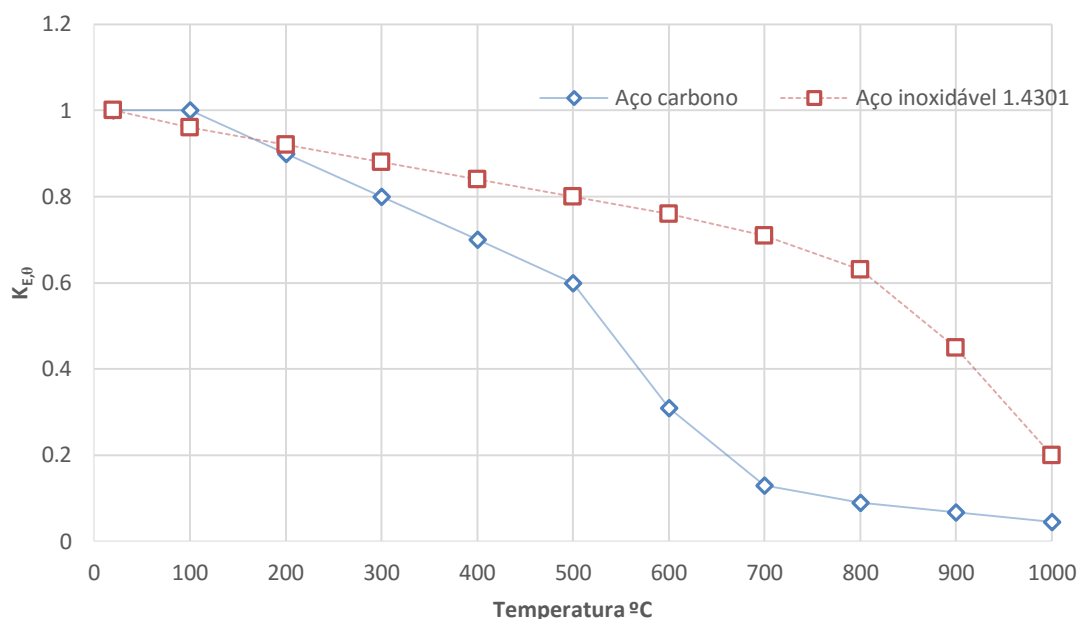


Figura 2.3- Comparação do fator de retenção de rigidez $k_{E,\theta}$ do aço inoxidável e aço carbono (Renaud, 2007)

A condutibilidade térmica do aço inoxidável é bem mais baixa do que a do aço carbono. Contudo existe uma variação da mesma a temperaturas elevadas, ou seja, com o aumentar da temperatura essa característica vai variar.

A 20 °C, a condutibilidade térmica do aço inoxidável toma o valor de 14.85 W/mK. O calor específico tem o valor de 455.48 J/KgK (CEN, 2005b).

O aço inoxidável apresenta à temperatura ambiente, contrariamente ao aço carbono, um comportamento não linear, mesmo para reduzidos valores de tensão. Por outro lado, não tem uma tensão de cedência claramente definida, sendo usualmente adotado um limite convencional de elasticidade correspondente a uma deformação de 0,2% (Lopes, Vila Real, Piloto, Mesquita, & Simões da Silva).

Na figura 2.4 estão representadas as leis constitutivas do aço carbono S235 e do aço inoxidável 1.4301 à temperatura ambiente e a 600 °C (CEN, 2005b) (CEN, 2006a).

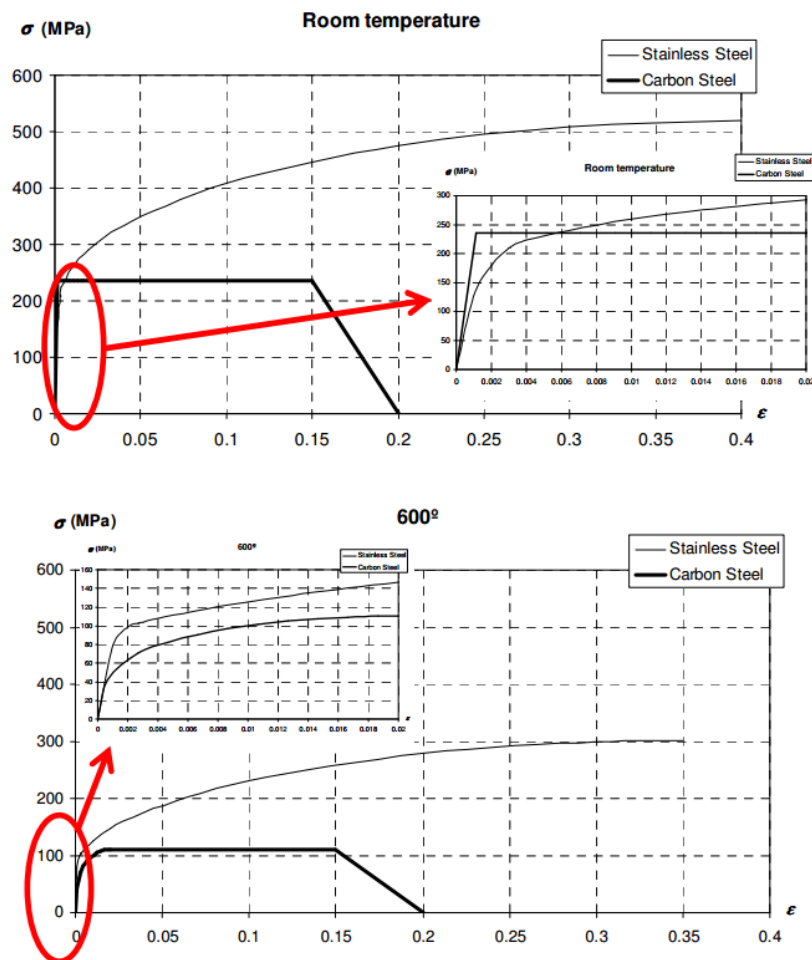


Figura 2.4 - Leis constitutivas do aço carbono e do aço inoxidável 1.4301 à temperatura ambiente e a 600°C (Lopes, Vila Real, Piloto, Mesquita, & Simões da Silva).

2.1.3. Aplicações Estruturais

O aço inoxidável tem tido um aumento do seu uso em diversos tipos de utilização, muito devido ao seu bom comportamento mecânico ao fogo, à sua elevada resistência à corrosão, e sua boa aparência estética.

Também o seu estudo tem vindo a ser mais explorado nos últimos tempos o que amplia consequentemente um uso numa maior variedade de áreas.

Apresentam-se de seguida nas figuras 2.5, 2.6 e 2.7, estruturas esteticamente bastante apreciadas em diversos locais, onde o aço inoxidável serve de suporte estrutural a construções esbeltas, tanto de locais de lazer como de edificações de carácter público, onde algumas com fachadas envidraçadas e esteticamente apelativas.



Figura 2.5- Café em Berlim, Alemanha, estrutura em aço inoxidável (EuroInox, 2008)



Figura 2.6- Pavilhão em Zurique, Suíça (EuroInox, 2008).



Figura 2.7- Estação ferroviária em Gent, Bélgica (Baddoo, 2009)

2.2. Aço Carbono

2.2.1. Considerações gerais

O aço carbono provém de uma liga metálica formada essencialmente por ferro e carbono, com percentagens deste último variando entre 0.008 e 2.11% (Ashby & Jones, 1992). As suas propriedades podem variar de acordo com a sua composição química e teor de carbono. O aço apresenta um comportamento dúctil com regimes de deformação elástica e plástica. Até certo nível de tensão aplicada, o material trabalha no regime elástico-linear, onde a constante de proporcionalidade é denominada módulo de deformação longitudinal ou módulo de elasticidade (William D. Callister, 2002).

Ultrapassado o limite de proporcionalidade, tem lugar a fase plástica, na qual ocorrem deformações crescentes sem variação de tensão tal como ilustra a figura 2.4. (CEN, 2005a).

2.2.2. Comportamento mecânico e propriedades térmicas à temperatura ambiente

As propriedades mecânicas do aço carbono mais utilizado e que será o utilizado para o estudo neste documento, o aço carbono de classe S235 estão já referidas no ponto 2.1.2. onde foi comparado com o outro aço em estudo (aço inoxidável).

Para a presente dissertação interessa saber a condutibilidade térmica do aço carbono que segundo (CEN, 2005b) toma o valor de 53.33 W/mK.

O mesmo documento para a mesma temperatura define também o valor de 439 J/kgK para o calor específico.

CAPÍTULO 3. CÁLCULO ANALÍTICO DA
RESISTÊNCIA À FLEXÃO

3 Cálculo Analítico da Resistência à flexão

- 3.1 Caso de estudo
- 3.2 Metodologia de cálculo da resistência da secção
 - 3.2.1 Alma
 - 3.2.2 Banzo
 - 3.2.3 Formulação de cálculo para a contabilização da encurvadura lateral
- 3.3 Momentos resistentes em função da temperatura

3. Cálculo Analítico da Resistência à flexão

3.1. Caso de estudo

Neste capítulo abordar-se-á um caso de estudo de uma viga híbrida constituída por uma secção de metade de um perfil HEB 400 dividido transversalmente pelo seu eixo de simetria horizontal e soldado inferiormente a uma chapa de aço inoxidável austenítico de classe 1.4301 de dimensões 350x20 (mm) como ilustra a figura 3.1.

O objetivo será analisar a sua resistência à flexão a altas temperaturas, onde se assume que o material aço inoxidável perderá a sua resistência mecânica devido ao aquecimento do modelo, e o aço carbono do perfil HEB 400 (ArcelorMittal, Sections and Merchant Bars, 2014) mantém a temperatura por proteção do betão da laje que o envolve.

Para a análise enunciada serão assumidas duas exposições da secção transversal ao fogo distintas, uma onde o elemento banzo inferior é o único exposto à ação do fogo enquanto o betão exerce a sua capacidade isolante na restante secção do perfil, e uma outra onde a total secção é sujeita à ação do aumento da temperatura produzida pelo fogo.

Estes dois casos de exposição serão comparados com mais três casos de secções diferentes da enunciada acima, mais duas classes de aço inoxidável constituintes do banzo inferior, um aço ferrítico 1.4003 e um aço austenítico-ferrítico 1.4662, e serão comparadas também com a secção totalmente composta em aço carbono da classe S235.

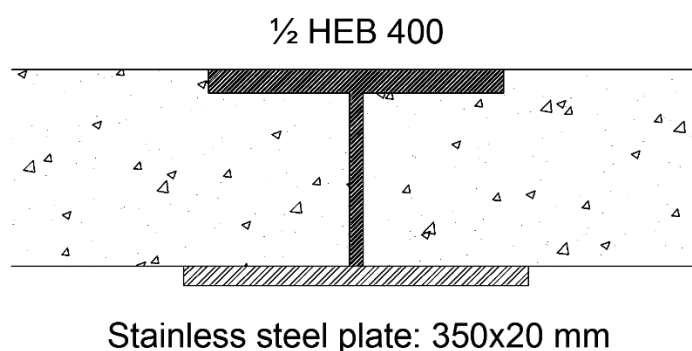


Figura 3.1- Viga híbrida constituída por 1/2 HEB 400 em aço carbono e banzo inferior de aço inoxidável de dimensões 350x20 (mm).

Os valores nominais da tensão de cedência f_y e da tensão última à tração f_u para as classes de aço escolhidas para o modelo de estudo apresentam-se na tabela 3.1 de acordo com

(CEN, 2005a) e (CEN, 2006a) para o aço carbono da classe S235 e para as classes de aço inoxidável 1.4301, 1.4003 e 1.4462 respetivamente.

Tabela 3.1- Valores nominais da tensão de cedência f_y e da tensão última à tração f_u (CEN, 2005a), (CEN, 2006a).

Classe de aço	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]
S235	235	360
1.4301	210	520
1.4003	250	450
1.4462	460	640

As dimensões do perfil para as várias secções em estudo são apresentadas na tabela 3.2, tal como ilustra também a figura 3.2.

Tabela 3.2- Valores em milímetros das dimensões para as várias secções do modelo em análise.

Secção	S1	S2	S3	S4
h	220	224	224	220
b1	300	300	300	300
tf1	24	24	24	24
tw	13.5	13.5	13.5	13.5
b2	350	300	350	300
tf2	20	24	24	20

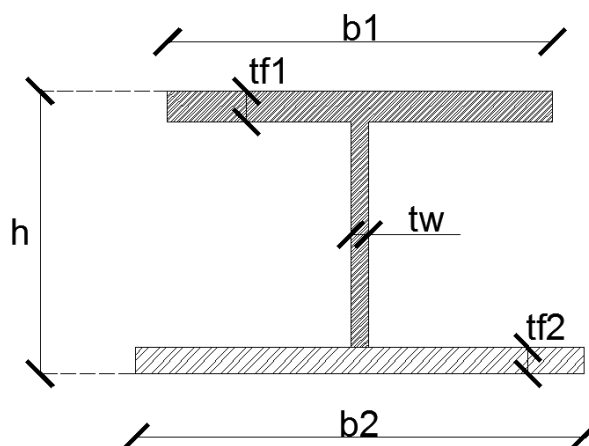


Figura 3.2- Esquema do modelo em análise.

3.2. Metodologia de cálculo da resistência da secção

De acordo com (ArcelorMittal, 2014) o perfil HEB 400 é de classe 1, tanto para elementos internos comprimidos (alma) como para elementos banzos em consola calculados pelo fabricante segundo a norma EN 1993-1-1 (CEN, 2005a).

Para a definição da classe do banzo inferior em aço inoxidável austenítico 1.4301 soldado o cálculo da classe é determinado de acordo com a EN 1993-1-4 (CEN, 2006a) tabela 4.3.

Tabela 3.3- Relações máximas de largura e espessura para componentes comprimidos em aço inoxidável (CEN, 2006a).

Classe	Condição a satisfazer
1	$c/t \leq 9 \cdot \varepsilon$
2	$c/t \leq 9.4 \cdot \varepsilon$
3	$c/t \leq 11 \cdot \varepsilon$

Para $c = \frac{(b_2 - t_w)}{2}$, $t = t_f 2$ e para um aço inoxidável austenítico de classe 1.4301, ε toma o valor de 1.03, determinamos então que o banzo inferior é de classe 1.

O interesse da classificação das secções transversais tem como objetivo identificar em que medida a sua resistência e a sua capacidade de rotação são limitadas pela ocorrência de encurvadura local, onde segundo a norma EN 1993-1-1 para elementos de classe 1 as secções transversais da classe 1 são aquelas em que se pode formar uma rótula plástica, com a capacidade de rotação necessária para uma análise plástica, sem redução da sua resistência (CEN, 2005a).

Assim sendo com a possibilidade de uma análise plástica a determinação do eixo neutro plástico torna-se fundamental para o cálculo do momento resistente M_{rd} da secção em estudo. Para esta análise e consequente determinação do eixo neutro plástico a equação seguinte tem de ser satisfeita:

$$\sum N = 0 \quad (3.1)$$

Com o aumentar da temperatura existe uma perda consequente da resistência do banzo inferior em aço inoxidável, o eixo neutro plástico sobe progressivamente, de modo a que existam dois casos de possível localização desse eixo. No primeiro caso temos o eixo neutro localizado na alma da seção, e um segundo caso onde esse mesmo eixo se situa no banzo superior, o que nos leva a dois modelos de cálculo de equilíbrio de forças distintos. Ilustra-se na figura 3.4 e 3.5 nos subcapítulos 3.2.1. e 3.2.2. respetivamente o esquema representativo das forças de equilíbrio que derivam da equação (3.1). Nota: $f_{y,cs}$ e $f_{y,ss}$ representa o valor nominal da tensão de cedência para o aço carbono e aço inoxidável respetivamente e x representa o eixo neutro plástico.

A partir destes dois casos, o eixo neutro plástico é definido tendo em conta como já acima referido a perda da resistência por aquecimento do banzo inferior em aço inoxidável $f_{y,ss}$, esse valor com a aumento da temperatura é dado por $f_{y,\theta}$ e é dado pela seguinte equação definida pela EN 1993-1-2 Anexo C (CEN, 2005b) :

$$f_{y,\theta} = f_{0.2p,\theta} + k_{2\%,\theta} \cdot (f_{u,\theta} - f_{0.2p,\theta}) \quad (3.2)$$

Os valores $f_{0.2p,\theta}$, $k_{2\%,\theta}$ e $f_{u,\theta}$ para o aço inoxidável austenítico 1.4301 encontram-se também no documento EN 1993-1-2 Anexo C (CEN, 2005b) e ilustrados neste documento na tabela 3.4.

Tabela 3.4- Fatores para a determinação da rigidez do aço inoxidável austenítico da Classe 1.4301 a temperaturas elevadas (CEN, 2005b).

Temperatura do aço θ_a [°C]	Fator de redução (referido a f_y) para a tensão limite convencional de proporcionalidade $k_{0.2p,\theta} = f_{0.2p,\theta} / f_y$	Fator de redução (referido a f_u) para a tensão de rotura à tração $k_{u,\theta} = f_{u,\theta} / f_u$	Fator para a determinação da tensão de cedência $f_{y,\theta}$ $k_{2\%,\theta}$	Tensão de cedência $f_{y,\theta}$ [N/mm ²]
20	1.00	1.00	0.26	290.60
100	0.82	0.87	0.24	239.45
200	0.68	0.77	0.19	191.74
300	0.64	0.73	0.19	180.99
400	0.60	0.72	0.19	173.20
500	0.54	0.67	0.19	158.05
600	0.49	0.58	0.22	146.61
700	0.40	0.43	0.26	120.30
800	0.27	0.27	0.35	86.00
900	0.14	0.15	0.38	47.87
1000	0.06	0.07	0.40	22.12

Com os valores da posição do eixo neutro o cálculo do momento resistente M_{rd} é calculado a partir da resultante das forças atuantes de tração e compressão da seção, onde a definição dos braços de cada força é ilustrada na figura 3.4 e 3.5 nos subcapítulos 3.2.1. e 3.2.2. para o caso 1 e caso 2 respetivamente.

Após a determinação das resultantes e dos seus pontos de aplicação e distâncias ao eixo neutro para cada temperatura, a determinação do momento resistente é dado pela expressão (3.3) e tem representação esquemática na figura 3.3.

$$M_{rd} = R1 \cdot (L1 + L2) = R2 \cdot (L1 + L2) \quad (3.3)$$

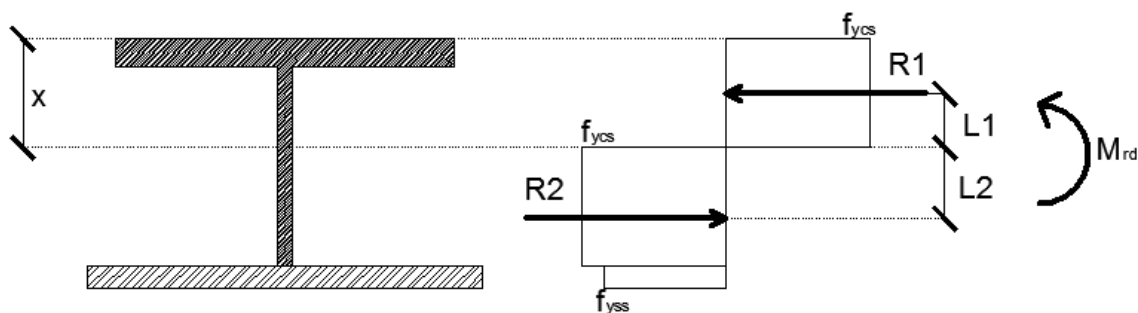


Figura 3.3- Ilustração das resultantes, pontos de aplicação e suas distâncias ao eixo neutro plástico da seção.

3.2.1. Alma

Neste caso como já enunciado em 4.2. temos o eixo neutro plástico localizado na alma do perfil.

As forças atuantes são dadas em função de x e apresentam-se seguidamente:

$$\begin{cases} F1 = tf1 \cdot b1 \cdot f_{y,cs} \\ F2 = (x - tf1) \cdot tw \cdot f_{y,cs} \\ F3 = (h - tf2 - x) \cdot tw \cdot f_{y,cs} \\ F4 = tf2 \cdot b2 \cdot f_{y,ss} \end{cases} \quad (3.4)$$

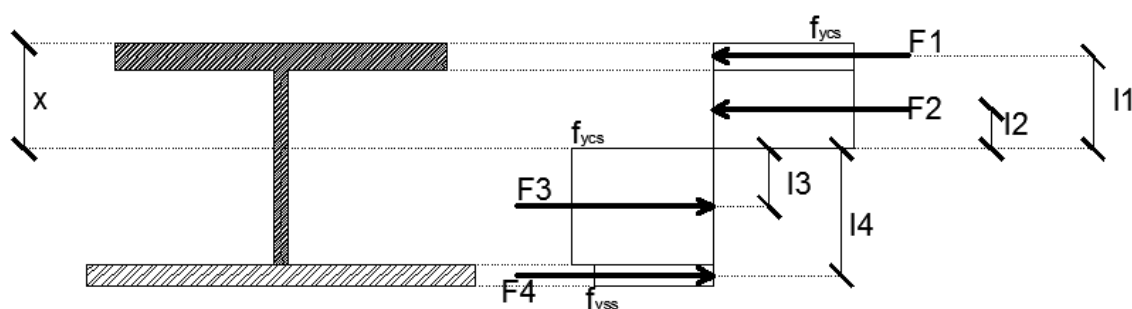


Figura 3.4- Ilustração das forças atuantes e respectivos braços e pontos de aplicação em relação ao eixo neutro para o caso 1.

O valor da distância das forças atuantes ao eixo neutro (braço) são dados em função de x pelas seguintes equações, para o caso 1:

$$\begin{cases} l1 = x - tf1 \cdot 0.5 \\ l2 = (x - tf1) \cdot 0.5 \\ l3 = (h - tf2 - x) \cdot 0.5 \\ l4 = h - x - tf2 \cdot 0.5 \end{cases} \quad (3.5)$$

As resultantes R1 e R2 dos esforços de compressão e tração respetivamente terão o mesmo valor e são dadas pela equação:

$$R1 = R2 = F1 + F2 = F3 + F4 \quad (3.6)$$

Os braços l1 e l2 que correspondem ao ponto de aplicação das resultantes R1 e R2 respetivamente são determinados pelas expressões:

$$L1 = (F1 \cdot l1 + F2 \cdot l2) / R1 \quad (3.7)$$

$$L2 = (F3 \cdot l3 + F4 \cdot l4) / R2 \quad (3.8)$$

3.2.2. Banzo

Neste caso como já referido em 4.2. o eixo neutro plástico localiza-se no banzo superior do nosso perfil.

As forças atuantes são dadas em função de x e apresentam-se seguidamente:

$$\begin{cases} F1 = b1 \cdot x \cdot f_{y,cs} \\ F2 = (tf1 - x) \cdot b1 \cdot f_{y,cs} \\ F3 = (h - tf1 - tf2) \cdot tw \cdot f_{y,cs} \\ F4 = tf2 \cdot b2 \cdot f_{y,ss} \end{cases} \quad (3.9)$$

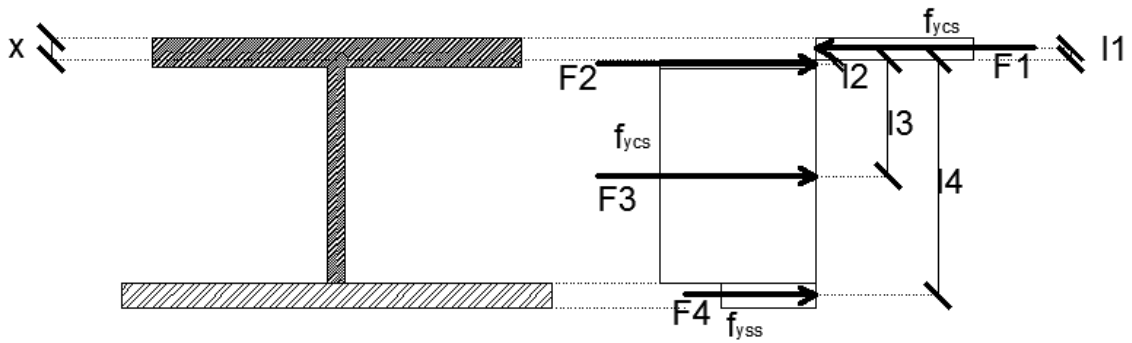


Figura 3.5- Ilustração das forças atuantes e respectivos braços e pontos de aplicação em relação ao eixo neutro para o caso 2.

Para este caso o valor da distância das forças atuantes ao eixo neutro (braço) em função de x é dado pelas expressões:

$$\begin{cases} l1 = x \cdot 0.5 \\ l2 = (tf1 - x) \cdot 0.5 \\ l3 = (h - tf2 - tf1) \cdot 0.5 + (tf1 - x) \\ l4 = h - x - tf2 \cdot 0.5 \end{cases} \quad (3.10)$$

As resultantes $R1$ e $R2$ são dadas por:

$$R1 = R2 = F1 = F2 + F3 + F4 \quad (3.11)$$

Os braços $l1$ e $l2$ que correspondem ao ponto de aplicação das resultantes $R1$ e $R2$ respectivamente são determinados pelas equações:

$$L1 = x \cdot 0.5 \quad (3.12)$$

$$L2 = (F2 \cdot l2 + F3 \cdot l3 + F4 \cdot l4) / R2 \quad (3.13)$$

3.2.3. Formulação de cálculo para a contabilização da encurvadura lateral

3.2.3.1. Definição de encurvadura lateral

Quando uma viga é submetida a um estado de flexão relativamente ao eixo de maior rigidez, a sua secção pode rodar e deslocar-se lateralmente antes de atingir o estado limite de resistência como ilustrado na figura 3.7. Este estado limite de instabilidade é normalmente conhecido como encurvadura lateral torsional. A rotação de uma secção reta da viga ocorrerá quando o banzo em compressão se torna instável como resultado do nível de tensões axiais de compressão induzidas pela flexão. A situação de encurvadura lateral de vigas tem importância relevante quando o banzo comprimido do elemento estrutural se encontra lateralmente livre de qualquer apoio, como é o caso de vigas contínuas, pilares, vigas encastradas ou outro tipo de estrutura porticada (Vila Real & Piloto, 2000). O comportamento de instabilidade de uma viga pode ser traduzido pelos gráficos de deslocamento vertical no plano de flexão “v” e deslocamentos laterais “μ” no plano ortogonal, acompanhados por uma rotação da secção “Φ”. (Vila Real & Piloto, 2000). A figura 3.6 ilustra esse comportamento e os respetivos deslocamentos e rotação.

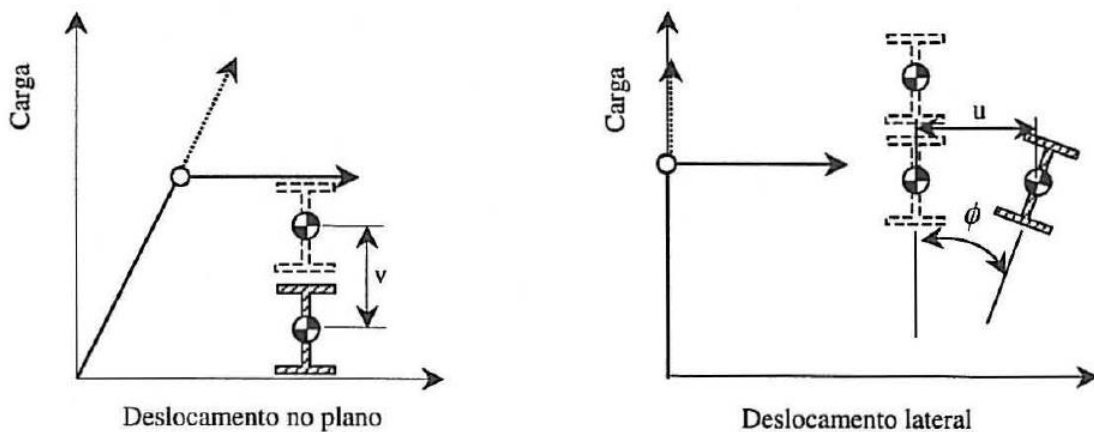


Figura 3.6- Representação gráfica do movimento da secção de uma viga (Vila Real & Piloto, 2000).

Neste caso a rotação por torção faz com que o momento aplicado produza momentos fora do plano original de flexão enquanto que as rotações laterais proporcionam o

aparecimento de componentes de binários à volta do eixo de rotação que passa pelo centro de corte (Vila Real & Piloto, 2000).

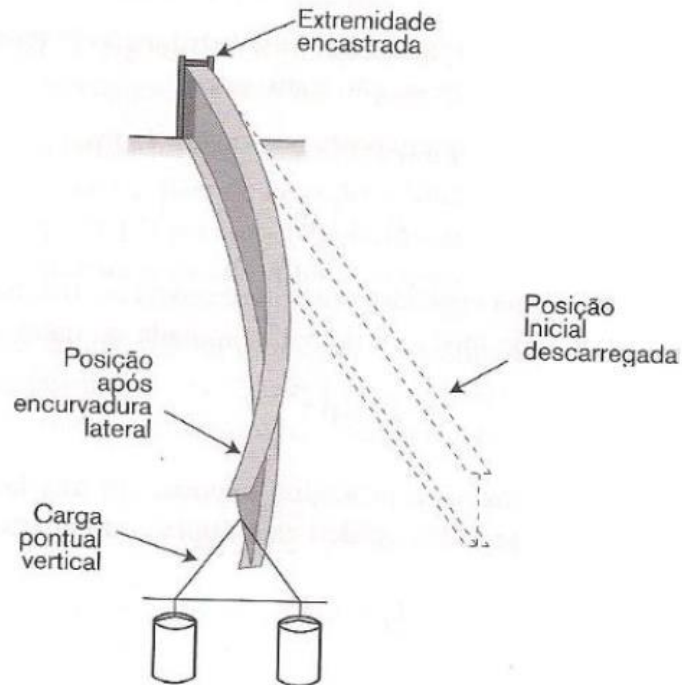


Figura 3.7- Encurvadura lateral de vigas (Vila Real P., 2003).

Os métodos de projeto utilizados contra o aparecimento desse fenómeno são essencialmente dois. Primeiro o projetista deverá utilizar secções retas de vigas não suscetíveis de encurvar, como são exemplo as secções do tipo oco e numa segunda possibilidade, utilizar suportes laterais ao longo da viga, quer aumentando o número de apoios que aumentando a eficiência destes (Trahair, 1993). Um exemplo de um modelo numérico deste ultimo está ilustrado na figura 3.8.

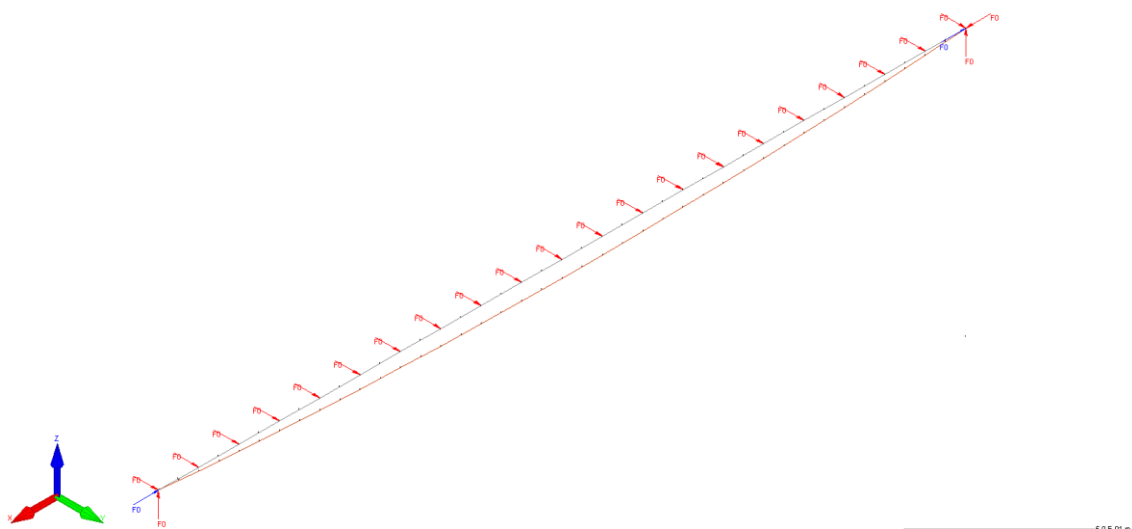


Figura 3.8- Exemplo de modelo numérico de viga impedida de se deslocar lateralmente.

O comportamento à temperatura ambiente difere do comportamento à temperatura elevada de 600 [°C] especialmente nos valores máximos dos deslocamentos medidos nas duas direções e atingidos no instante do colapso e ainda na rigidez, influenciada pela diminuição do valor das propriedades mecânicas.

Para esta dissertação o modelo numérico usado para a análise dos valores de resistência e verificação do fenómeno de encurvadura lateral será uma viga simplesmente apoiada sujeita à flexão simples como ilustra a figura 3.9.

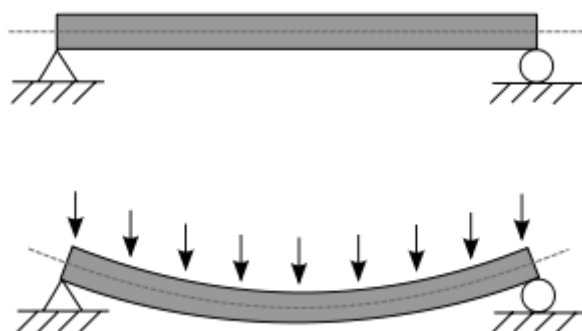


Figura 3.9- Modelo numérico usado para o cálculo, viga simplesmente apoiada.

Uma viga “simplesmente apoiada” encontra-se apoiada conforme ilustrado também na figura 3.10, em que os apoios são materializados através de “forquilhas”, que restringem o deslocamento vertical e horizontal (eixos z e y) e a rotação (eixo x). Estas condições são colocadas no programa de cálculo numérico SAFIR (Amarante, 2012).

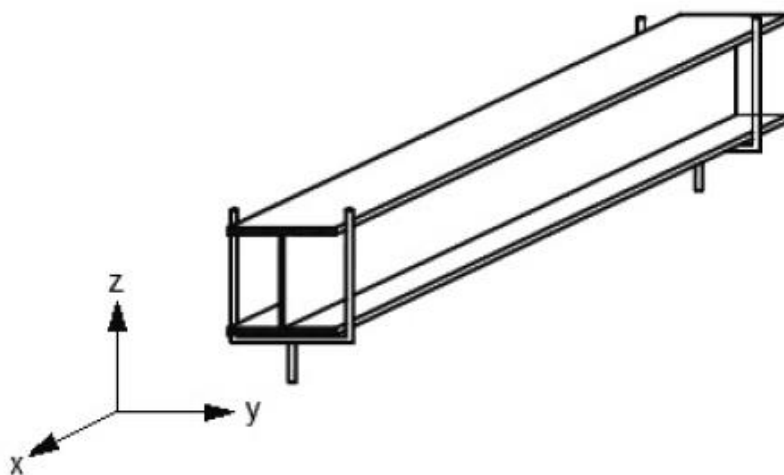


Figura 3.10- Condições de apoio e coluna-viga do tipo “forquilha” (Mendonça, 2006).

3.2.3.2. Resistência do elemento sujeito à encurvadura lateral à temperatura ambiente

Segundo a EN 1993-1-1 (CEN, 2005b), nos casos em que existe flexão simples (figura 3.11) e com condições para ocorrência de encurvadura lateral, a resistência deve ser reduzida de forma a ter em conta este fenómeno de instabilidade. Logo a mesma norma prevê a seguinte verificação:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1 \quad (3.14)$$

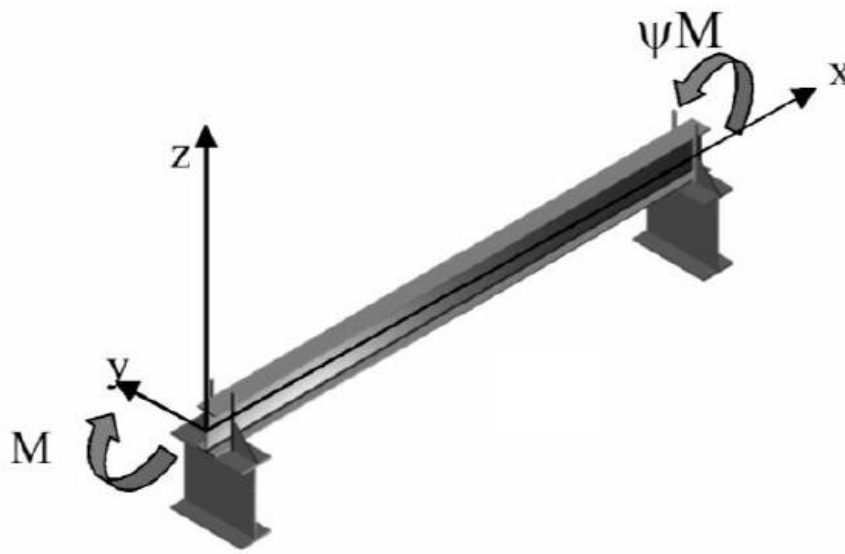


Figura 3.11- Viga simplesmente apoiada sujeita à flexão simples (Vila Real P., 2003)

O valor de cálculo do momento resistente à encurvadura lateral $M_{b,Rd}$ de um elemento sem travamento lateral é dado por:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_{pl,y} \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (3.15)$$

Onde χ_{LT} é o coeficiente de redução para encurvadura lateral; $W_{pl,y}$ representa o módulo de flexão plástico que corresponde a secções de Classe 1 ou 2 (Classe 1, caso de estudo) segundo o eixo forte – yy – e f_y representa a tensão de cedência do aço.

Para elementos em flexão com secções transversais uniformes, o valor de χ_{LT} correspondente à esbelteza normalizada $\bar{\lambda}_{LT}$ deverá ser determinado a partir de:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad (3.16)$$

Em que:

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] \quad (3.17)$$

α_{LT} corresponde ao fator de imperfeição que é definido pela curva de encurvadura apropriada definida no Anexo Nacional, onde os valores recomendados são indicados na tabela 3.5 (CEN, 2005a).

Tabela 3.5- Valores recomendados dos fatores de imperfeição para as curvas de encurvadura lateral (CEN, 2005a)

Curva de encurvadura	a	b	c	d
Fator de imperfeição α_{LT}	0,21	0,34	0,49	0,76

De modo a escolher as curvas de encurvadura lateral a EN 1993-1-1 (CEN, 2005a) apresenta na tabela 3.6 as curvas recomendadas de acordo com limites de altura/largura da secção em causa.

Tabela 3.6- Curvas de encurvadura lateral recomendadas para secções transversais (CEN, 2005a)

Secção transversal	Limites	Curva de encurvadura
Secções em I laminadas	$h/b \leq 2$	a
	$h/b > 2$	b
Secções em I soldadas	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d
Outras secções transversais	-	d

O valor correspondente à esbelteza normalizada $\bar{\lambda}_{LT}$ é determinado a partir de:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} f_y}{M_{cr}}} \quad (3.18)$$

Com M_{cr} a representar o momento crítico elástico de encurvadura lateral, que se baseia nas propriedades da secção bruta e tem em consideração as condições de carregamento,

a distribuição real dos momentos fletores e os travamentos laterais. (sendo $k = k_w = 1$ para as condições de apoio) o momento crítico é determinado a partir de (CEN, 2005a) :

$$M_{Cr} = C_1 \frac{E\pi^2 I_z}{L^2} \sqrt{I_w + \frac{L^2 G I_t}{\pi^2 E I_z}} \quad (3.19)$$

Sendo I_t a inércia de torção, I_w a inércia de empenamento e C_1 um coeficiente que depende do carregamento e condições de apoio, dado pelo Anexo F da EN 1993-1-1 (CEN, 2005a).

3.2.3.3. Resistência do elemento sujeito à encurvadura lateral em situação de incêndio

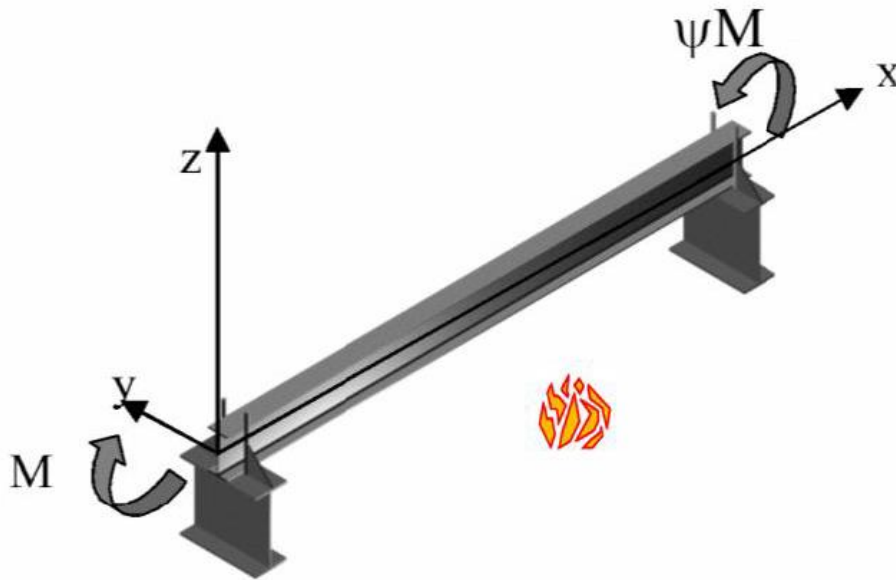


Figura 3.12- Viga simplesmente apoiada sujeita a flexão simples a altas temperaturas (Vila Real P. , 2003).

O valor de cálculo do momento resistente $M_{fi,\theta,Rd}$ à encurvadura lateral de um elemento sem travamento lateral de secção transversal da Classe 1 ou da Classe 2 com uma temperatura uniforme θ_a é dado por (Vila Real P. , 2003) :

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi} W_{pl,y} k_{y,\theta,com} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad (3.20)$$

Onde $\chi_{LT,fi}$ é o coeficiente de redução para encurvadura lateral em situação de incêndio e $k_{y,\theta,com}$ o fator de redução para a tensão de cedência do aço à temperatura máxima no banzo comprimido.

O valor de $\chi_{LT,fi}$ deverá ser determinado de acordo com as seguintes expressões:

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\Phi_{LT,\theta,com} + \sqrt{(\Phi_{LT,\theta,com})^2 - (\bar{\lambda}_{LT,\theta,com})^2}} \quad (3.21)$$

em que:

$$\alpha = 0,65 \sqrt{235/f_y} \quad (3.22)$$

e

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com} = \bar{\lambda}_{LT} [k_{y,\theta,com}/k_{E,\theta,com}]^{0,5} \quad (3.23)$$

com:

$k_{E,\theta,com}$ fator de redução para a inclinação da reta que representa o domínio elástico à temperatura máxima do aço no banzo comprimido.

Apresenta-se na tabela 3.7 os valores de $k_{y,\theta}$ (valor de cálculo da tensão de cedência) e $k_{E,\theta}$ (inclinação da reta que representa o domínio elástico) para o aço carbono.

Tabela 3.7- Fatores para a determinação da extensão e da rigidez do aço carbono a temperaturas elevadas (CEN, 2005b)

Temperatura do aço [°C]	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
$k_{E,\theta}$	1,00	1,00	0,90	0,80	0,70	0,60	0,31	0,13	0,09	0,07	0,05
$k_{y,\theta}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,78	0,47	0,23	0,11	0,06	0,04

3.3. Momentos resistentes em função da temperatura

Apresenta-se neste ponto, os valores do momento resistente M_{rd} para as várias temperaturas de análise da secção 1 (S1) híbrida com banzo inferior em aço inoxidável austenítico 1.4301, aço inoxidável ferrítico 1.4003 e aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462 que serão comparados com os valores de resistência da mesma secção completamente composta em aço carbono, e para cada uma destas duas composições de secção, dois tipos de exposição ao fogo como apresentado na figura 3.13 e abreviado da maneira seguinte:

- Perfil híbrido com banzo inferior aquecido (Híbrido 1 lado).
- Perfil em aço carbono com banzo inferior aquecido (Carbono 1 lado).
- Perfil híbrido com secção aquecida uniformemente (Híbrido 4 lados).
- Perfil em aço carbono com secção aquecida uniformemente (Carbono 4 lados).

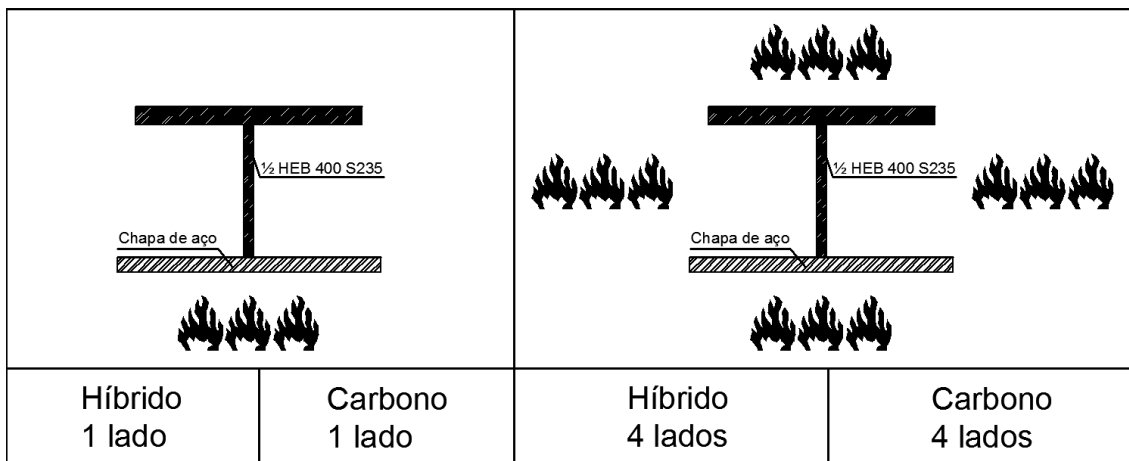


Figura 3.13- Ilustração dos 4 casos em análise.

Tabela 3.8- Valores do momento resistente M_{rd} para várias temperaturas do aço e os vários casos em análise de S1 híbrida em aço inoxidável austenítico 1.4301 e aço carbono S235

Temperatura do aço θ_a [°C]	Momento Resistente $M_{\theta,rd}$ [KN.m]			
	Híbrido	Carbono	Híbrido	Carbono
	1 Lado	1 Lado	4 Lados	4 Lados
20	383.89	354.80	383.89	354.80
100	358.01	354.80	358.01	354.80
200	315.66	354.80	315.66	354.80
300	303.69	354.80	303.69	354.80
400	294.46	354.80	294.46	354.80
500	275.22	306.34	254.96	276.75
600	260.29	212.78	182.70	166.76
700	225.77	137.79	92.26	81.60
800	180.41	99.88	45.37	39.03
900	129.51	84.00	24.79	21.29
1000	94.84	77.63	16.10	14.19

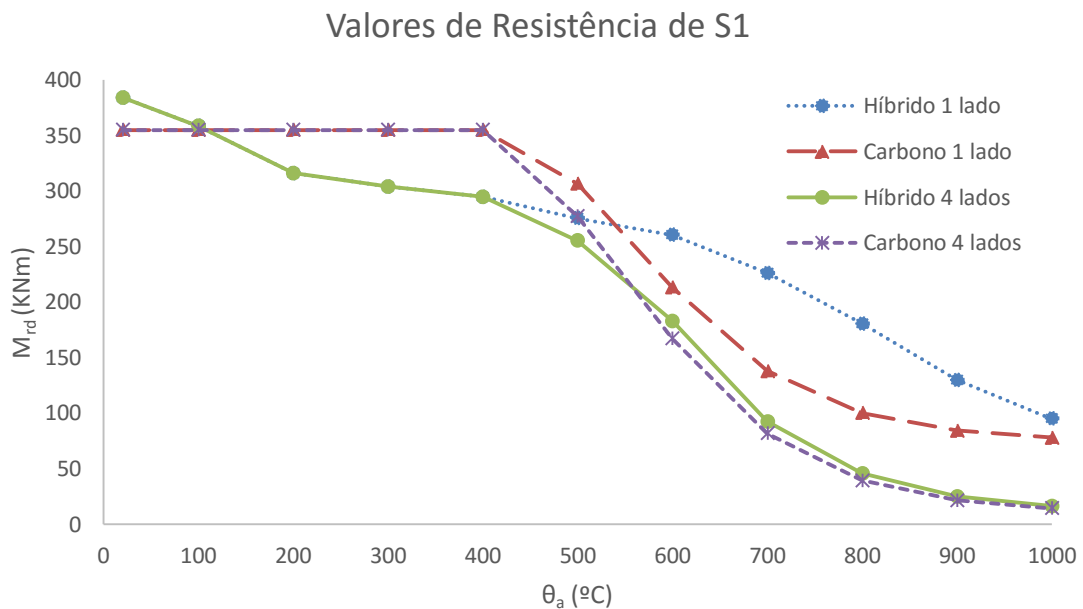


Figura 3.14- Variação dos momentos resistentes M_{rd} em função do aumento da temperatura dos vários casos em análise para o banzo inferior em aço inoxidável austenítico 1.4301 e aço carbono S235 da secção S1

Os resultados obtidos e ilustrados na tabela 3.8 e figura 3.14 refletem uma resistência superior do aço carbono para temperaturas inferiores a 500 °C, tanto para uma exposição ao fogo de 1 lado como de 4 lados. Para temperaturas elevadas (superiores a 500 °C) já se apresenta notório a vantagem de ter protegido grande parte do perfil à exposição ao fogo, o que se reflete nos valores dos momentos resistentes para a secção exposta a fogo em 1 lado. Também é bastante visível que a secção híbrida a altas temperaturas apresenta um melhor comportamento mecânico, onde assim sendo, o caso (Híbrido 1 lado) é o que apresenta melhores resultados.

Tabela 3.9- Valores do momento resistente M_{rd} para várias temperaturas do aço e os vários casos em análise de S1 híbrida em aço inoxidável ferrítico 1.4003 e aço carbono S235

Temperatura do aço θ_a [°C]	Momento Resistente $M_{\theta,rd}$ [KN.m]			
	Híbrido 1 Lado	Carbono 1 Lado	Híbrido 4 Lados	Carbono 4 Lados
20	398.94	354.80	398.94	354.80
100	397.91	354.80	397.91	354.80
200	396.11	354.80	396.11	354.80
300	394.53	354.80	394.53	354.80
400	391.89	354.80	391.89	354.80
500	382.10	306.34	312.06	276.75
600	267.09	212.78	186.92	166.76
700	162.19	137.79	90.92	81.60
800	125.97	99.88	44.33	39.03
900	117.61	84.00	24.85	21.29
1000	106.33	77.63	16.74	14.19

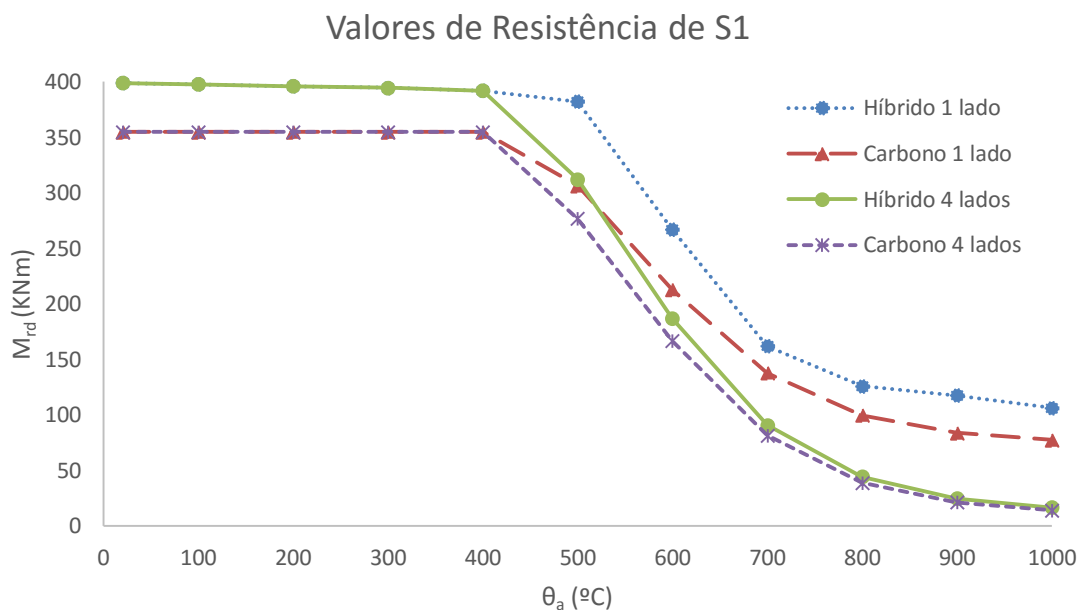


Figura 3.15 – Variação dos momentos resistentes M_{rd} em função do aumento da temperatura dos vários casos em análise para o banzo inferior em aço inoxidável ferrítico 1.4003 e aço carbono S235 da secção S1

Analogamente ao referido para o aço inoxidável austenítico 1.4301, a tabela 3.9 e figura 3.15 apresentam os resultados agora para o aço ferrítico 1.4003.

O resultado é similar, com a verificação da desvantagem de os aços ferríticos demonstrarem um comportamento mais frágil a altas temperaturas, onde apesar do ganho de resistência comparativamente com o aço carbono, a sua perda de resistência mecânica a altas temperaturas é mais acentuada do que para o anterior.

De seguida apresenta-se na tabela 3.10 e figura 3.16 os valores dos momentos resistentes em função da temperatura para secção híbrida agora composta com o aço austenítico-ferrítico 1.4462

Tabela 3.10- Valores do momento resistente M_{rd} para várias temperaturas do aço e os vários casos em análise de S1 híbrida em aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462 e aço carbono S235

Temperatura do aço θ_a [°C]	Momento Resistente M_{rd} [KN.m]			
	Híbrido	Carbono	Híbrido	Carbono
	1 Lado	1 Lado	4 Lados	4 Lados
20	410.54	354.80	410.54	354.80
100	408.42	354.80	408.42	354.80
200	405.42	354.80	405.42	354.80
300	404.08	354.80	404.08	354.80
400	403.16	354.80	403.16	354.80
500	400.68	306.34	317.02	276.75
600	394.31	212.78	195.14	166.76
700	334.03	137.79	97.87	81.60
800	269.90	99.88	48.80	39.03
900	151.04	84.00	25.85	21.29
1000	94.50	77.63	16.35	14.19

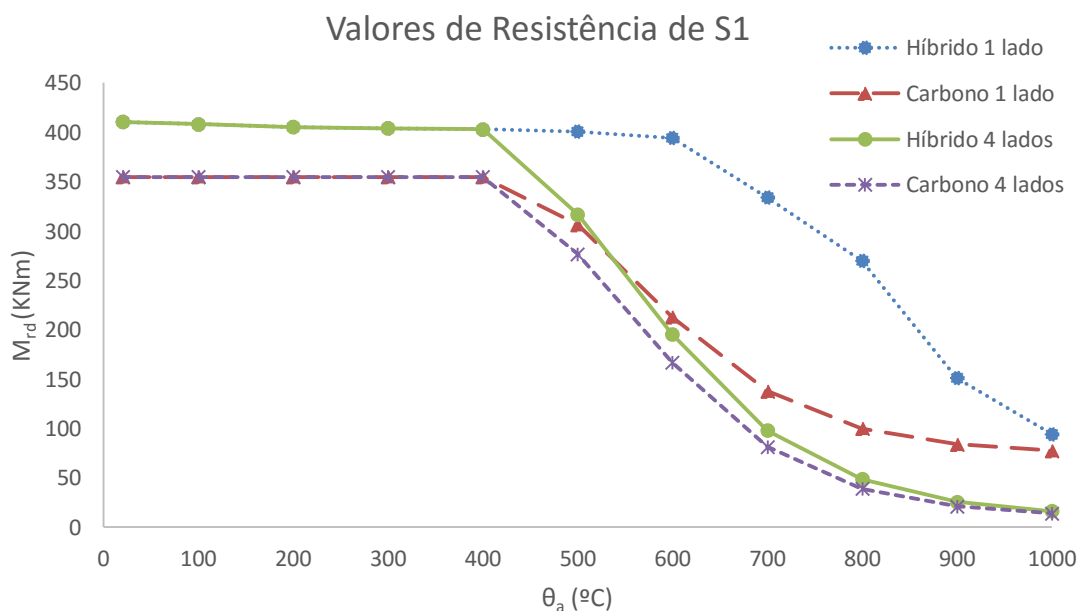


Figura 3.16- Variação dos momentos resistentes M_{rd} em função do aumento da temperatura dos vários casos em análise para o banzo inferior em aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462 e aço carbono S235 da secção S1

Analogamente ao caso anterior apresentam-se em Anexo os valores de momentos resistentes M_{rd} e correspondentes gráficos de variação em função do aumento da temperatura para as secções S2, S3 e S4 dos diferentes aços inoxidáveis em estudo e correspondentes exposições ao fogo.

CAPÍTULO 4. DEFINIÇÃO DO MODELO
NUMÉRICO

4 Definição do Modelo Numérico

4.1 Considerações gerais

4.1.1 Descrição geral do programa SAFIR

4.2 Resistência da secção em aço carbono

4.2.1 Fogo 4 lados

4.2.2 Fogo 1 lado

4.2.3 Comparação com Estado Transitório “Transient State”

4.3 Resistência de vigas com encurvadura lateral

4. Definição do Modelo Numérico

4.1. Considerações gerais

A Resistência à flexão de secções em aço carbono ao fogo pode ser determinada com recurso a programas de cálculo automático, programas estes que calculam a partir de métodos simplificados definidos por regulamentação ou por métodos mais complexos baseados no Método dos Elementos Finitos (MEF). O software utilizado para a análise numérica desta dissertação foi o SAFIR (Franssen, 2011).

4.1.1. Descrição geral do programa SAFIR

SAFIR é um programa de computador para análise de estruturas sob condições de elevada temperatura. O programa é baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF), pode ser utilizado para o estudo do comportamento de estruturas de duas e três dimensões e possui como base em equações integrais com as respetivas condições de apoio em que consiste a divisão do domínio da integração em um número finito de pequenas regiões. Este programa foi desenvolvido na Universidade de Liège, na Bélgica (Franssen, User's manual for SAFIR 2011 a computer program for analysis of structures subjected to fire, 2011).

Como programa de elementos finitos, o SAFIR pode incluir vários elementos de várias idealizações, tendo como base o comportamento tensão-extensão de alguns materiais. O software possui 2 módulos distintos de cálculo: um para análise do comportamento térmico e outro para a análise do comportamento mecânico do elemento. A evolução não uniforme da temperatura é calculada para cada tipo de secção existente na estrutura (análise térmica). Seguidamente o módulo do comportamento mecânico do programa lê estas temperaturas e determina o comportamento termomecânico da estrutura com uma análise incremental e iterativa. Para o caso de elementos de viga tridimensional é necessária uma análise à torção, antes da análise mecânica (Gamelas, 2014).

Para a presente dissertação foram utilizados elementos finitos de viga baseados da hipótese de Bernoulli (Lopes, 2009), onde as secções planas se permaneceram planas após sujeitas à flexão e a sua deformação por esforço transversal não é considerada. Por outro lado, este elemento não tem em conta fenómenos de encurvadura local, portanto só devem ser utilizadas secções de Classe 1 ou Classe 2, tal como definido na NP EN 1993-1-1 (CEN, 2005a).

A geometria de uma secção transversal é descrita com um modelo de fibras, onde essas fibras podem ser triângulos ou quadriláteros. O comportamento do material de cada fibra que compõe a secção é calculado no centro da sua fibra correspondente e constante em toda a fibra, onde cada uma delas pode ter o seu material, tornando possível a construção de secções compostas de diferentes materiais (Lopes, 2009), tal como as secções híbridas estudadas neste presente documento.

Neste modelo de fibras, em cada fibra a temperatura, tensão e outras propriedades dos materiais são consideradas constantes. O elemento de viga com o modelo de fibra permite a consideração de tensões residuais (Franssen, 1989).

O programa SAFIR contempla dois tipos de elementos finitos de viga, um bidimensional e outro tridimensional. Para a presente dissertação a análise numérica do elemento viga foi calculado a partir de modelos tridimensionais.

O elemento finito de viga tridimensional possui dois nós nas suas extremidades com sete graus de liberdade cada um, três deslocamentos, três rotações e uma amplitude de distorção que permite considerar a torção não uniforme. O terceiro nó está localizado no centro do elemento e tem apenas um grau de liberdade que representa a parte não-linear do deslocamento longitudinal. Este elemento é ilustrado na figura 4.1. Um quarto nó é considerado também para definir a posição do eixo local z , onde este eixo é perpendicular ao eixo x , e situado no plano definido pelo eixo x e pelo quarto nó (Lopes, 2009).

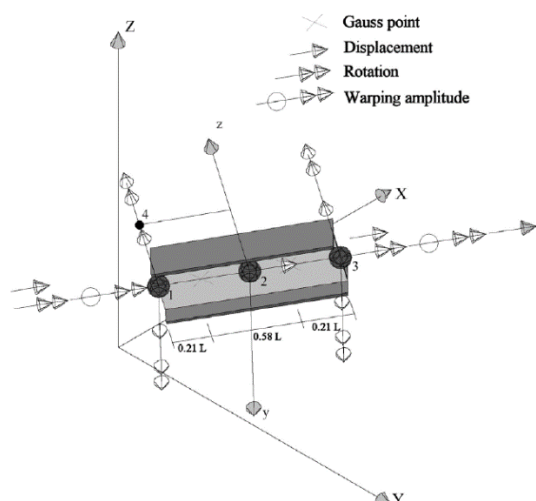


Figura 4.1- Elemento finito de viga 3D (Lopes, 2009)

Para esta dissertação, também o fenómeno da encurvadura deve ser tido em consideração e sujeito a uma análise, onde o elemento tridimensional pode encurvar na direção perpendicular ao plano xOz da viga.

Como já referido acima, as tensões residuais são consideradas no elemento viga e introduzidas no programa.

A consideração dessas tensões é importante pois a presença das mesmas nos elementos pode alterar significativamente a capacidade destes materiais de suportar carregamento, uma vez que estas tensões residuais se sobrepõem à tensão aplicada e podem por sua vez aumentar ou reduzir a tensão efetiva aplicada.

As tensões residuais podem ser introduzidas deliberadamente ou de forma acidental durante os diversos processos de fabrico tais como soldagem, tratamentos térmicos, operações de conformação mecânica etc. (Soares, 1998).

Para os casos em análise as tensões residuais adotadas foram as típicas tensões residuais em secções soldadas de aço carbono, considerados constante, toda a espessura dos banzos e da alma, como ilustrado na figura 4.2 (Gardner, 2004).

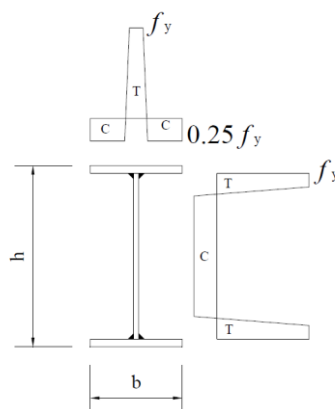


Figura 4.2- Tensões residuais em I – perfis soldados (C – compressão, T – tração) (Gardner, 2004)

4.2. Resistência da secção em aço carbono

4.2.1. Fogo 4 lados

Foi calculada a resistência mecânica com recurso ao programa de cálculo numérico SAFIR, para a secção S1 em aço carbono, sujeita à ação do fogo aplicada em todos os elementos que compõem a secção transversal do elemento viga.

É assim apresentada na tabela seguinte a resistência mecânica em função do aumento da temperatura para as respetivas secções e gráfico ilustrativo.

Tabela 4.1- Valores do momento resistente M_{rd} em função da temperatura para várias secções calculados a partir do SAFIR

Temperatura do aço θ_a [°C]	Momento Resistente M_{rd} [KN.m] Safir
100	354.33
200	353.92
300	353.65
400	353.42
500	275.75
600	166.16
700	81.34
800	38.85

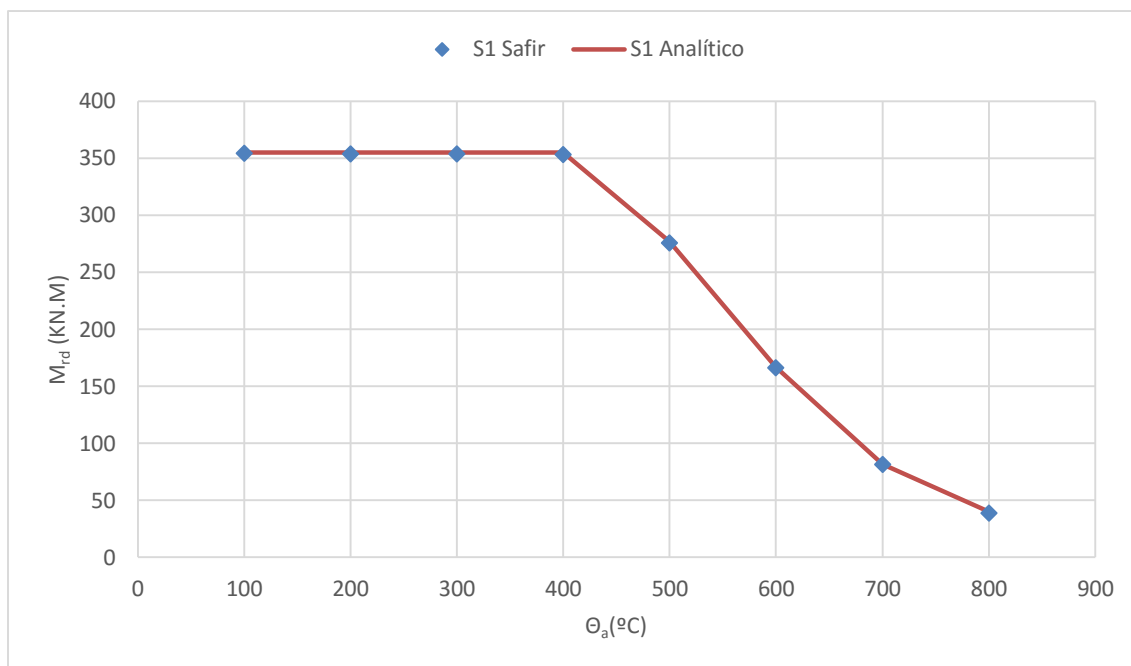


Figura 4.3- Resultados numéricos para a secção S1 em aço carbono S235.

Tal como ilustra o gráfico, os valores do momento resistente M_{rd} numérico são coincidentes com os valores do momento resistente determinados analiticamente.

Estes resultados são os esperados devido à lei constitutiva do aço carbono, da qual o cálculo analítico é baseado na NP EN 1993-1-1 (CEN, 2005a) se fundamenta.

A grande utilidade da análise das secções em aço carbono foca-se numa correta calibração do modelo numérico de modo a obter valores concisos e fidedignos. O mesmo serve para o subcapítulo seguinte 4.2.2.

4.2.2. Fogo 1 lado

Neste subcapítulo analogamente ao anterior apresentam-se de seguida na tabela 4.2 e correspondente figura 4.4 os resultados dos valores de resistência mecânica em função da temperatura para elementos sujeitos à ação do fogo no elemento banzo inferior da secção S1, comparativamente com os resultados do cálculo analítico realizado no capítulo 3 desta dissertação.

Tabela 4.2- Valores do momento resistente M_{rd} em função da temperatura para várias secções calculadas a partir do SAFIR

Temperatura do aço θ_a [°C]	Momento Resistente M_{rd} [KN.m] Safir
100	354.33
200	353.36
300	353.36
400	353.37
500	305.70
600	211.30
700	136.42
800	98.77

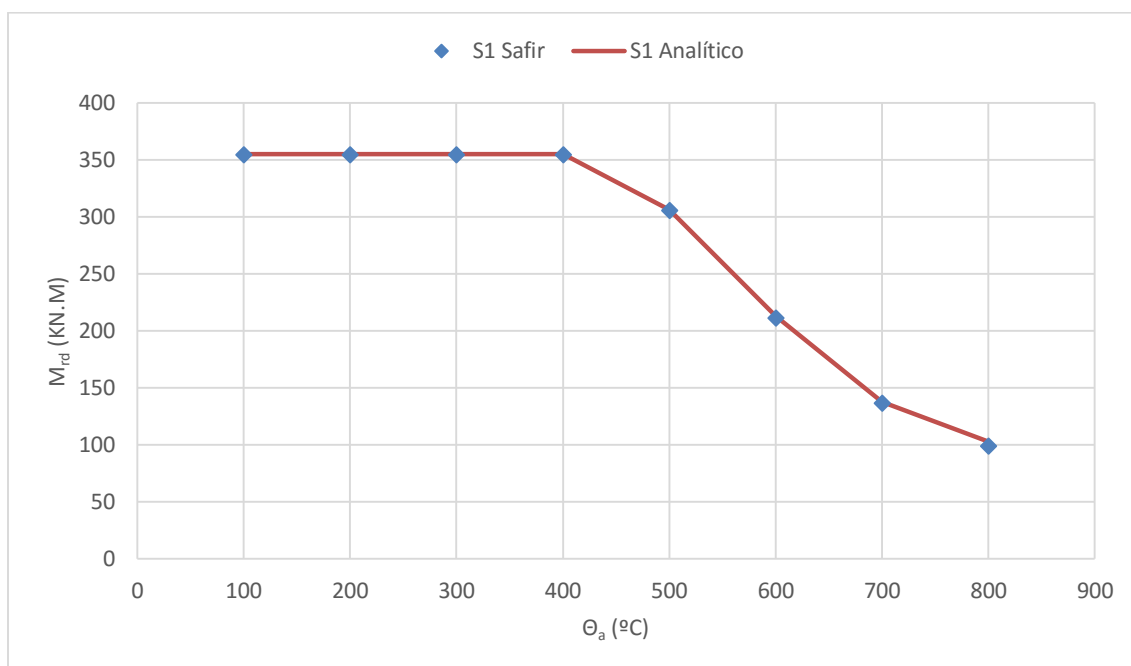


Figura 4.4- Resultados numéricos para a secção S1 em aço carbono S235

Como concluído na secção anterior os resultados do cálculo analítico correspondem aos valores obtidos a partir do cálculo determinado pelo programa SAFIR.

4.2.3. Comparação com Estado Transitório “Trasient State”

A análise de 4.2.1. e 4.2.2. consistem na aplicação de um aumento da carga para uma determinada temperatura constante até à ocorrência do colapso. De modo a comparar e de certa forma, confirmar a exatidão do cálculo efetuado nos pontos enunciados, a forma de cálculo abordada neste ponto, consiste no inverso calculado do anterior, onde para uma carga de colapso correspondente a uma dada temperatura, o elemento viga é sujeito a esse valor de carregamento num estado inicial de temperatura ambiente (20 °C) e gradualmente será aumentado esse valor de temperatura segundo a curva ISO 834-1:1999 até que ocorra o colapso

Para estes casos, após o colapso, as temperaturas nas fibras são variáveis, onde aos valores são apresentados com recurso ao valor do cálculo de resistência dos pontos 4.2.1 e 4.2.2 e com os valores comparativos para a fibra de maior e menor temperatura, de modo a ilustrar uma área de influência onde o primeiro deverá se encontrar no intervalo destes valores, por forma a confirmar a plausibilidade dos resultados deste ponto.

4.2.3.1. Estado Transitório 4 lados expostos ao fogo

Apresenta-se em seguida os valores para a secção em aço carbono S1 exposta a 4 lados à ação do fogo.

Tabela 4.3- Valores de temperatura das fibras da secção S1 e momento resistente M_{rd} correspondente.

Temperatura do aço θ_a [°C]	Temperatura mínima “Trasient State” [°C]	Temperatura máxima “Trasient State” [°C]	Momento Resistente da secção M_{rd} [KN.m]
400	285.60	376.60	353.42
500	475.40	568.20	275.75
600	564.60	644.60	166.16
700	687.80	730.00	81.34
800	781.60	832.30	38.85

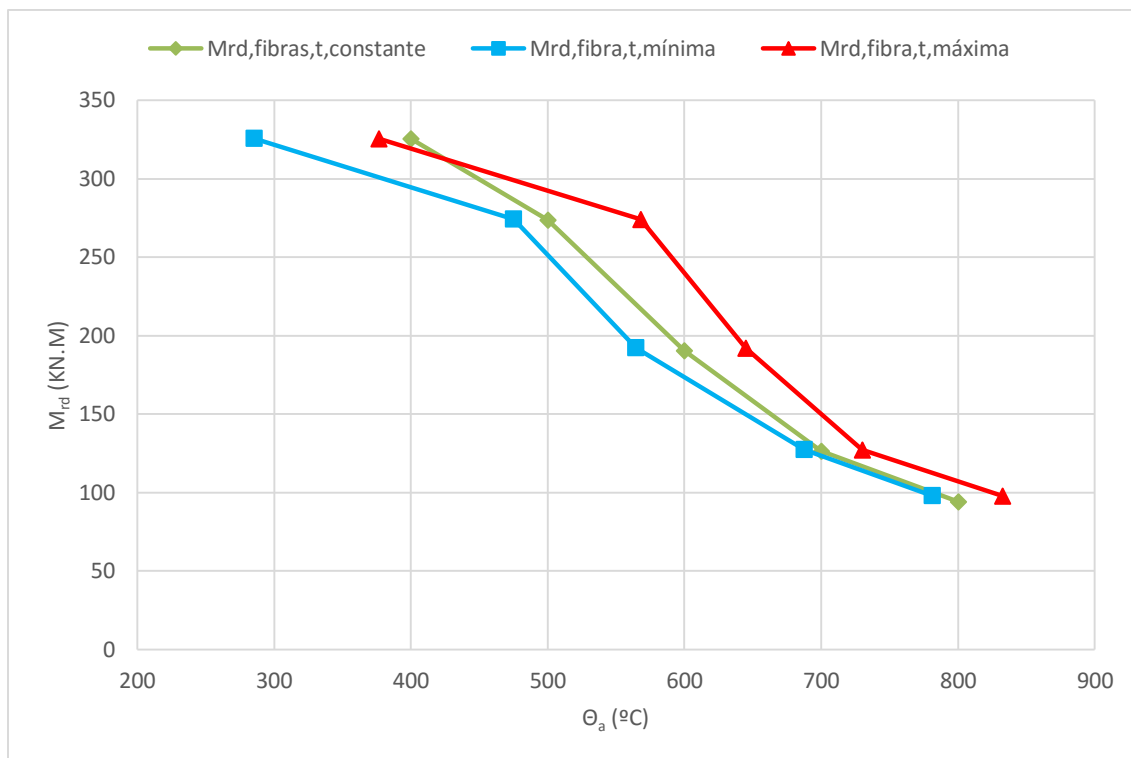


Figura 4.5- Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S1 em aço carbono S235.

Para as restantes secções em análise, os valores apresentam-se em anexo.

Os resultados apresentados, demonstram como esperado, a curva correspondente à situação das fibras de temperatura uniforme ao longo do elemento, entre as curvas correspondentes ao estado transitório de maior e menor temperatura, onde para a fibra com maior temperatura se traduz, uma maior resistência do que para o caso da temperatura uniforme em todo o elemento. É realmente o esperado, pois as fibras do primeiro, encontram-se na sua maioria a temperaturas em média abaixo da temperatura da sua fibra de maior temperatura, o que traduz consequentemente uma maior resistência mecânica. De forma a validar esta afirmação, como referido anteriormente e comprovado pelos resultados obtidos, a curva da fibra de temperatura mínima situa-se abaixo da curva de temperatura uniforme, onde similarmente à curva de maior temperatura, a média de temperaturas das fibras é superior, o que traduz neste caso uma menor resistência mecânica.

4.2.3.2. Estado Transitório 1 lado exposto ao fogo

Analogamente ao ponto anterior apresenta-se de seguida os valores do momento resistente M_{rd} e temperaturas das fibras correspondentes a cada caso para a secção S1 e exposição ao fogo em apenas 1 lado da secção (banzo inferior do perfil).

Tabela 4.4- Valores de temperatura das fibras da secção S1 e momento resistente M_{rd} correspondente.

Temperatura do aço θ_a [°C]	Temperatura mínima “Trasient State” [°C]	Temperatura máxima “Trasient State” [°C]	Momento Resistente da secção M_{rd} [KN.m]
400	30.50	40.80	354.37
500	399.30	533.10	305.70
600	503.30	637.50	211.30
700	613.40	727.20	136.42
800	698.30	806.60	98.77

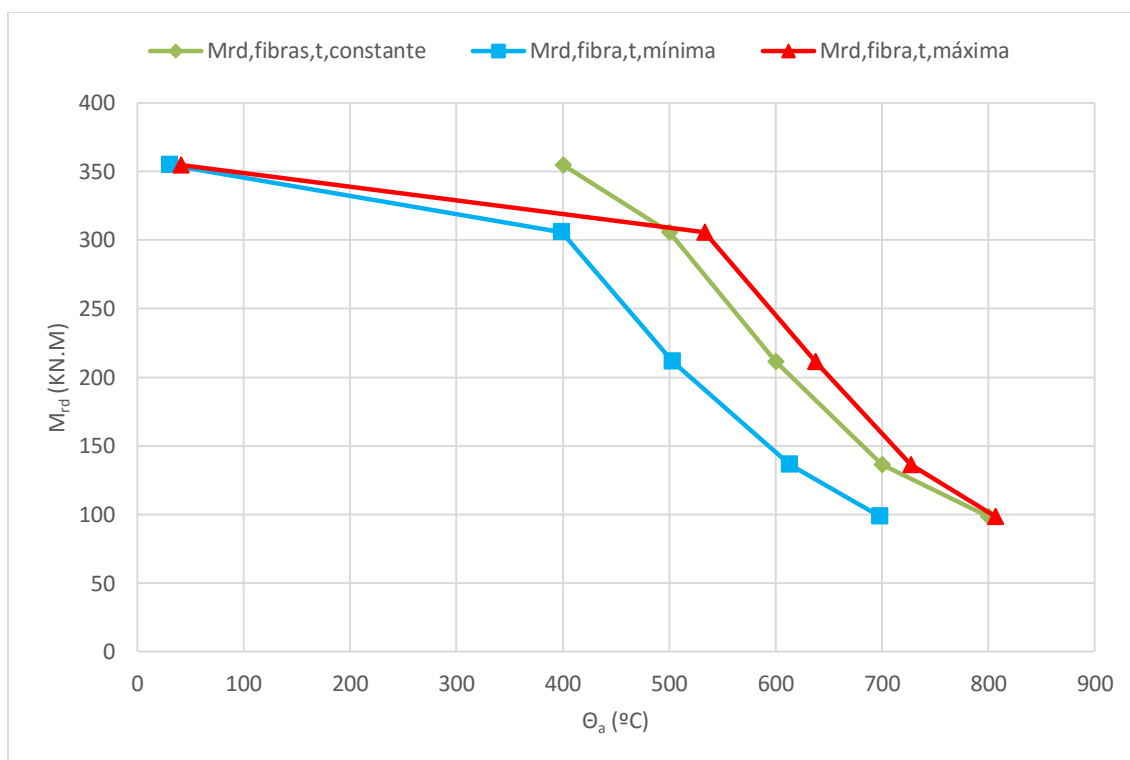


Figura 4.6- Resultados Estado Transitório vs Carregamento com temperatura constante para a S1 em aço carbono S235.

A conclusão chegada neste ponto é similar à enunciada no ponto 4.2.3.1, onde a variação das exposições, reflete como diferença, o aumento da resistência mecânica apenas. Para este ponto é notório também uma grande diferença nos valores apresentados para a temperatura de fibras a 400°C. Estes valores podem não ser reais tal como acontece em todas as temperaturas inferiores a esta, onde a explicação é proveniente do facto de os valores de $k_{y,\theta}$ do aço carbono serem constantes até estas temperaturas o que traduz uma resistência constante tanto a 400°C como à temperatura ambiente (20°C). A partir dos 500°C o comportamento já é o esperado, devido à variação da resistência do aço carbono.

4.3. Resistência de vigas com encurvadura lateral

Para a análise à encurvadura lateral, foram feitos testes numéricos para diferentes temperaturas e diferentes comprimentos de elemento viga.

De modo a verificar o fenómeno da encurvadura lateral foi escolhida a secção S2 para a análise, onde o motivo da opção focou-se na sua geometria, por se tratar de uma secção bissimétrica com uma largura de banzo inferior mais reduzida relativamente ao da secção S1.

Apresentam-se na tabela 4.5 e figura 4.7, os valores relativos à esbelteza normalizada e gráfico de comparação de valores numéricos com analíticos para 400°C.

Tabela 4.5- Valores referentes à encurvadura lateral para a secção S2 em aço carbono S235.

L (m)	M_{c_r} [KN.m]	M_{r_d} [KN.m]	$\bar{\lambda}$	χ	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\chi_{LT,fi}$
1	23537.29	358.19	0.123	0.999	0.146	0.911
3	3469.29	317.10	0.319	0.897	0.381	0.781
5	1704.93	296.64	0.455	0.839	0.544	0.692
7	1132.51	277.58	0.559	0.785	0.668	0.624
9	852.04	264.60	0.644	0.749	0.770	0.570
11	684.89	255.41	0.718	0.723	0.859	0.524
13	573.48	247.30	0.785	0.700	0.938	0.485
15	493.70	242.30	0.846	0.686	1.011	0.451

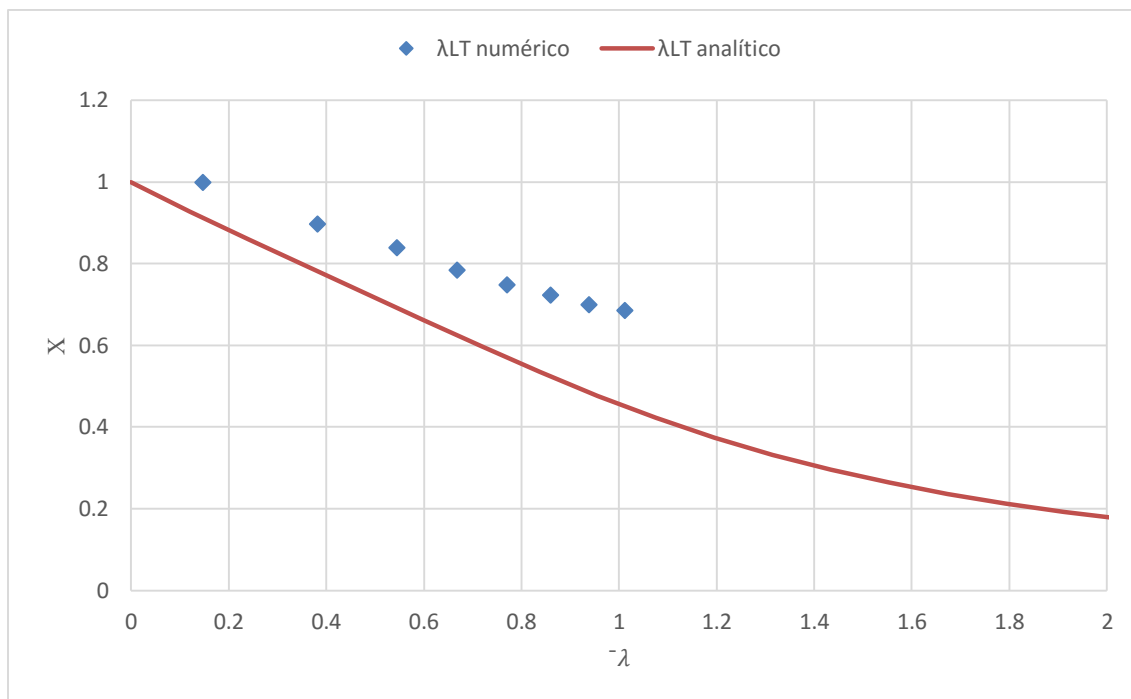


Figura 4.7- Resultados encurvadura lateral para 400°C, numérico e analítico para secção S2 aço carbono S235.

Observando os resultados, mesmo para comprimentos de 15 metros de vão, o valor da esbelteza normalizada $\bar{\lambda}$ é baixo a par do valor do coeficiente de redução χ o que coloca dúvidas da ocorrência deste fenómeno.

Como já referido, a encurvadura lateral é um fenómeno que ocorre em peças esbeltas, proporcionado por a ocorrência de encurvadura local na alma do perfil transversal. Para este caso específico, onde a altura do perfil é reduzida comparativamente com a sua largura, dúvidas da ocorrência deste fenómeno são colocadas em causa, onde de modo a comprovar de certa forma a ocorrência ou não, foram testados também dois perfis similares em dimensões, mas com propriedades geométricas completamente distintas face a este problema. Foi escolhido então um tubular quadrado de dimensões 260x260 (mm) e um IPE 240, onde o primeiro, teoricamente não apresentará problemas de ocorrência de encurvadura lateral, e o segundo, teoricamente também, terá problemas de ocorrência deste fenómeno.

Apresenta-se na figura 4.8, a ilustração dos perfis transversais auxiliares à análise.



Figura 4.8- Perfis transversais, a) tubular 260x260, b) IPE 240.

Apresenta-se de seguida o gráfico com os valores dos coeficientes de redução χ numérico, para os 3 perfis transversais, em função do comprimento, de modo a comparar a curva do perfil da secção S2 com as curvas dos perfis sem e com encurvadura lateral, tubular 260x260 e IPE 240 respetivamente.

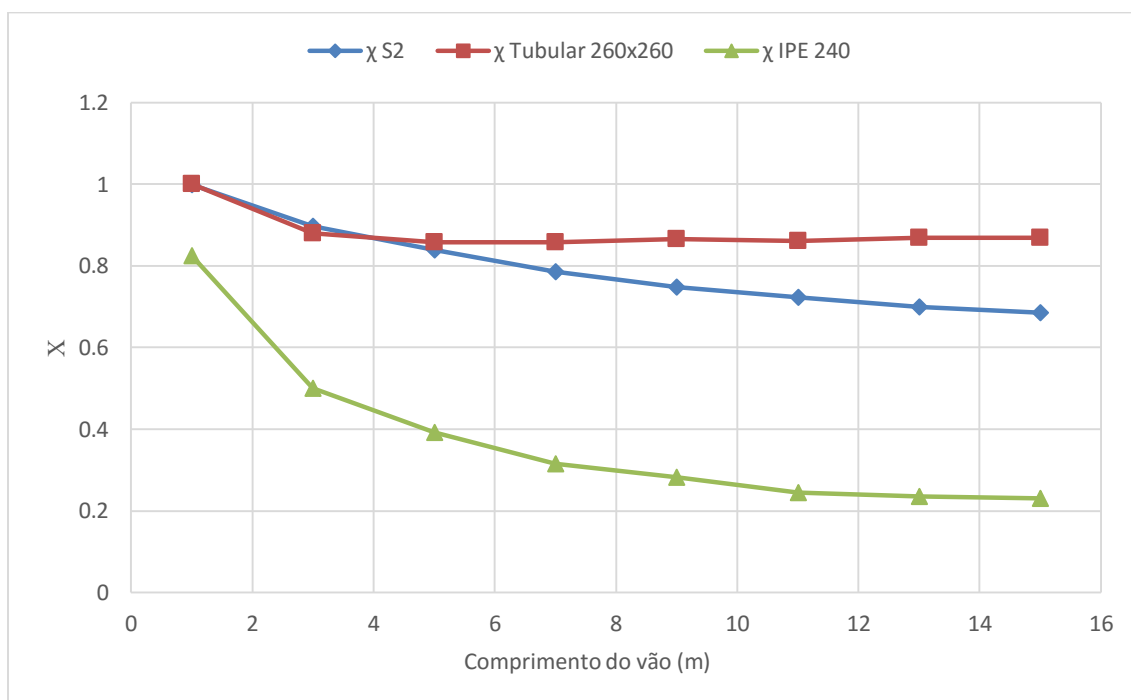


Figura 4.9- Valores numéricos de coeficiente de redução χ em função do vão do elemento viga.

Como se pode observar a partir do figura 4.9, os valores obtidos da secção S2 aproximam-se dos resultados do perfil tubular quadrado que não sofre de encurvadura lateral, o que traduz a não ocorrência deste fenómeno também para esta secção.

Apresentam-se de seguida os gráficos do deslocamento vertical do nó a meio vão, obtidos do SAFIR para o comprimento de 9 metros do elemento viga, de forma a ilustrar o tipo de rotura dos 3 tipos de secção enunciados.

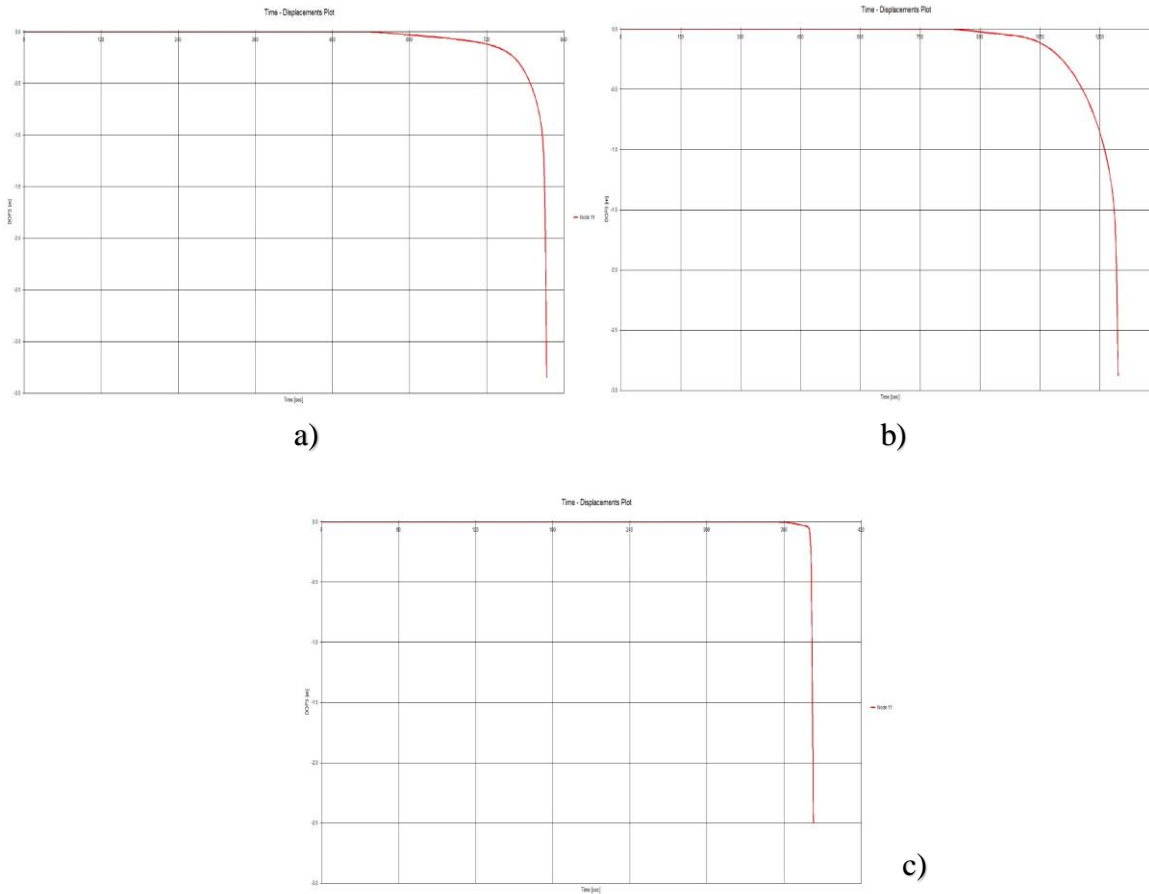


Figura 4.10- Gráficos de deslocamento vertical do nó a meio vão, gráfico a) S2, gráfico b) tubular 260x260, gráfico c) IPE 240.

Como se pode observar na figura 4.10, a rotura dada para o perfil IPE 240 é uma rotura frágil, sem aumento do carregamento, proporcionado pelo fenómeno da encurvadura lateral, fato que não é observado nos outros dois gráficos correspondentes às secções S2 e tubular quadrada.

A geometria da secção é fator condicionante, desta maneira para as secções em análise este fenómeno é inexistente, apresenta-se nesta dissertação no ponto 5.3 a análise à encurvadura lateral para um perfil IPE 240 híbrido.

CAPÍTULO 5. RESISTÊNCIA À FLEXÃO
DE SECCÕES MONOSSIMÉTRICAS
HÍBRIDAS

5 Resistência à flexão de secções monossimétricas híbridas

5.1 Considerações gerais

5.2 Resistência da secção

5.2.1 Fogo 4 lados

5.2.2 Fogo 1 lado

5.2.3 Comparação com estado transitório

5.3 Resistência de vigas híbridas com encurvadura lateral

5. Resistência à flexão de secções monossimétricas híbridas

5.1. Considerações gerais

De modo a estudar as secções híbridas, apresentam-se neste capítulo várias simulações realizadas com recurso ao programa de cálculo automático SAFIR e comparados com o cálculo analítico segundo as normas europeias (CEN, 2005a) e (CEN, 2005b).

No caso de vigas híbridas serem o principal estudo desta dissertação, as simulações realizaram-se uma vez mais para as 4 secções já descritas, mas também para 3 tipos de aço inoxidável mais utilizados, sendo eles os aços inoxidáveis 1.4301, 1.4001 e 1.4462, sendo estes aços de tipo austenítico, ferrítico e austenítico-ferrítico respetivamente. Também uma observação à influência da dilatação térmica é analisada neste capítulo de forma a perceber a sua influência na resistência mecânica.

5.2. Resistência da secção

Apresentam-se nas secções 5.2.1. e 5.2.2. as tabelas com os valores dos momentos resistentes M_{rd} para a secção S1 híbrida, em função da temperatura. Apresentam-se também os gráficos comparativos com os resultados analíticos da secção 3.3. para as correspondentes exposições ao fogo, 4 lados e 1 lado (banzo inferior em aço inoxidável) e para cada um deste tipo de exposição apresentam-se também valores de resistência para cada um dos 3 tipos de aço inoxidável referidos em 5.1.

Representa-se também um gráfico de comparação de resultados numéricos com e sem a consideração do fenómeno de dilatação térmica dos materiais, de modo a verificar se este fenómeno tem uma grande influência na uniformidade dos dois aços diferentes, e se esse facto reflete uma grande variação da resistência mecânica da secção transversal.

5.2.1. Fogo 4 lados

Para uma exposição de 4 lados ao fogo, apresenta-se nas tabelas seguintes, para a secção S1 constituída pelos aços austenítico 1.4301, ferrítico 1.4003 e austenítico-ferrítico 1.4462, os correspondentes valores dos momentos resistentes M_{rd} em função da temperatura para os casos de com e sem dilatação térmica. Estes resultados estão identificados como “CDT” e “SDT” respetivamente, e os consequentes gráficos comparativos com os valores de resistência do cálculo analítico.

Tabela 5.1- Valores do momento resistente M_{rd} para a S1 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável austenítico 1.4301.

Temperatura do aço θ_a [°C]	M_{rd} [KN.m] SAFIR CDT	M_{rd} [KN.m] SAFIR SDT	M_{rd} [KN.m] Analítico
100	391.13	391.1	358.01
200	381.92	381.75	315.66
300	377.85	377.53	303.69
400	375.17	374.7	294.46
500	301.62	301.34	254.96
600	185.29	185.34	182.7
700	93.28	93.29	92.26
800	45.58	45.64	46.37

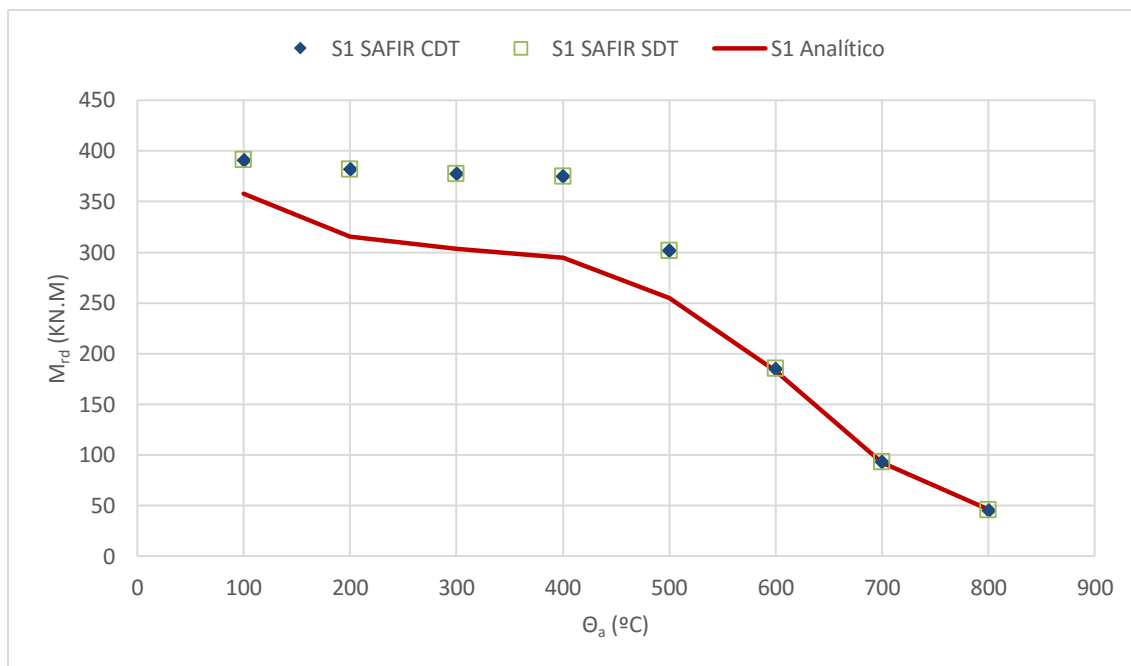


Figura 5.1- Resultados numéricos para secção S1 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável austenítico 1.4301.

Tabela 5.2- Valores do momento resistente M_{rd} para a S1 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável ferrítico 1.4003.

Temperatura do aço θ_a [°C]	M_{rd} [KN.m] SAFIR CDT	M_{rd} [KN.m] SAFIR SDT	M_{rd} [KN.m] Analítico
100	391.13	391.09	397.91
200	380.82	380.66	396.11
300	375.95	375.54	394.53
400	372.55	371.96	391.89
500	299.59	301.20	312.06
600	186.34	186.27	186.92
700	94.11	94.14	90.92
800	46.15	46.22	44.33

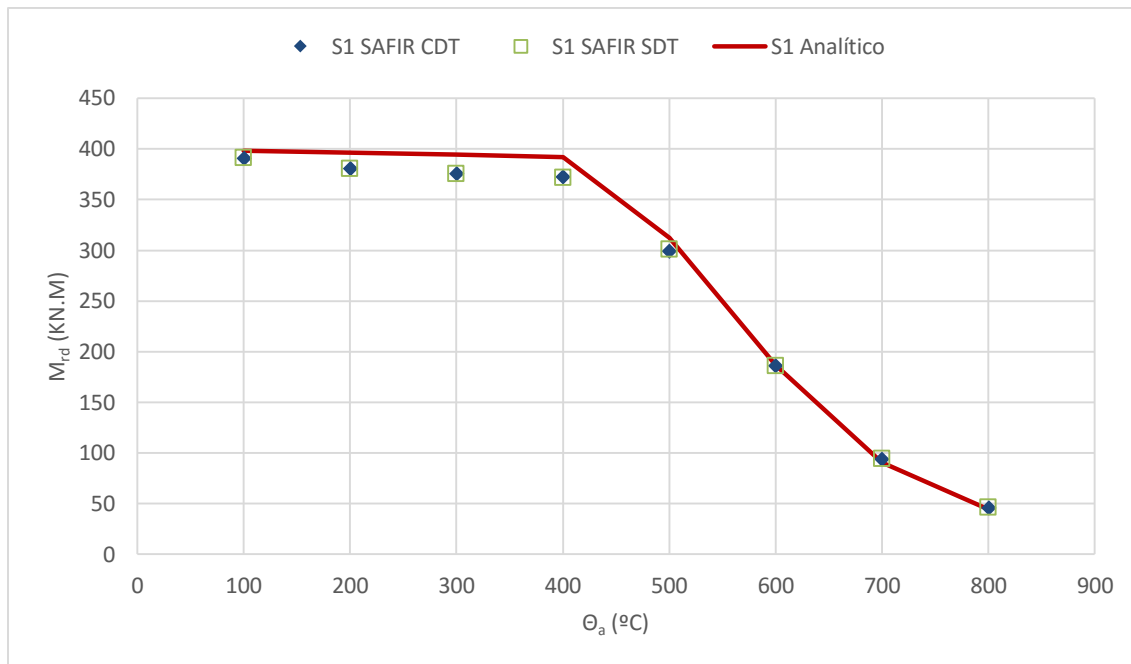


Figura 5.2- Resultados numéricos para seção S1 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável ferrítico 1.4003.

Tabela 5.3- Valores do momento resistente M_{rd} para a S1 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462.

Temperatura do aço θ_a [°C]	M_{rd} [KN.m] SAFIR CDT	M_{rd} [KN.m] SAFIR SDT	M_{rd} [KN.m] Analítico
100	400.99	400.66	408.42
200	397.76	397.91	405.42
300	395.30	395.73	404.08
400	393.70	393.32	403.16
500	309.10	309.78	317.02
600	189.69	191.63	195.14
700	97.03	97.42	97.87
800	49.21	49.22	48.80

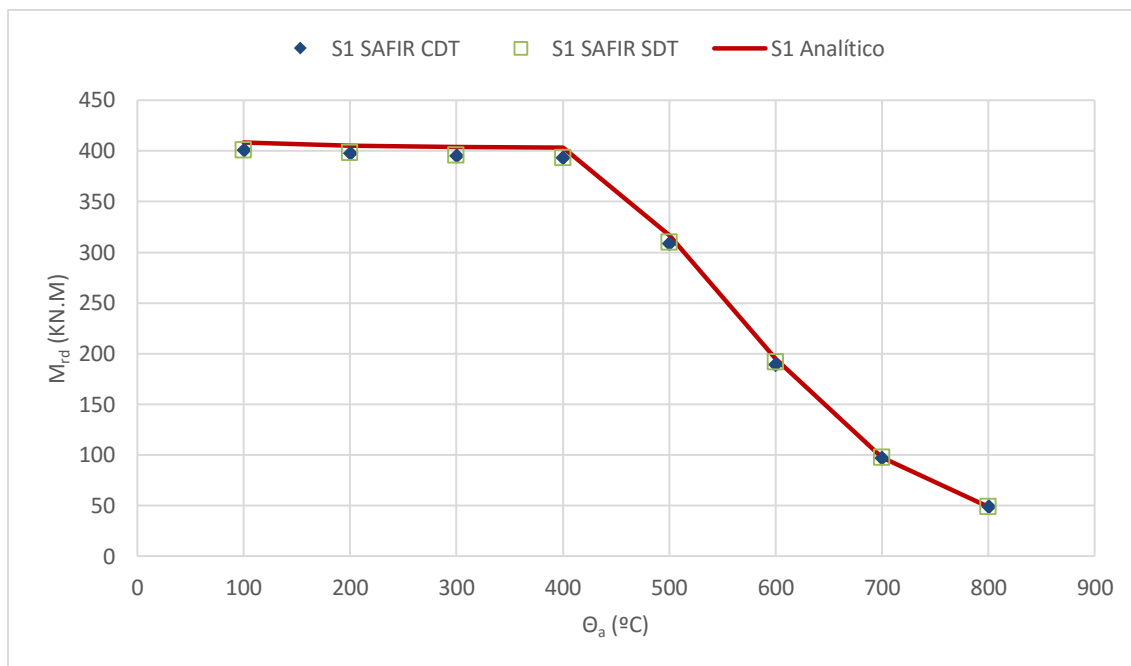


Figura 5.3- Resultados numéricos para secção S1 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462.

De acordo com os resultados observa-se para o aço austenítico 1.4301 uma maior resistência mecânica obtida a partir das simulações numéricas relativamente ao cálculo analítico dado pelas normas (CEN, 2005a) (CEN, 2005b) (CEN, 2006a).

Quanto ao aço ferrítico 1.4003 e austenítico-ferrítico 1.4462 a variação já não é significativa.

Quanto ao fenómeno de dilatação térmica, para todos os aços inoxidáveis em estudo, a sua consideração releva-se pouco significativa, de forma a ser desprezável nos pontos que se seguem.

5.2.2. Fogo 1 lado

Para uma exposição de 1 lado ao fogo, apresenta-se nas tabelas seguintes, para a secção S1 constituída pelos aços austenítico 1.4301, ferrítico 1.4003 e austenítico-ferrítico 1.4462, os correspondentes valores dos momentos resistentes M_{rd} em função da temperatura para os casos de com e sem dilatação térmica enunciados no ponto anterior, denominados nos resultados como “CDT” e “SDT” respetivamente, e os consequentes gráficos comparativos com os valores de resistência do cálculo analítico.

Tabela 5.4- Valores do momento resistente M_{rd} para a S1 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável austenítico 1.4301.

Temperatura do aço θ_a [°C]	M_{rd} [KN.m] SAFIR	M_{rd} [KN.m] Analítico
100	391.16	358.01
200	383.20	315.66
300	380.30	303.69
400	378.48	294.46
500	372.25	275.22
600	363.27	260.29
700	336.32	225.77
800	263.43	185.12

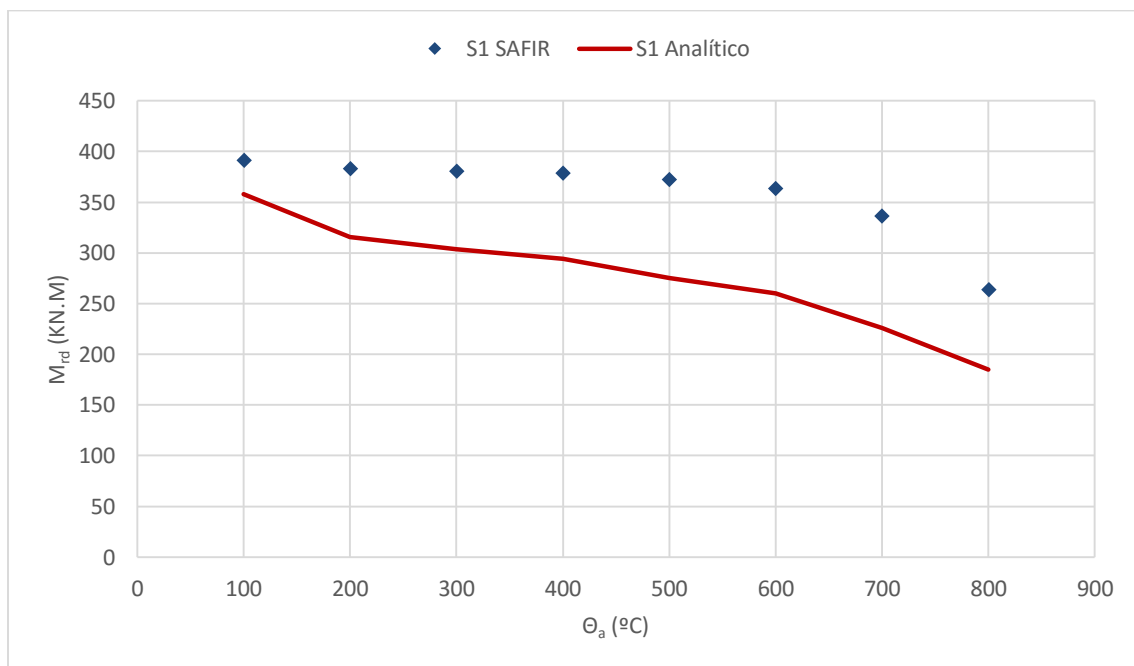


Figura 5.4- Resultados numéricos para secção S1 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável austenítico 1.4301.

Tabela 5.5- Valores do momento resistente M_{rd} para a S1 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável ferrítico 1.4003.

Temperatura do aço θ_a [°C]	M_{rd} [KN.m] SAFIR	M_{rd} [KN.m] Analítico
100	391.25	397.91
200	381.73	396.11
300	377.37	394.53
400	373.75	391.89
500	365.54	382.1
600	354.43	267.09
700	308.18	162.19
800	240.56	125.97

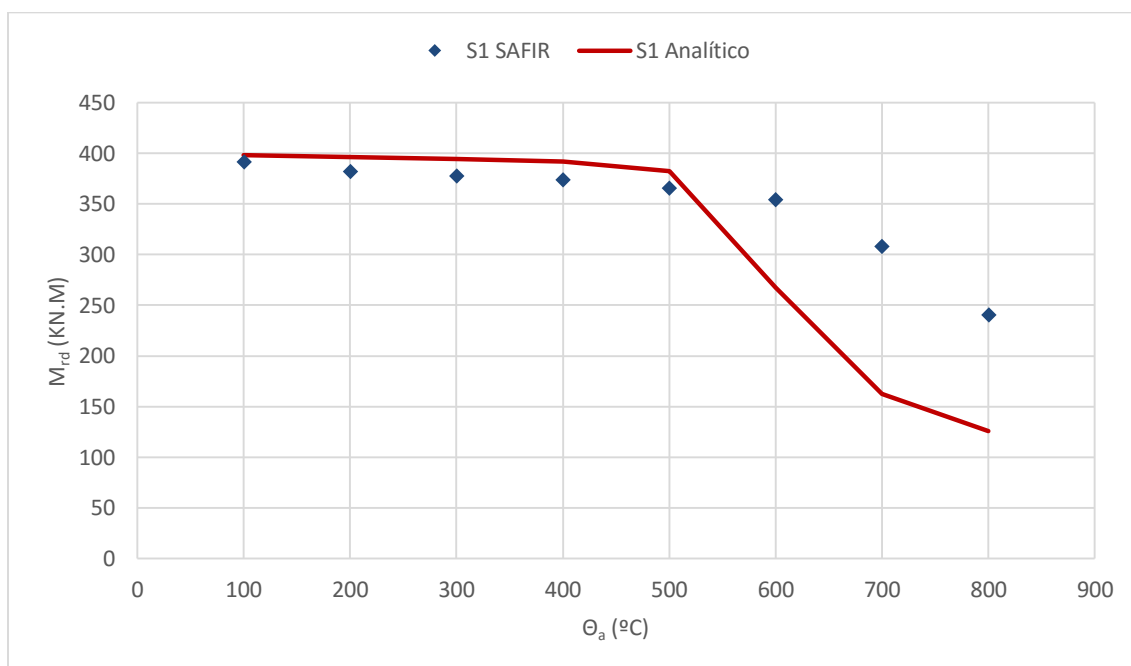


Figura 5.5- Resultados numéricos para secção S1 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável ferrítico 1.4003.

Tabela 5.6- Valores do momento resistente M_{rd} para a S1 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462.

Temperatura do aço θ_a [°C]	M_{rd} [KN.m] SAFIR	M_{rd} [KN.m] Analítico
100	402.83	408.42
200	398.24	405.42
300	397.19	404.08
400	396.2	403.16
500	394.66	400.68
600	392.16	394.31
700	378.7	334.03
800	327.85	269.9

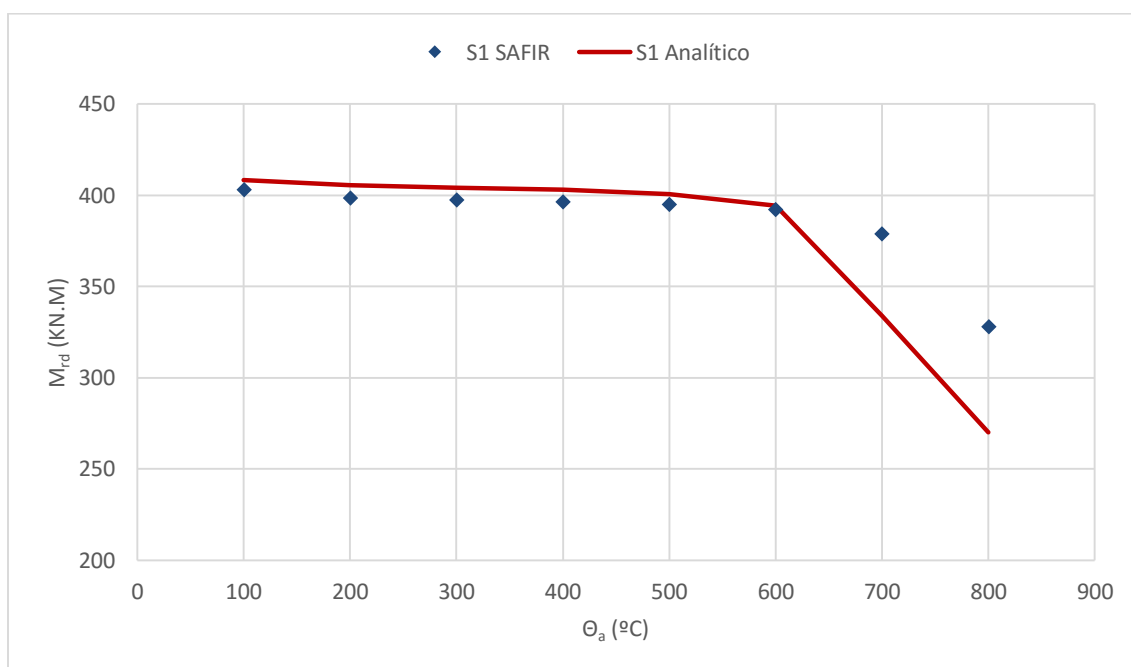


Figura 5.6- Resultados numéricos para secção S1 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462.

De acordo com os resultados observa-se para as 3 classes de aço inoxidável uma maior resistência mecânica obtida a partir das simulações numéricas relativamente ao cálculo analítico dado pelas normas (CEN, 2005a) (CEN, 2005b) (CEN, 2006a).

Para o aço inoxidável austenítico essa diferença é mais acentuada e esse valor superior reflete-se em todas as temperaturas da secção. Para os aços inoxidáveis ferrítico e austenítico- ferrítico esses valores numéricos apresentam-se mais altos para temperaturas mais elevadas, onde a curva de resistência decresce de forma mais suave.

5.2.3. Comparação com estado transitório

A análise das secções 4.2.1. e 4.2.2. consiste num aumento da carga para uma temperatura constante nas fibras da secção até que ocorra o colapso. De modo a comparar e de certa forma, confirmar a exatidão do cálculo efetuado nos pontos enunciados, a forma de cálculo abordada neste ponto, consiste no inverso calculado do anterior. Para uma carga de colapso correspondente a uma dada temperatura, o elemento viga é sujeito a esse valor de carregamento num estado inicial de temperatura ambiente (20 °C) e gradualmente será aumentado esse valor de temperatura segundo a curva ISO 834-1:1999 até que ocorra o colapso. Neste caso, a temperatura nas fibras do elemento neste instante não é constante, embora a variação não seja acentuada para os casos de exposição ao fogo a 4 lados, e no banzo inferior do perfil analogamente, para a exposição ao fogo em 1 lado nesse mesmo elemento banzo da secção em causa.

Para estes casos, após o dado colapso, as temperaturas nas fibras são variáveis, onde a apresentação é então feita com recurso ao valor do cálculo de resistência dos pontos 4.2.1. e 4.2.2. e com os valores comparativos para a fibra de maior e menor temperatura, de modo a ilustrar uma área de influência onde o primeiro deverá se encontrar no intervalo destes valores, por forma a confirmar a plausibilidade dos resultados deste ponto.

5.2.3.1. Estado transitório 4 lados expostos ao fogo

Apresenta-se em seguida os resultados para a secção S1, exposta a 4 lados à ação do fogo, e para as 3 classes de aço inoxidável.

Tabela 5.7- Valores de temperatura das fibras da secção S1 e momento resistente Mrd correspondente para secção com banzo em aço inoxidável austenítico 1.4301.

Temperatura do aço θ_a [°C]	Temperatura mínima “Trasient State” [°C]	Temperatura máxima “Trasient State” [°C]	Momento Resistente da secção M_{rd} [KN.m]
400	260.1	410.1	378.48
500	397.9	560.5	372.25
600	523.5	658.1	363.27
700	669.1	733.2	336.32
800	795.1	838.7	263.43

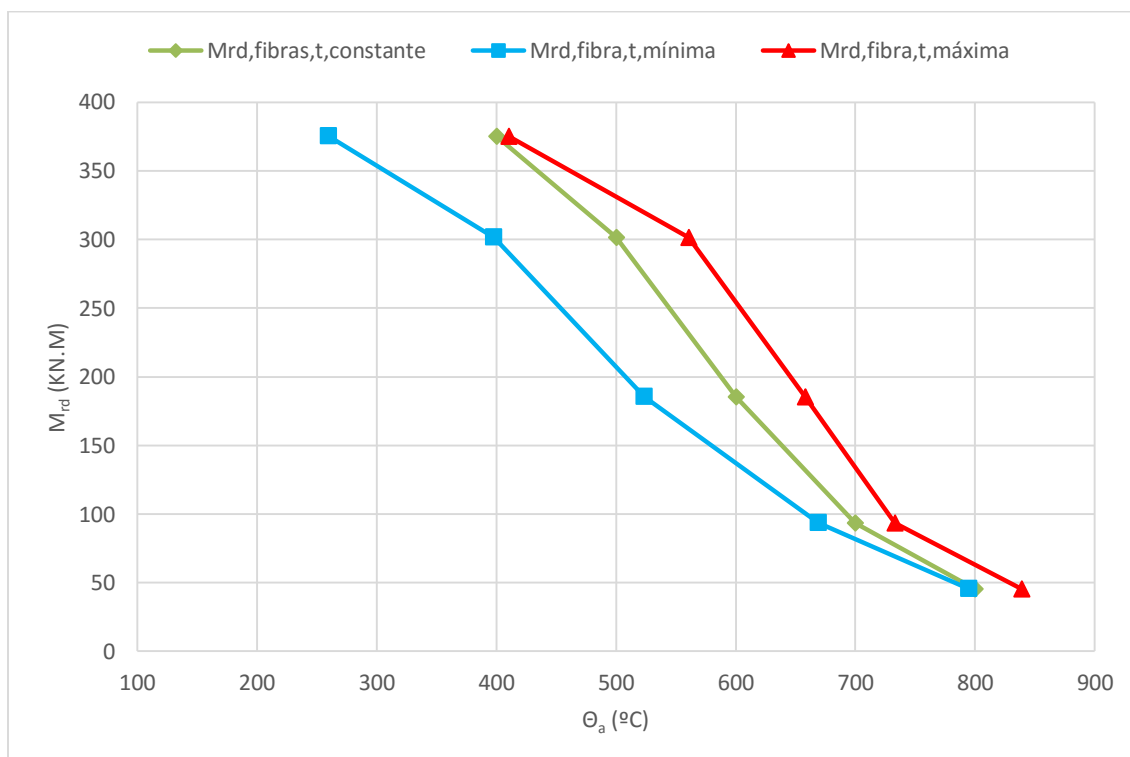


Figura 5.7- Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante, para secção S1 com banzo em aço inoxidável austenítico 1.4301.

Tabela 5.8- Valores de temperatura das fibras da secção S1 e momento resistente M_{rd} correspondente para secção com banzo em aço inoxidável ferrítico 1.4003.

Temperatura do aço θ_a [°C]	Temperatura mínima “Trasient State” [°C]	Temperatura máxima “Trasient State” [°C]	Momento Resistente da secção M_{rd} [KN.m]
400	225.9	371.3	373.75
500	397.9	559.7	365.54
600	522.8	657.3	354.43
700	670.5	733.4	308.18
800	794.3	839.0	240.56

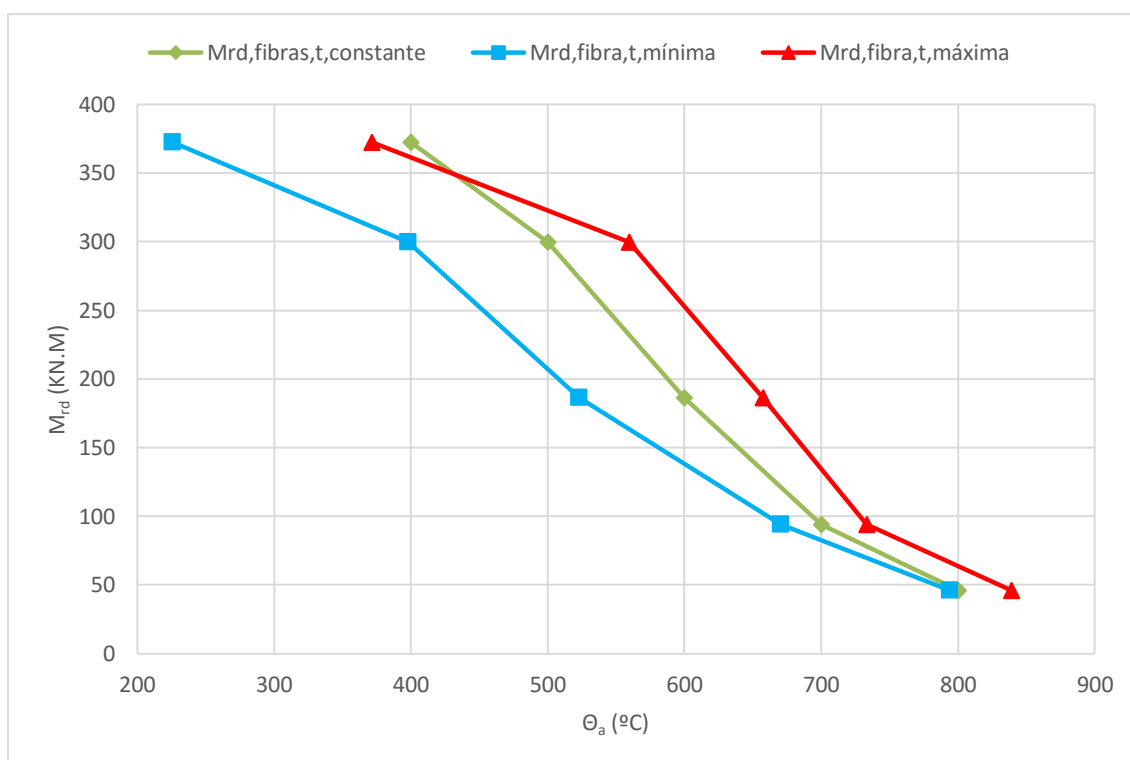


Figura 5.8- Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante, para secção S1 com banzo em aço inoxidável ferrítico 1.4003.

Tabela 5.9- Valores de temperatura das fibras da secção S1 e momento resistente M_{rd} correspondente para secção com banzo em aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462.

Temperatura do aço θ_a [°C]	Temperatura mínima “Trasient State” [°C]	Temperatura máxima “Trasient State” [°C]	Momento Resistente da secção M_{rd} [KN.m]
400	325.7	415.7	396.20
500	404.4	560.5	394.66
600	523.5	657.9	392.16
700	669.2	733.4	378.70
800	781.5	838.7	327.85

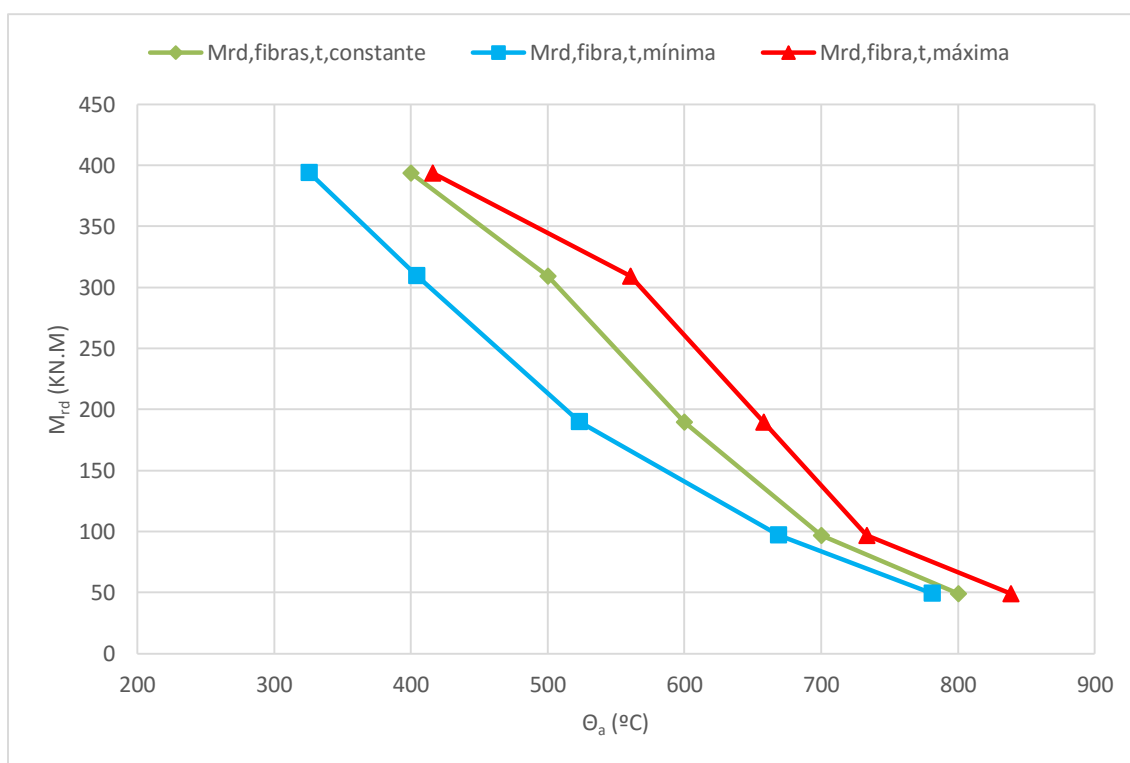


Figura 5.9- Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante, para secção S1 com banzo em aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462.

Para as restantes secções em análise, os valores apresentam-se em anexo.

Os resultados apresentados, demonstram como esperado e similarmente aos resultados do ponto 4.2.3.1, onde a curva correspondente à situação das fibras de temperatura uniforme ao longo do elemento, situa-se entre as curvas correspondentes ao estado transitório de maior e menor temperatura.

5.2.3.2. Estado transitório 1 lado exposto ao fogo

Os resultados para a secção S1, exposta em 1 lado à ação do fogo, e para as 3 classes de aço inoxidável apresentam-se de seguida em tabela e gráficos correspondentes.

Tabela 5.10- Valores de temperatura das fibras da secção S1 e momento resistente M_{rd} correspondente para secção com banzo em aço inoxidável austenítico 1.4301.

Temperatura do aço θ_a [°C]	Temperatura mínima “Trasient State” [°C]	Temperatura máxima “Trasient State” [°C]	Momento Resistente da secção M_{rd} [KN.m]
400	148.8	271.0	378.48
500	314.8	499.2	372.25
600	437.9	602.3	363.27
700	568.4	743.9	336.32
800	702.0	828.9	263.43

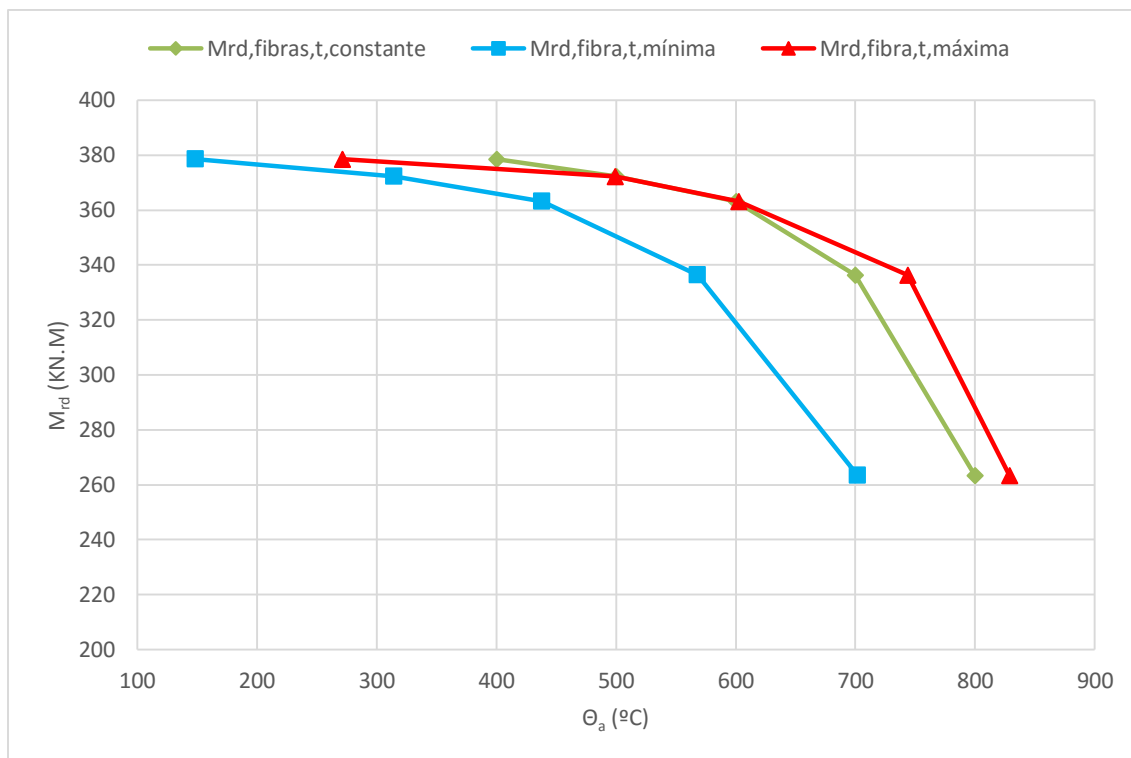


Figura 5.10- Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante, para secção S1 com banzo em aço inoxidável austenítico 1.4301.

Tabela 5.11- Valores de temperatura das fibras da secção S1 e momento resistente M_{rd} correspondente para secção com banzo em aço inoxidável ferrítico 1.4003.

Temperatura do aço θ_a [°C]	Temperatura mínima “Trasient State” [°C]	Temperatura máxima “Trasient State” [°C]	Momento Resistente da secção M_{rd} [KN.m]
400	242.3	407.5	373.75
500	362.5	553.7	365.54
600	453	645.2	354.43
700	600.4	767	308.18
800	699	835.6	240.56

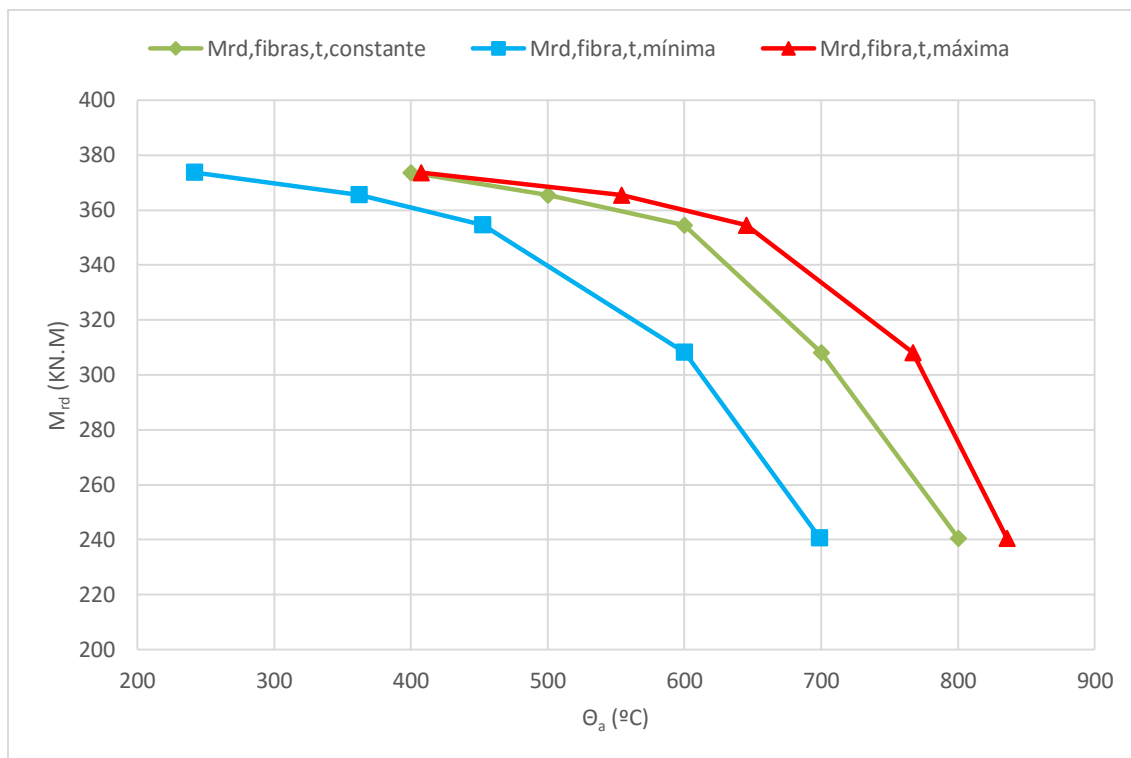


Figura 5.11- Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante, para secção S1 com banzo em aço inoxidável ferrítico 1.4003.

Tabela 5.12- Valores de temperatura das fibras da secção S1 e momento resistente Mrd correspondente para secção com banzo em aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462.

Temperatura do aço θ_a [°C]	Temperatura mínima “Trasient State” [°C]	Temperatura máxima “Trasient State” [°C]	Momento Resistente da secção M_{rd} [KN.m]
400	266.9	407.5	396.2
500	338.7	527.1	394.66
600	478.8	645.2	392.16
700	608.4	742.9	378.7
800	714.6	828.9	327.85

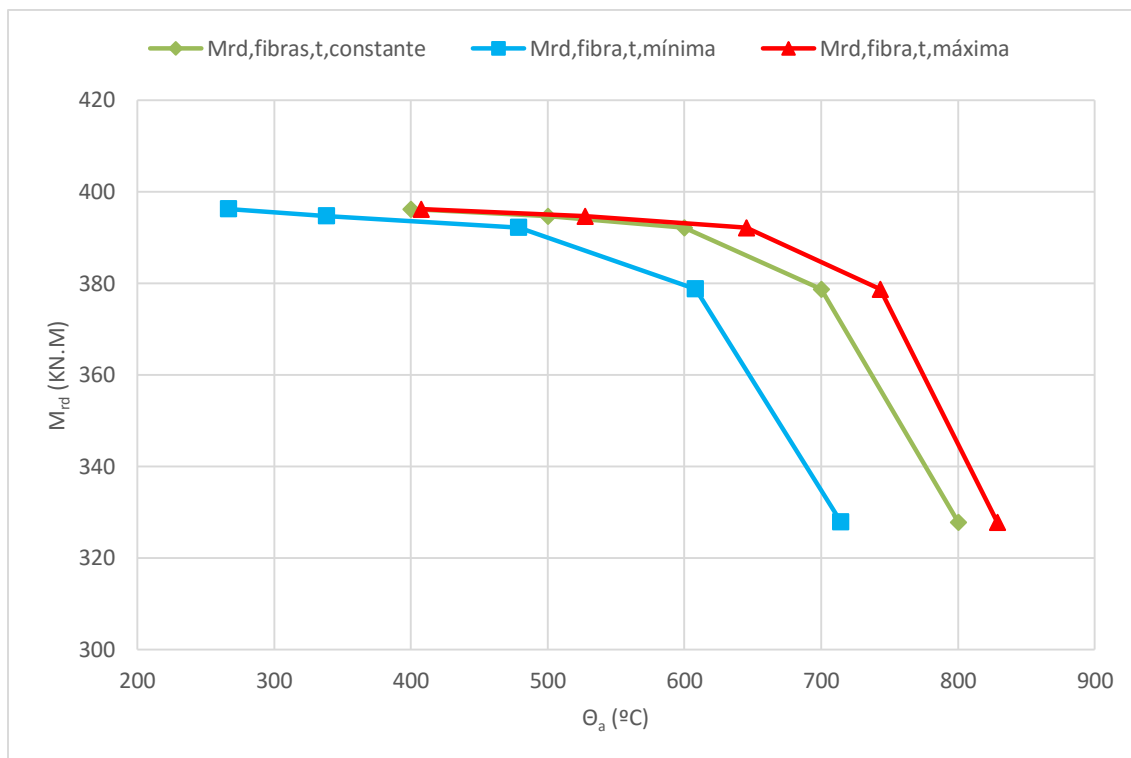


Figura 5.12- Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante, para secção S1 com banzo em aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462.

Para as restantes secções em análise, os valores apresentam-se em anexo.

Os resultados apresentados, demonstram como esperado e similarmente aos resultados do ponto 4.2.3.1, onde a curva correspondente à situação das fibras de temperatura uniforme ao longo do elemento, situa-se entre as curvas correspondentes ao estado transitório de maior e menor temperatura.

5.3. Resistência de vigas híbridas com encurvadura lateral

Como referido no ponto 4.3 as secções transversais S1, S2, S3 e S4 não apresentam o fenómeno da encurvadura lateral.

De modo a estudar-se na presente dissertação este fenómeno, apresenta-se um perfil IPE 240 híbrido, tal como ilustra a figura 5.13, com banzos em aço inoxidável austenítico

1.4301 e alma em aço carbono da classe S235, onde neste ponto, se estudará a encurvadura lateral em situação de incêndio, para a secção transversal exposta aos 4 lados ao fogo.

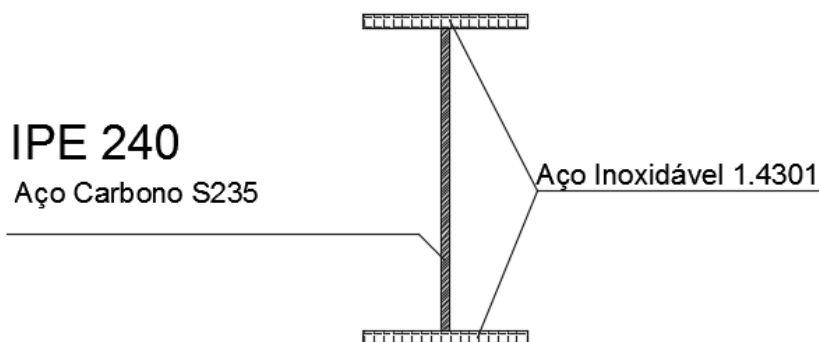


Figura 5.13- Perfil IPE 240 híbrido.

Apresentam-se de seguida na tabela 5.13 e gráficos 5.14, 5.15, 5.16 e 5.17 os valores da esbelteza normalizada ao fogo $\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ em função dos valores do coeficiente de redução χ , provenientes do cálculo numérico, comparados com os valores do cálculo analítico (CEN, 2005b), para temperaturas de secção entre os 400 °C e os 700 °C.

Tabela 5.13- Valores referentes à encurvadura lateral para a secção IPE 240 híbrido, para 400 °C de temperatura.

L (m)	χ	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\chi_{LT,fi}$
1	0.777	0.330	0.810
3	0.457	0.865	0.520
5	0.320	1.240	0.358
7	0.260	1.526	0.271
9	0.245	1.761	0.219
11	0.221	1.966	0.184
13	0.220	2.149	0.159
15	0.205	2.317	0.140

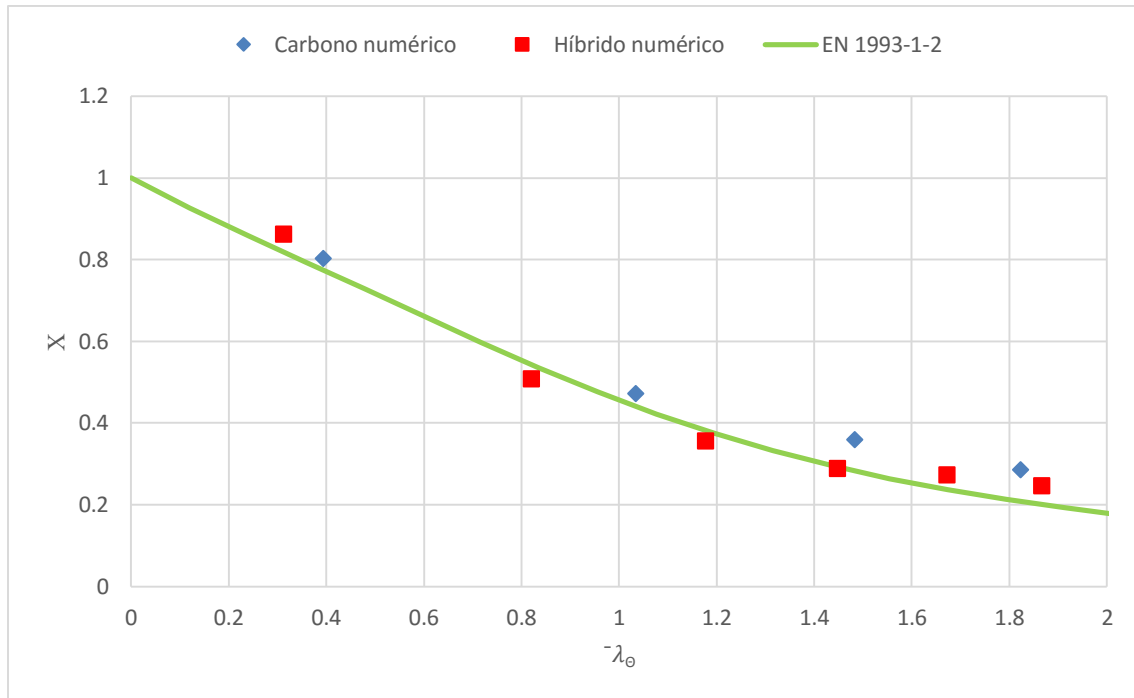


Figura 5.14- Resultados encurvadura lateral para 400 °C, numérico e analítico para secção IPE 240 híbrida vs IPE 240 aço carbono S235.

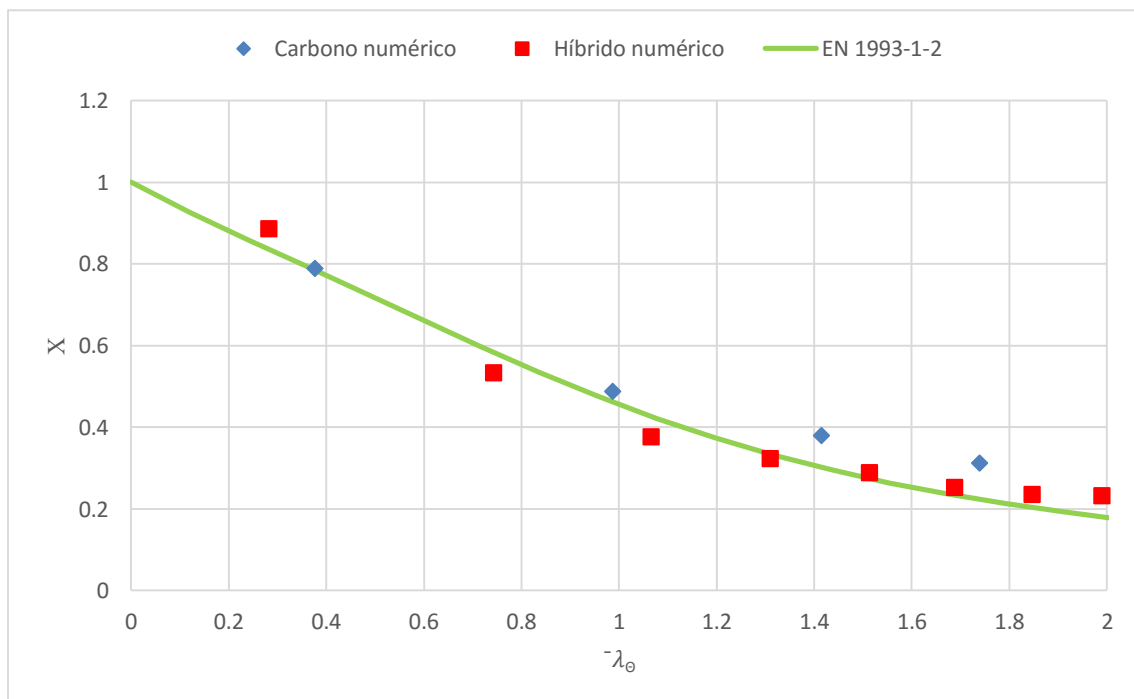


Figura 5.15- Resultados encurvadura lateral para 500 °C, numérico e analítico para secção IPE 240 híbrida vs IPE 240 aço carbono S235.

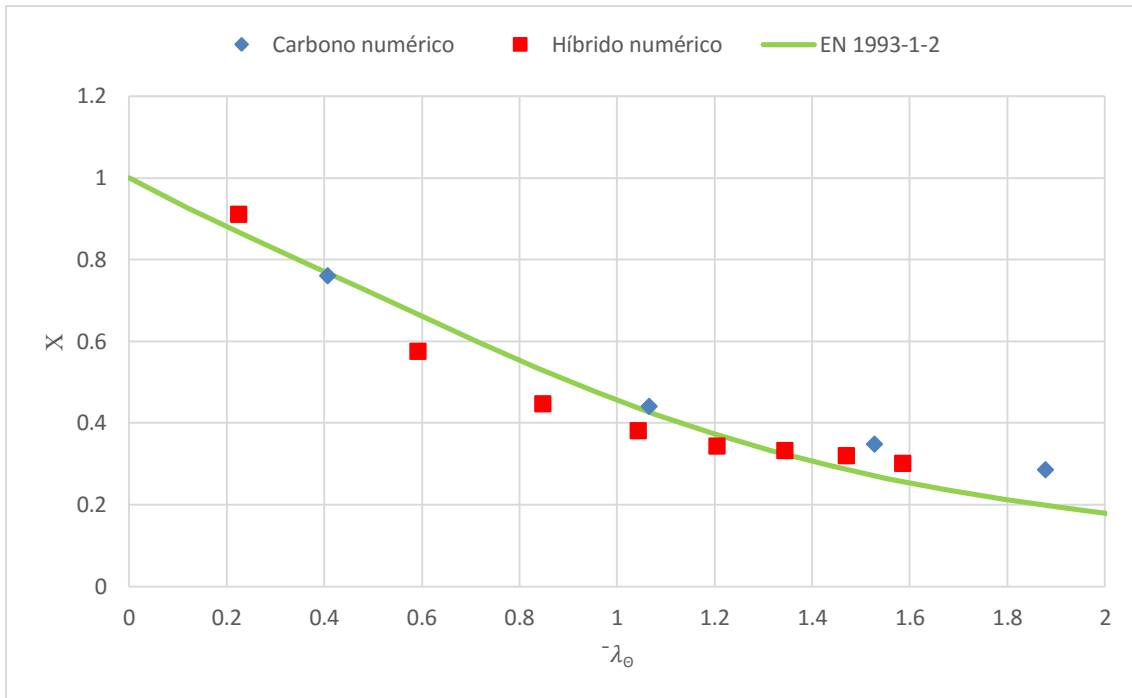


Figura 5.16- Resultados encurvadura lateral para 600 °C, numérico e analítico para secção IPE 240 híbrida vs IPE 240 aço carbono S235.

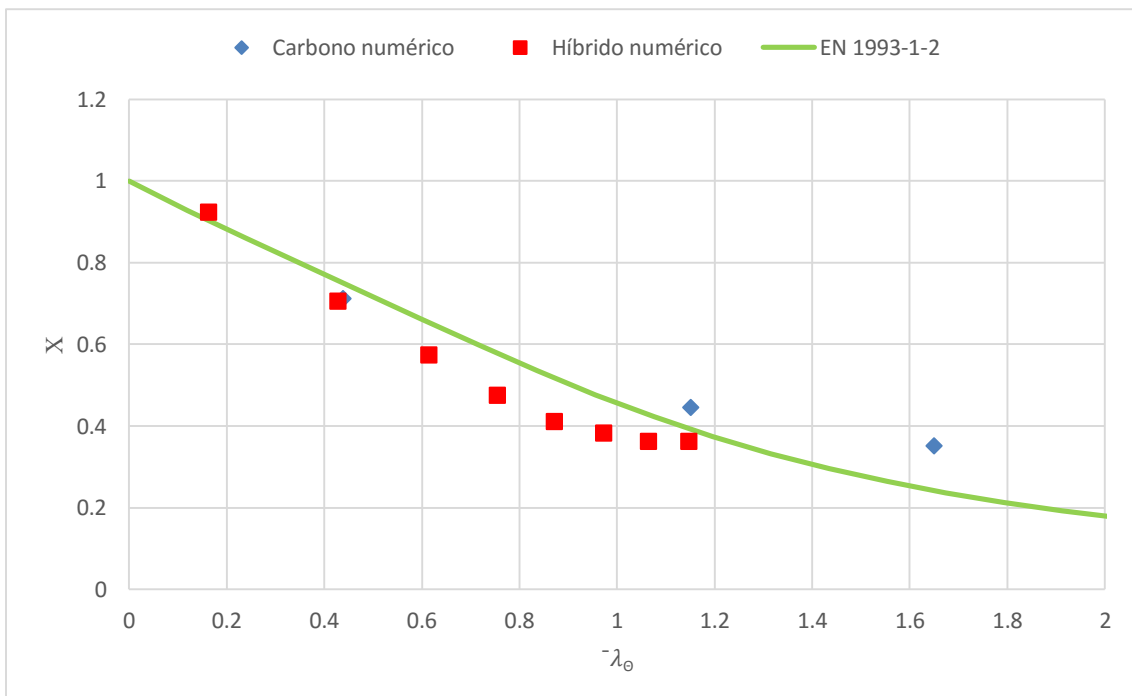


Figura 5.17- Resultados encurvadura lateral para 700 °C, numérico e analítico para secção IPE 240 híbrida vs IPE 240 aço carbono S235.

A partir dos resultados obtidos, e como observado também no ponto 4.3, tanto a secção composta exclusivamente por aço carbono, como a secção híbrida, sofrem de encurvadura lateral.

Para o mesmo intervalo de temperatura, observa-se um decréscimo mais suave por parte da secção híbrida comparativamente com a secção em aço carbono, sobretudo para comprimentos de vão superiores, embora os resultados estejam muito equiparados qualquer que seja a constituição de secção.

De notar também que para temperaturas mais elevadas, os resultados numéricos para a secção híbrida apresentam uma pequena discrepância para os valores analíticos segundo as normas (CEN, 2005b) e (CEN, 2006a) embora sem grande relevância.

CAPÍTULO 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6 Considerações finais

- 6.1 Conclusões gerais
- 6.2 Desenvolvimentos futuros

6. Considerações finais

6.1. Conclusões finais

Com este capítulo, apresentam-se resumidamente as principais conclusões do trabalho desenvolvido.

Esta dissertação teve como principal objetivo aprofundar o conhecimento do comportamento de secções híbridas compostas por aço carbono e aço inoxidável à flexão, perceber o seu comportamento mecânico a altas temperaturas resultantes de incêndios em edifícios, e tentar aproveitar as vantagens de cada um dos materiais em conjunto.

Nesta dissertação apresentaram-se os métodos de cálculo deste tipo de secções à flexão de acordo com as normas em vigor, apresentando-se resultados de valores de resistência da secção e à encurvadura lateral provenientes dos métodos descritos, com base nas características mecânicas de cada material a altas temperaturas.

Previamente à análise numérica de modelação, foi apresentado uma breve descrição do software utilizado (SAFIR), e descrito o modelo utilizado para o cálculo.

Através de modelos numéricos apresentaram-se valores de resistência à flexão, com secções compostas por aço carbono e secções híbridas. O primeiro de modo a definir o modelo numérico e verificar a calibragem do próprio modelo.

Para as secções híbridas, foram realizados modelos numéricos para várias secções, vários conjuntos de aços inoxidáveis diferentes, várias temperaturas provenientes da ação do fogo e duas exposições à ação do fogo diferentes. Estes valores foram também comparados com o método preconizado pela parte 1-1, 1-2 e 1-4 do Eurocódigo 3, onde constata-se que existe uma pequena diferença entre os valores de resistência, com os resultados provenientes do método do Eurocódigo 3 a ser inferior ao obtido dos resultados numéricos.

Apresentaram-se também neste documento a verificação do momento resistente de vigas à encurvadura lateral sem travamento lateral em situação de incêndio, comparando também com casos de secções em aço carbono, onde este último com o intuito de calibração de modelos numéricos, e perceber as vantagens da substituição de secções em aço carbono por secções híbridas. Para secções estudadas de altura reduzida para soluções construtivas correntes dos tipos de secção em análise, o fenómeno da encurvadura lateral não é existente.

Foram estudados casos híbridos de secções correntes de vigas suscetíveis a encurvadura lateral, e mais uma vez comparados com secções em aço carbono e ambos comparados com o método dado pela EN 1993-1-2. Observou-se que as diferentes curvas de encurvadura lateral se encontram próximas da curva obtida pelo método proposto do Eurocódigo 3.

6.2. Desenvolvimentos futuros

Concluindo a análise ao trabalho elaborado nesta dissertação, existem alguns pontos que serão importantes para a evolução dos conhecimentos sobre elementos híbridos.

Este documento apresenta o estudo a secções de classe 1, e pouco suscetíveis a fenómenos de encurvadura lateral, onde foi possível a análise plástica de resistência. Sugere-se um estudo também de secções de classes 3 e 4 sobretudo, de modo a analisar também o comportamento elástico das secções, e também os seus fenómenos de encurvadura lateral.

O estudo também se poderia estender a outros elementos estruturais, que não vigas. Pilares híbridos também seriam um bom caso de estudo, onde a flexão composta de elementos híbridos seria também estudada e comparada com casos de utilização corrente em aço carbono.

Este tipo de solução como já referido consiste em vigas embutidas em betão, onde o último vai ter um efeito de isolamento e conseqüente proteção do elemento estrutural à ação do fogo, daí a consideração do betão envolvente no ponto de vista térmico também ser importante para a evolução dos conhecimentos deste tipo de soluções.

Por fim, sugere-se um estudo com recurso a outros aços inoxidáveis que não os 3 estudados nesta dissertação (1.4301, 1.4003 e 1.4462).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Referências bibliográficas

- Amarante, F. M. (2012). *Encurvadura Lateral em Vigas Metálicas Sujeitas a Flexão Desviada*. Lisboa: Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa.
- Appleton, J. (s.d.). *Construções em Betão . Nota histórica sobre a sua evolução*. Lisboa: Instituto Superior Técnico.
- ArcelorMittal. (2014). *Sections and Merchant Bars*. Luxemburgo.
- ArcelorMittal. (s.d.). *IFB (Integrated Floor Beam): vigas integradas*. Obtido de http://www.constructalia.com/portugues_pt/products/estruturas/perfis_laminados_a_quente/assimetricos/ifb_integrated_floor_beam_vigas_integradas#.VmSLXfmLS1s
- ArcelorMittal. (s.d.). *Slim Floor - An innovative concept for floors*. Luxemburgo: ArcelorMittal Comercial Sections.
- Ashby, M. F., & Jones, D. R. (1992). *Engineering Materials 2. with corrections ed*. Oxford: Pergamon Press.
- Baddoo, N. (2009). *Designing Structural Stainless Steel Members To Eurocode 3*. NSC.
- Cachim, P. (s.d.). *A especificação do betão segundo a NP EN 206-1*. Aveiro: Departamento de Engenharia Civil - Universidade de Aveiro.
- CEN. (2004b). *EN 1992-1-2, Eurocode2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design*.
- CEN. (2005a). *EN 1993-1-1, Eurocode: Design of Steel Structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*. Bruxelas, Bélgica.
- CEN. (2005b). *EN 1993-1-2, Eurocode: Design of Steel Structures - Part 1-2: General rules and rules for buildings*. Bruxelas, Bélgica.
- CEN. (2006a). *EN 1993-1-4, Eurocode 3 : Design of steel structures - Part 1-4: General rules - Supplementary rules for stainless steels*. Bruxelas, Bélgica.
- Colaço, R., Gonçalves, M. C., & Margarido, F. (2005). *Materiais de Construção - Guia de utilização*. Lisboa: Departamento de Engenharia de Materiais - Instituto Superior Técnico.
- Ervedal, R. (2011). *Resistência ao fogo de elementos estruturais metálicos de classe 4*. Universidade de Aveiro.

- ESDEP. (2000). *Programa Europeo de Formación en el Cálculo y Diseño de la Construcción en Acero*. Espanha: Instituto Técnico de la Estructura en Acero (IETA).
- Euro Inox. (2006). *Design Manual For Structural Stainless Steel (Third Edition)*.
- Euro Inox, & Institute, T. S. (2006). *Design Manual For Structural Stainless Steel*.
- EuroInox. (2008). *Stainless Steel and Glass*. Building Series, Vol. 13.
- Franssen, J. (1989). *Modélisation et influence des contraintes résiduelles dans les profils métalliques soumis à l'incendie*. Construction Métallique, CTICM, Vol. 3, pp. 35-42.
- Franssen, J. (2011). *User's manual for SAFIR 2011 a computer program for analysis of structures subjected to fire*. University of Liege: Department ArGENCO.
- Gamelas, P. S. (2014). *Vigas em aço inoxidável com secções em I de Classe 4 ao fogo*. Aveiro: Departamento de Engenharia Civil - Universidade de Aveiro.
- Gardner, L. (2004). *Numerical Modeling of Stainless Steel Structural Components - A consistent Approach*. Journal of Constructional Engineering, ASCE. P 1586-1601.
- Keller, T. (2003). *Use of fibre reinforced polymers in bridge construction (Vol. 7)*. Zurich: IABSE.
- Lopes, N. (2009). *Behaviour of stainless steel structures in case of fire*. Universidade de Aveiro, Dissertação de Doutoramento.
- Mendonça, P. (2006). *Dimensionamento de Colunas-Viga Através das Equações de Interação do Eurocódigo 3*. Lisboa: Tese de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico.
- Moreno, E. N., & Baddoo, N. R. (2007). *Stainless Steel in Fire*. Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel.
- NP EN 206-1. (2007). *Betão Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade*. Comité Europeu de Normalização.
- Piloto, P. (2000). *Análise experimental e numérica do comportamento de estruturas metálicas sujeitas à acção do fogo*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Dissertação de Doutoramento.
- Piloto, P. (2006). *Apontamentos de Mecânica Estrutural 1*. Bragança: Escola Superior de Tecnologia e de Gestão - Instituto Politécnico de Bragança.
- Portal Met@lica. (2010). *Aço Inox: Processos de Soldagem*.

- Renaud, C. (2007). *Stainless Steel in Fire*. Centre Technique Industriel de la Construction Métallique.
- Simões da Silva, L., & Gervásio, H. (2007). *Manual de dimensionamento de estruturas metálicas: métodos avançados: Eurocódigo 3: Projeto de estruturas de aço*. CMM - Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista.
- Simões, R. (2005). *Manual de dimensionamento de estruturas metálicas: eurocódigo 3: projecto de estruturas de aço*. CMM-Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista.
- Soares, M. B. (1998). *Influência das Tensões Residuais no Comportamento em Fadiga e Fratura de Ligas Metálicas*. São Paulo: Autarquia Associada à Universidade de São Paulo.
- Trahair, N. (1993). *Flexural Torsional Buckling of structures*. Londres: E&FN SPON Chapman & Hall.
- Vila Real, P. (2003). *Incêndio em Estruturas Metálicas - Cálculo Estrutural*. Edições Orion.
- Vila Real, P., & Piloto, P. (2000). *Encurvadura Lateral de Vigas Submetidas a Elevadas Temperaturas - Comparação Numérica*. Espanha: Parque Tecnológico de Zamudio.
- Wikipédia. (2015). Obtido de <https://pt.wikipedia.org/wiki/Concreto>
- William D. Callister, J. (2002). *Ciência e Engenharia de Materiais, Uma Introdução*. LTC.
- Young, H. D. (1992). *University Physics*. Addison Wesley.

ANEXOS

Anexos: Restantes resultados obtidos

Apresentam-se os restantes valores e gráficos de variação dos momentos resistentes M_{rd} em função do aumento da temperatura para secções híbridas em aço inoxidável austenítico 1.4301 S2, S3 e S4, referentes ao ponto 3.3.

Tabela A. 1- Valores do momento resistente M_{rd} para várias temperaturas do aço e os vários casos em análise de S2 híbrida em aço inoxidável austenítico 1.4301 e aço carbono S235

Temperatura do aço θ_a [°C]	Momento Resistente M_{rd} [KN.m]			
	Híbrido 1 Lado	Carbono 1 Lado	Híbrido 4 Lados	Carbono 4 Lados
20	390.37	362.97	390.37	362.97
100	366.09	362.97	366.09	362.97
200	324.18	362.97	324.18	362.97
300	312.16	362.97	312.16	362.97
400	302.87	362.97	302.87	362.97
500	283.37	314.82	261.60	283.11
600	267.87	218.54	185.27	170.59
700	232.02	140.64	94.02	83.48
800	184.91	101.25	46.49	39.93
900	132.03	84.75	25.40	21.78
1000	96.01	78.13	16.42	14.52

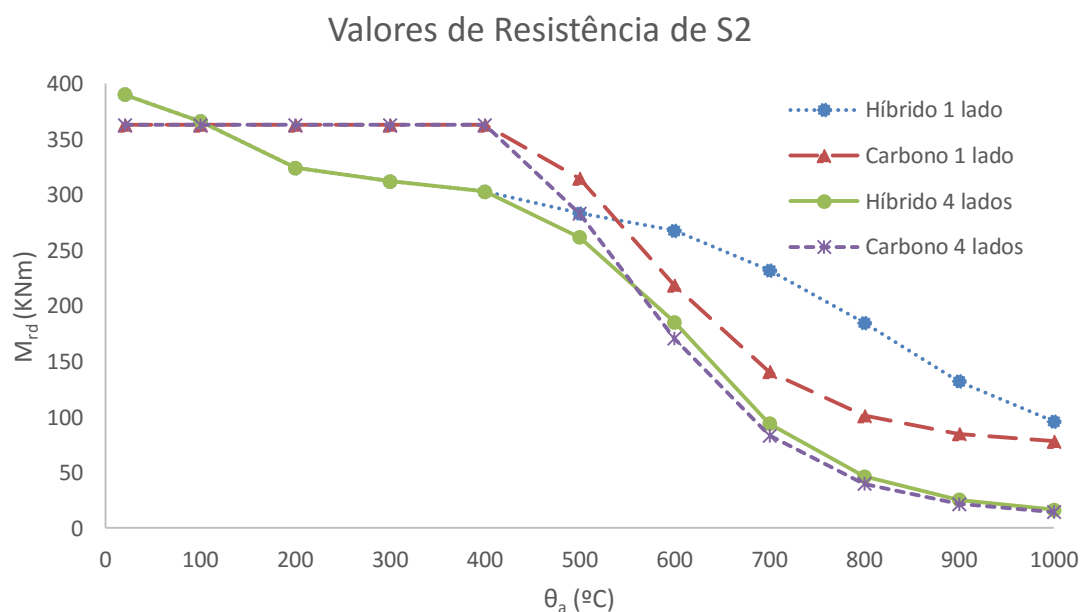


Figura A. 1- Variação dos momentos resistentes M_{rd} em função do aumento da temperatura dos vários casos em análise para o banco inferior em aço inoxidável austenítico 1.4301 e aço carbono S235 da secção S2.

Tabela A. 2- Valores do momento resistente M_{rd} para várias temperaturas do aço e os vários casos em análise de S3 híbrida em aço inoxidável austenítico 1.4301 e aço carbono S235.

Temperatura do aço θ_a [°C]	Momento Resistente M_{rd} [KN.m]			
	Híbrido 1 Lado	Carbono 1 Lado	Híbrido 4 Lados	Carbono 4 Lados
20	396.43	384.90	396.43	384.90
100	386.87	384.90	386.87	384.90
200	354.31	384.90	354.31	384.90
300	343.48	384.90	343.48	384.90
400	334.83	384.90	334.83	384.90
500	316.07	345.91	283.89	300.22
600	300.21	243.71	187.23	180.90
700	259.36	153.16	95.15	88.53
800	204.65	107.28	47.19	42.34
900	143.14	88.05	25.79	23.09
1000	101.19	80.34	16.62	15.40

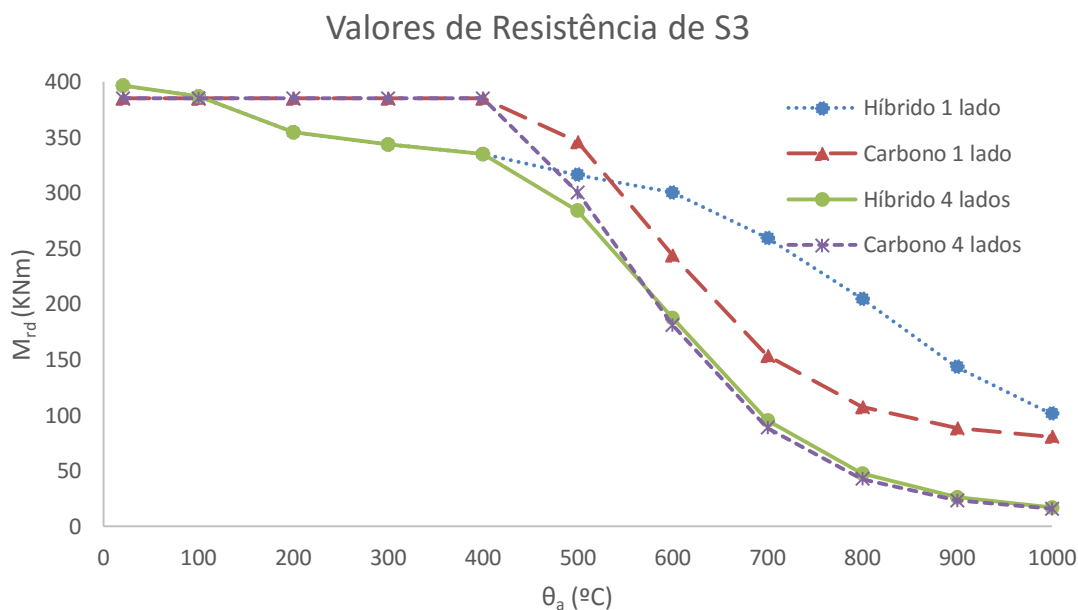


Figura A. 2- Variação dos momentos resistentes M_{rd} em função do aumento da temperatura dos vários casos em análise para o banzo inferior em aço inoxidável austenítico 1.4301 e aço carbono S235 da secção S3.

Tabela A. 3- Valores do momento resistente M_{rd} para várias temperaturas do aço e os vários casos em análise de S4 híbrida em aço inoxidável austenítico 1.4301 e aço carbono S235.

Temperatura do aço θ_a [°C]	Momento Resistente M_{rd} [KN.m]			
	Híbrido 1 Lado	Carbono 1 Lado	Híbrido 4 Lados	Carbono 4 Lados
20	364.43	325.68	364.43	325.68
100	329.43	325.68	329.43	325.68
200	283.40	325.68	283.40	325.68
300	271.42	325.68	271.42	325.68
400	262.70	325.68	262.70	325.68
500	245.70	274.00	230.13	254.03
600	232.83	191.92	176.08	153.07
700	203.09	127.44	91.39	74.91
800	164.06	94.89	44.86	35.82
900	120.32	81.27	24.50	19.54
1000	90.57	75.82	15.95	13.03

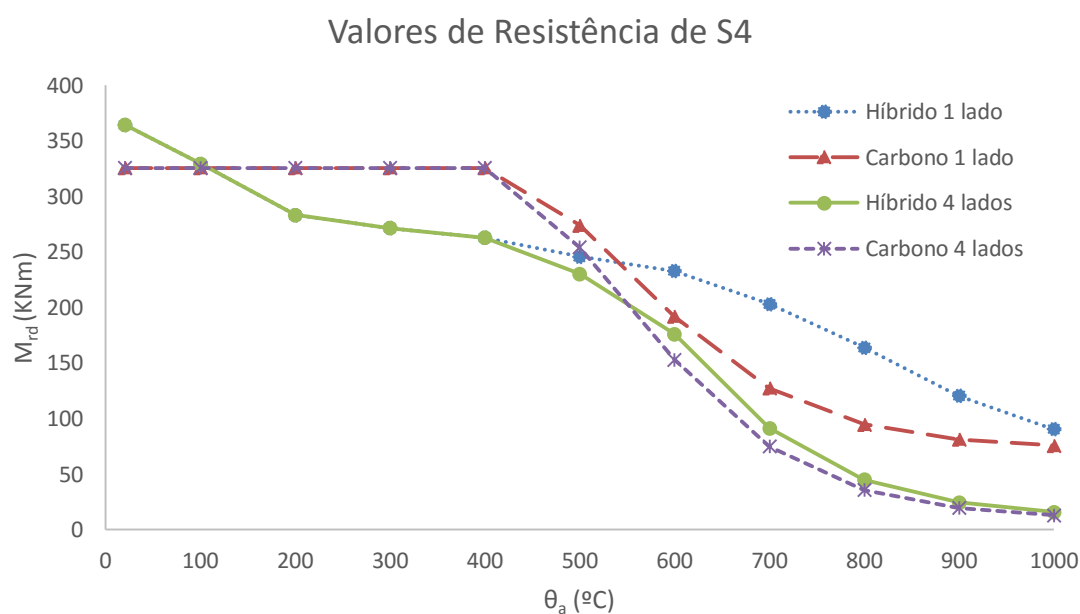


Figura A. 3. Variação dos momentos resistentes M_{rd} em função do aumento da temperatura dos vários casos em análise para o banco inferior em aço inoxidável austenítico 1.4301 e aço carbono S235 da secção S4.

Os gráficos de variação dos momentos resistentes M_{rd} em função do aumento da temperatura para secções híbridas de banco em aço inoxidável ferrítico 1.4003 S2, S3 e S4 são os seguintes:

Tabela A. 4- Valores do momento resistente M_{rd} para várias temperaturas do aço e os vários casos em análise de S2 híbrida em aço inoxidável ferrítico 1.4003 e aço carbono S235.

Temperatura do aço θ_a [°C]	Momento Resistente M_{rd} [KN.m]			
	Híbrido 1 Lado	Carbono 1 Lado	Híbrido 4 Lados	Carbono 4 Lados
20	395.21	362.97	395.21	362.97
100	394.35	362.97	394.35	362.97
200	393.20	362.97	393.20	362.97
300	392.02	362.97	392.02	362.97
400	389.89	362.97	389.89	362.97
500	381.27	314.82	309.33	283.11
600	268.30	218.54	185.29	170.59
700	161.57	140.64	90.30	83.48
800	124.69	101.25	44.01	39.93
900	116.18	84.75	24.82	21.78
1000	104.69	78.13	16.75	14.52

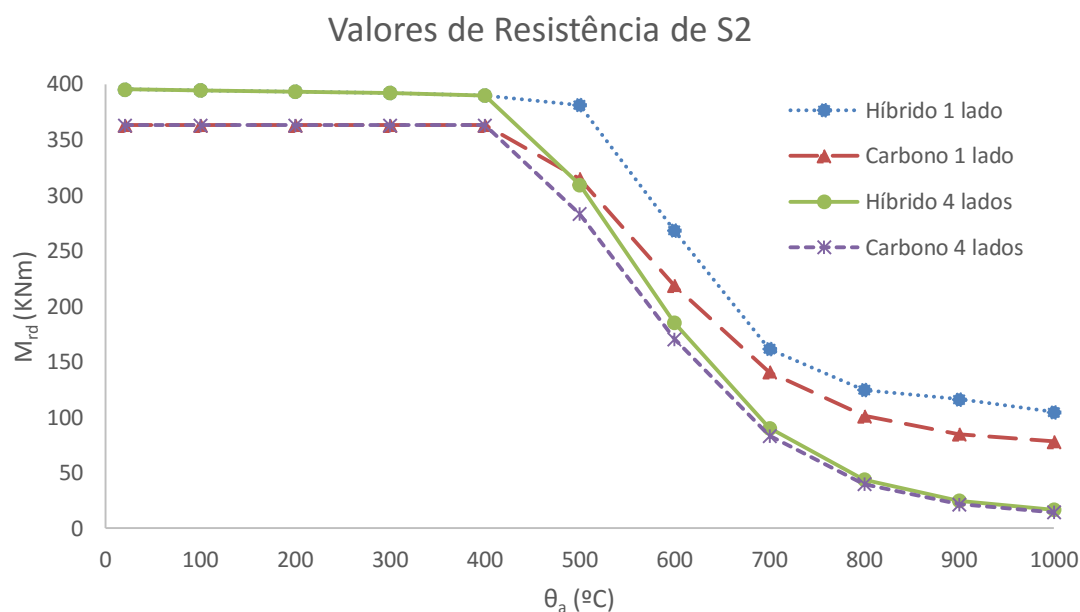


Figura A. 4- Variação dos momentos resistentes M_{rd} em função do aumento da temperatura dos vários casos em análise para o banço inferior em aço inoxidável ferrítico 1.4003 e aço carbono S235 da secção S2.

Tabela A. 5- Valores do momento resistente M_{rd} para várias temperaturas do aço e os vários casos em análise de S3 híbrida em aço inoxidável ferrítico 1.4003 e aço carbono S235.

Temperatura do aço θ_a [°C]	Momento Resistente M_{rd} [KN.m]			
	Híbrido 1 Lado	Carbono 1 Lado	Híbrido 4 Lados	Carbono 4 Lados
20	399.40	384.90	399.40	384.90
100	398.54	384.90	398.54	384.90
200	399.66	384.90	399.66	384.90
300	397.07	384.90	397.07	384.90
400	396.27	384.90	396.27	384.90
500	394.00	345.91	312.62	300.22
600	300.67	243.71	187.26	180.90
700	177.51	153.16	91.39	88.53
800	134.60	107.28	44.49	42.34
900	124.69	88.05	25.14	23.09
1000	111.30	80.34	16.99	15.40

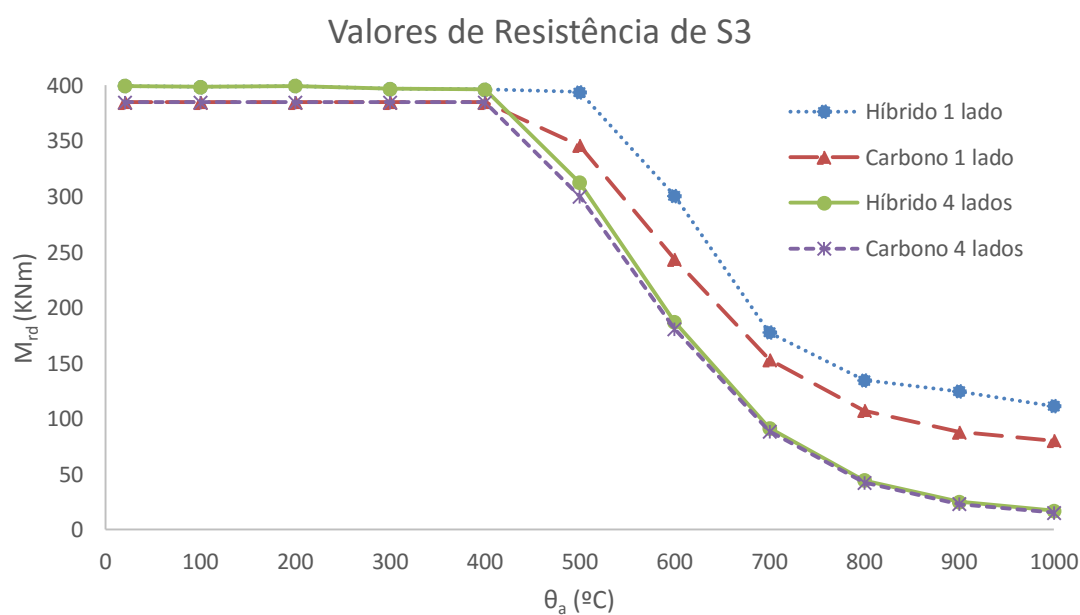


Figura A. 5- Variação dos momentos resistentes M_{rd} em função do aumento da temperatura dos vários casos em análise para o banzo inferior em aço inoxidável ferrítico 1.4003 e aço carbono S235 da secção S3.

Tabela A. 6- Valores do momento resistente M_{rd} para várias temperaturas do aço e os vários casos em análise de S4 híbrida em aço inoxidável ferrítico 1.4003 e aço carbono S235.

Temperatura do aço θ_a [°C]	Momento Resistente M_{rd} [KN.m]			
	Híbrido 1 Lado	Carbono 1 Lado	Híbrido 4 Lados	Carbono 4 Lados
20	387.68	325.68	387.68	325.68
100	383.78	325.68	383.78	325.68
200	379.32	325.68	379.32	325.68
300	376.12	325.68	376.12	325.68
400	371.44	325.68	371.44	325.68
500	357.02	274.00	306.50	254.03
600	239.00	191.92	180.10	153.07
700	148.73	127.44	86.85	74.91
800	117.62	94.89	43.94	35.82
900	110.45	81.27	24.61	19.54
1000	100.76	75.82	16.56	13.03

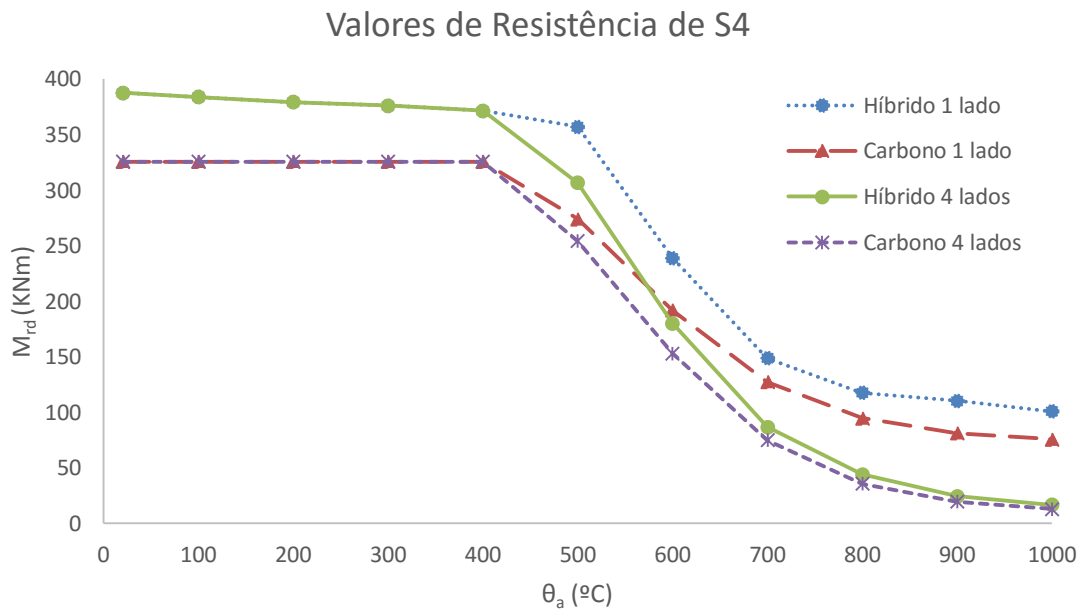


Figura A. 6- Variação dos momentos resistentes M_{rd} em função do aumento da temperatura dos vários casos em análise para o banzo inferior em aço inoxidável ferrítico 1.4003 e aço carbono S235 da secção S4.

Os valores e gráficos dos momentos resistentes M_{rd} em função do aumento da temperatura para as secções híbridas em aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462 S2, S3 e S4 são os seguintes:

Tabela A. 7- Valores do momento resistente M_{rd} para várias temperaturas do aço e os vários casos em análise de S2 híbrida em aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462 e aço carbono S235.

Temperatura do aço θ_a [°C]	Momento Resistente M_{rd} [KN.m]			
	Híbrido 1 Lado	Carbono 1 Lado	Híbrido 4 Lados	Carbono 4 Lados
20	409.17	362.97	409.17	362.97
100	406.60	362.97	406.60	362.97
200	402.98	362.97	402.98	362.97
300	401.37	362.97	401.37	362.97
400	400.26	362.97	400.26	362.97
500	397.29	314.82	312.28	283.11
600	391.85	218.54	194.97	170.59
700	335.19	140.64	98.32	83.48
800	271.17	101.25	49.46	39.93
900	150.22	84.75	26.04	21.78
1000	92.65	78.13	16.28	14.52

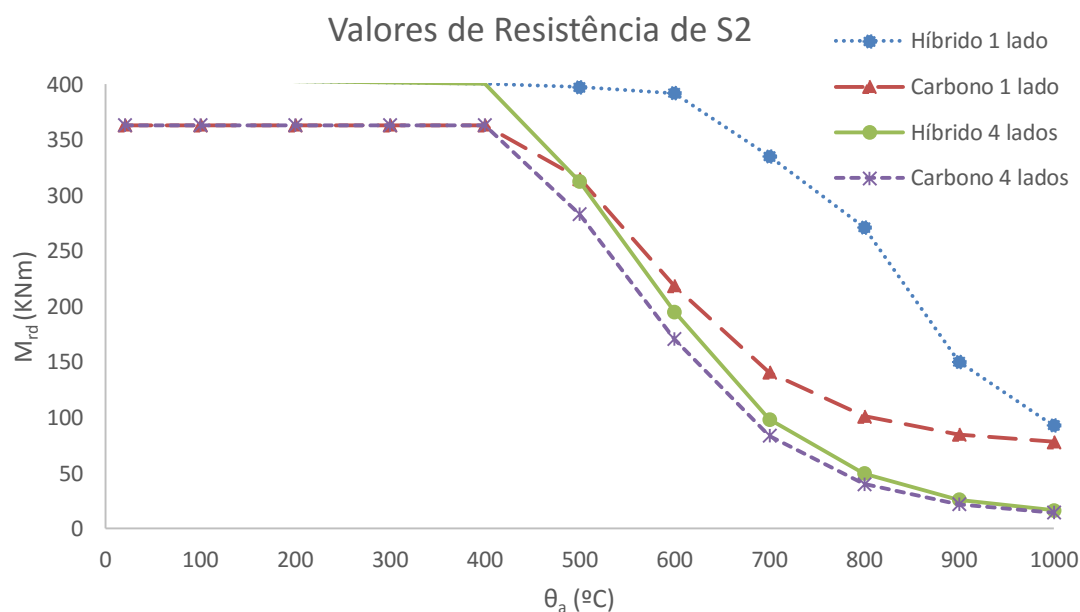


Figura A. 7- Variação dos momentos resistentes M_{rd} em função do aumento da temperatura dos vários casos em análise para o banzo inferior em aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462 e aço carbono S235 da secção S2.

Tabela A. 8- Valores do momento resistente M_{rd} para várias temperaturas do aço e os vários casos em análise de S3 híbrida em aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462 e aço carbono S235.

Temperatura do aço θ_a [°C]	Momento Resistente M_{rd} [KN.m]			
	Híbrido 1 Lado	Carbono 1 Lado	Híbrido 4 Lados	Carbono 4 Lados
20	414.12	384.90	414.12	384.90
100	411.35	384.90	411.35	384.90
200	407.48	384.90	407.48	384.90
300	405.78	384.90	405.78	384.90
400	404.62	384.90	404.62	384.90
500	401.53	345.91	318.85	300.22
600	397.00	243.71	197.55	180.90
700	363.81	153.16	99.93	88.53
800	303.70	107.28	50.58	42.34
900	164.31	88.05	26.51	23.09
1000	97.26	80.34	16.47	15.40

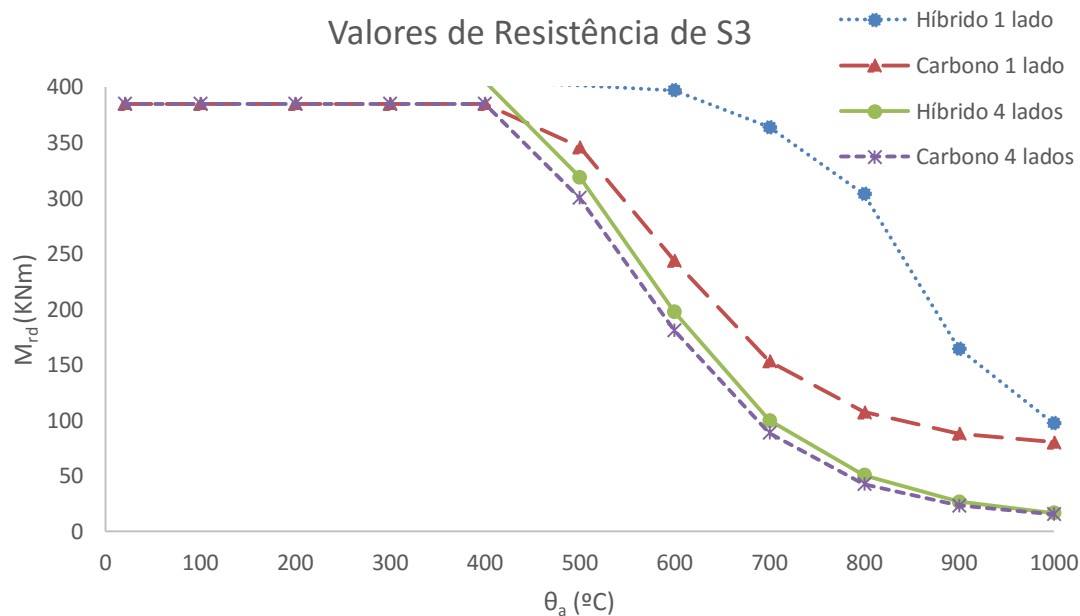


Figura A. 8- Variação dos momentos resistentes M_{rd} em função do aumento da temperatura dos vários casos em análise para o banço inferior em aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462 e aço carbono S235 da secção S3.

Tabela A. 9- Valores do momento resistente M_{rd} para várias temperaturas do aço e os vários casos em análise de S4 híbrida em aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462 e aço carbono S235.

Temperatura do aço θ_a [°C]	Momento Resistente M_{rd} [KN.m]			
	Híbrido	Carbono	Híbrido	Carbono
	1 Lado	1 Lado	4 Lados	4 Lados
20	406.74	325.68	406.74	325.68
100	404.73	325.68	404.73	325.68
200	401.85	325.68	401.85	325.68
300	400.55	325.68	400.55	325.68
400	399.65	325.68	399.65	325.68
500	395.14	274.00	314.21	254.03
600	375.71	191.92	193.20	153.07
700	301.79	127.44	96.70	74.91
800	241.42	94.89	48.00	35.82
900	139.15	81.27	25.51	19.54
1000	90.61	75.82	16.20	13.03

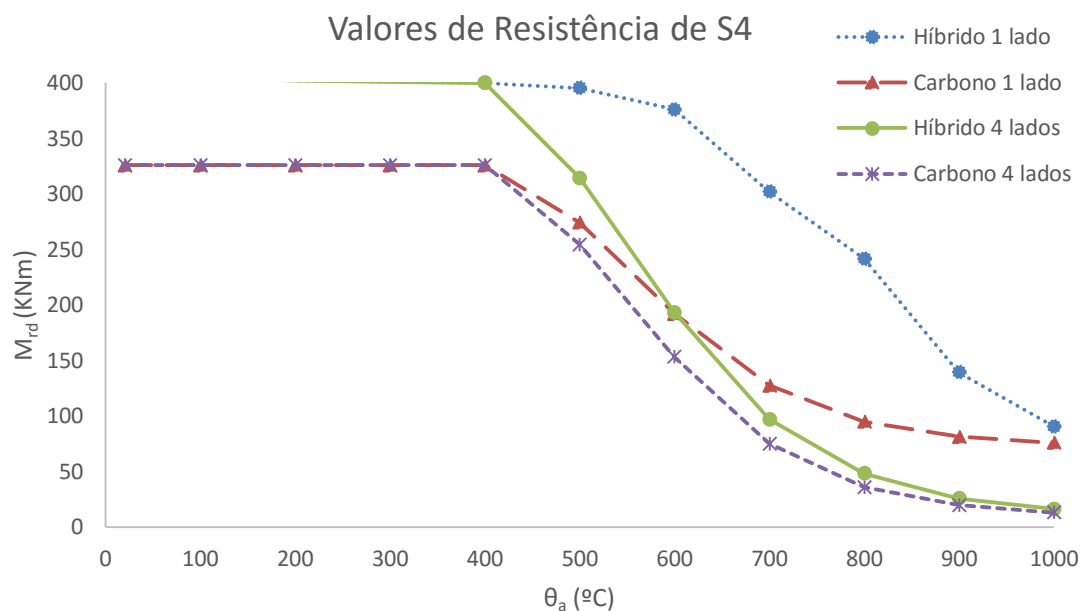


Figura A. 9- Variação dos momentos resistentes M_{rd} em função do aumento da temperatura dos vários casos em análise para o banzo inferior em aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462 e aço carbono S235 da secção S4.

Apresenta-se em seguida os valores referentes ao ponto 4.2.3.1 para as secções em aço carbono S2, S3 e S4.

Tabela A. 10- Valores de temperatura das fibras da secção S2 e momento resistente M_{rd} correspondente.

Temperatura do aço θ_a [°C]	Temperatura mínima “Trasient State” [°C]	Temperatura máxima “Trasient State” [°C]	Momento Resistente da secção M_{rd} [KN.m]
400	28.9	40.8	362.79
500	451.9	590.3	314.59
600	558.8	676.1	217.31
700	664.6	738	139.31
800	715	834.7	100.32

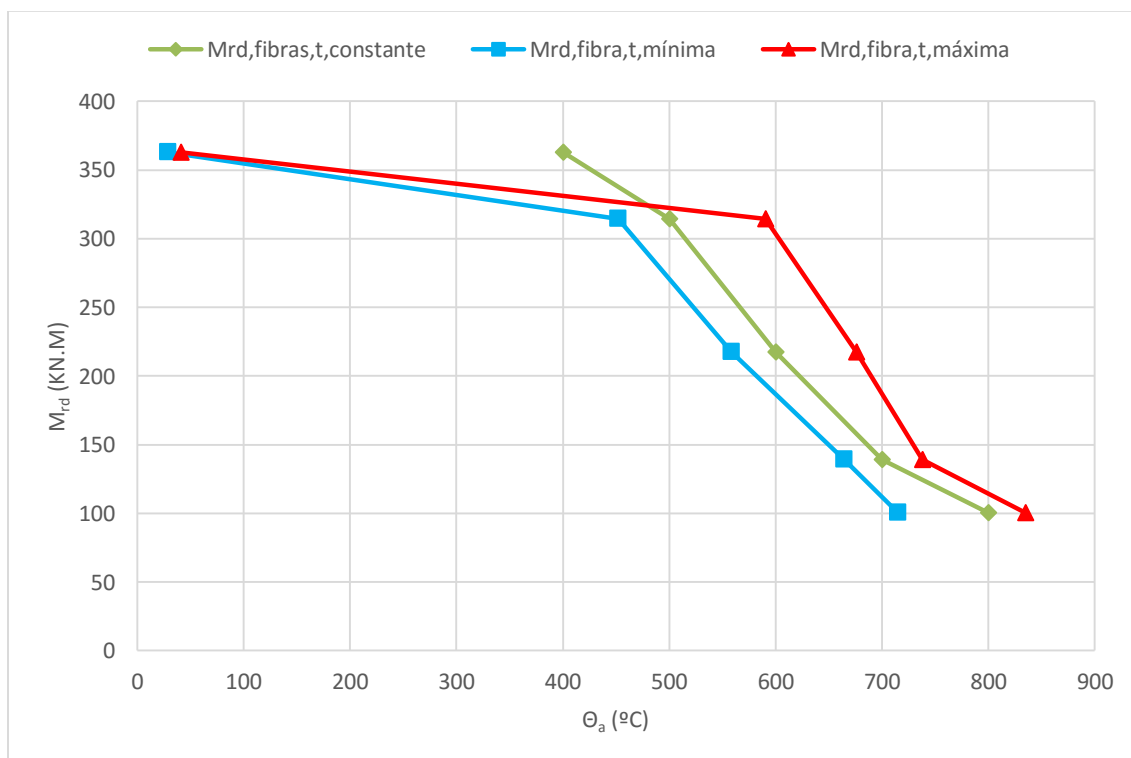


Figura A. 10- Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S2 em aço carbono S235.

Tabela A. 11- Valores de temperatura das fibras da secção S3 e momento resistente M_{rd} correspondente.

Temperatura do aço θ_a [°C]	Temperatura mínima “Trasient State” [°C]	Temperatura máxima “Trasient State” [°C]	Momento Resistente da secção M_{rd} [KN.m]
400	309.1	424.7	384.59
500	424.5	553.4	345.44
600	518.8	646.9	242.59
700	621.6	729.5	151.69
800	705.9	817.7	106.27

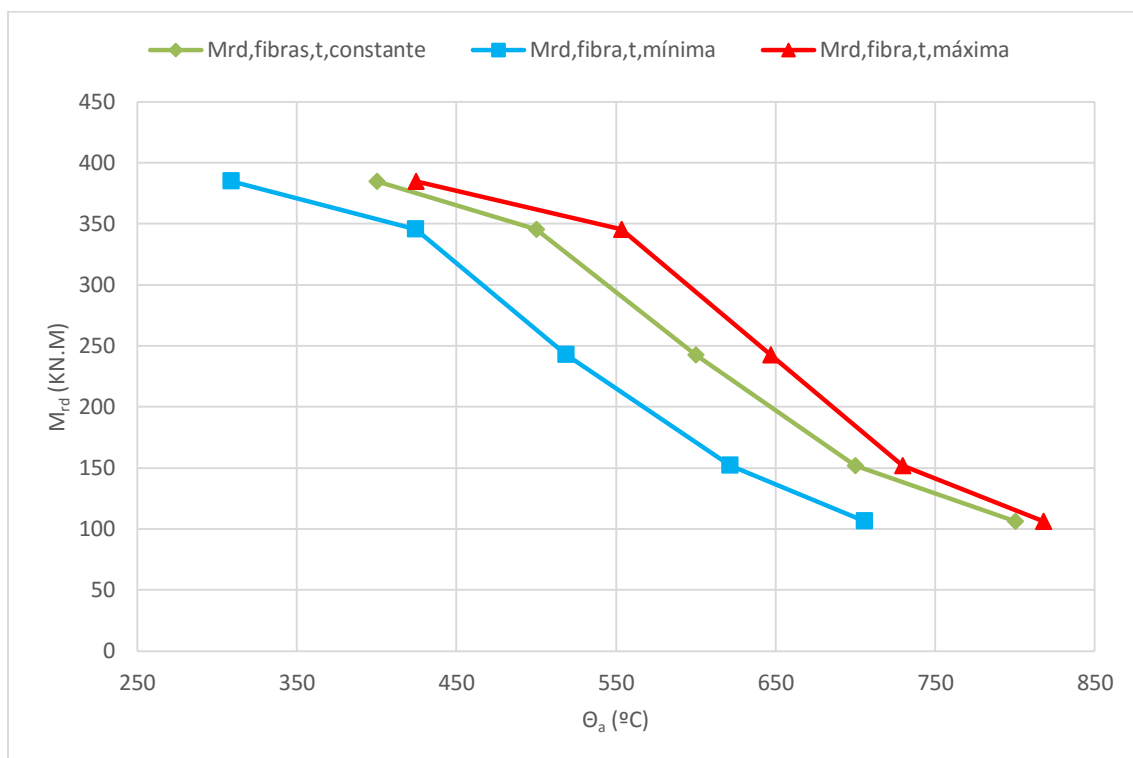


Figura A. 11- Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S3 em aço carbono S235.

Tabela A. 12- Valores de temperatura das fibras da secção S4 e momento resistente Mrd correspondente.

Temperatura do aço θ_a [°C]	Temperatura mínima “Trasient State” [°C]	Temperatura máxima “Trasient State” [°C]	Momento Resistente da secção M_{rd} [KN.m]
400	30.5	41	325.73
500	400.5	529.9	273.84
600	525.8	654.9	190.65
700	613.5	725.9	126.28
800	707.4	824.2	94.12

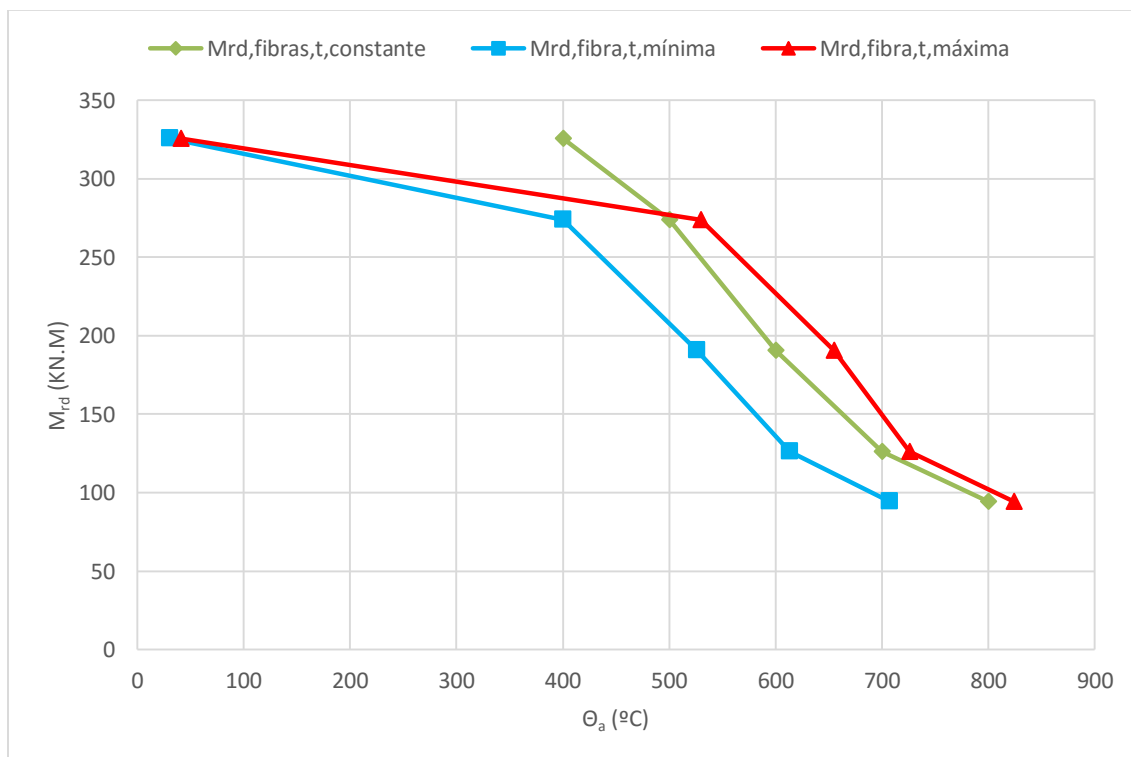


Figura A. 12- Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S4 em aço carbono S235.

Os valores das secções S2, S3, S4 relativos ao ponto 5.2.1, para secção exposta a 4 lados ao fogo, e para as classes de aço descritas nesse ponto, apresentam-se de seguida na forma de gráficos.

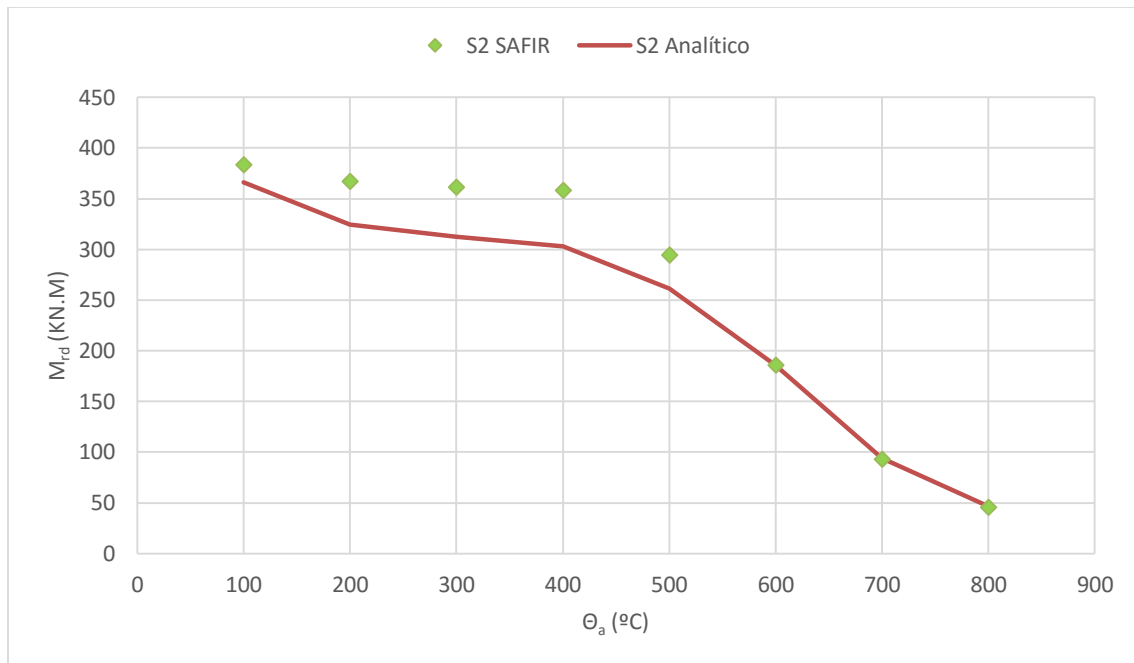


Figura A. 13- Resultados numéricos para secção S2 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável austenítico 1.4301.

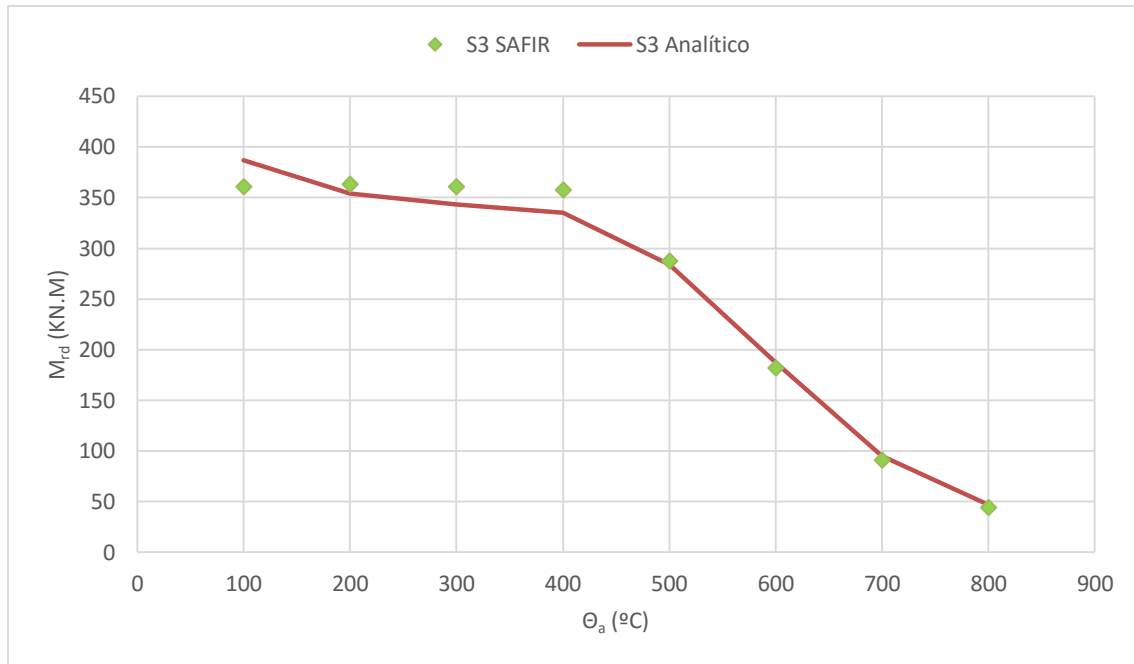


Figura A. 14- Resultados numéricos para secção S3 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável austenítico 1.4301.

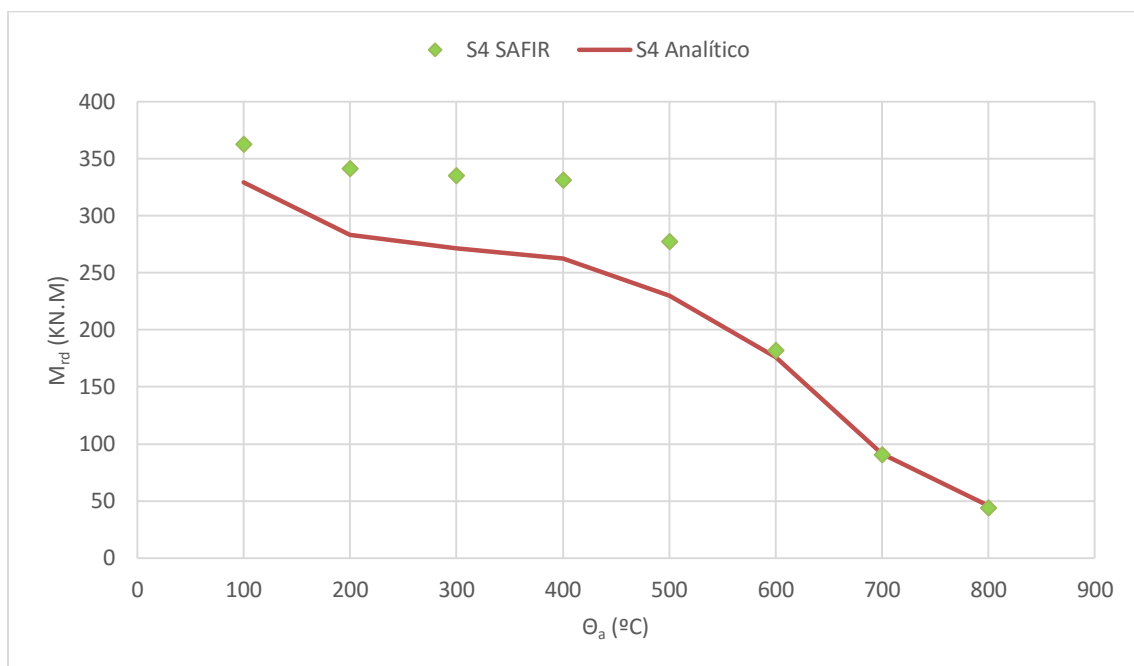


Figura A. 15- Resultados numéricos para secção S4 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável austenítico 1.4301.

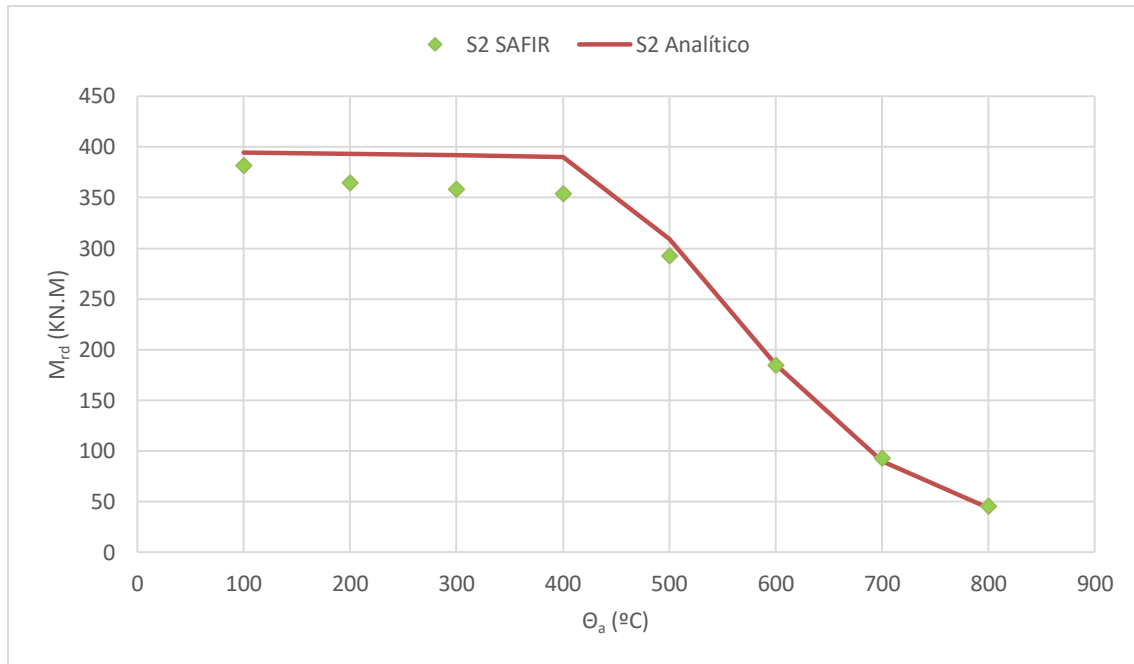


Figura A. 16. Resultados numéricos para secção S2 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável ferrítico 1.4003.

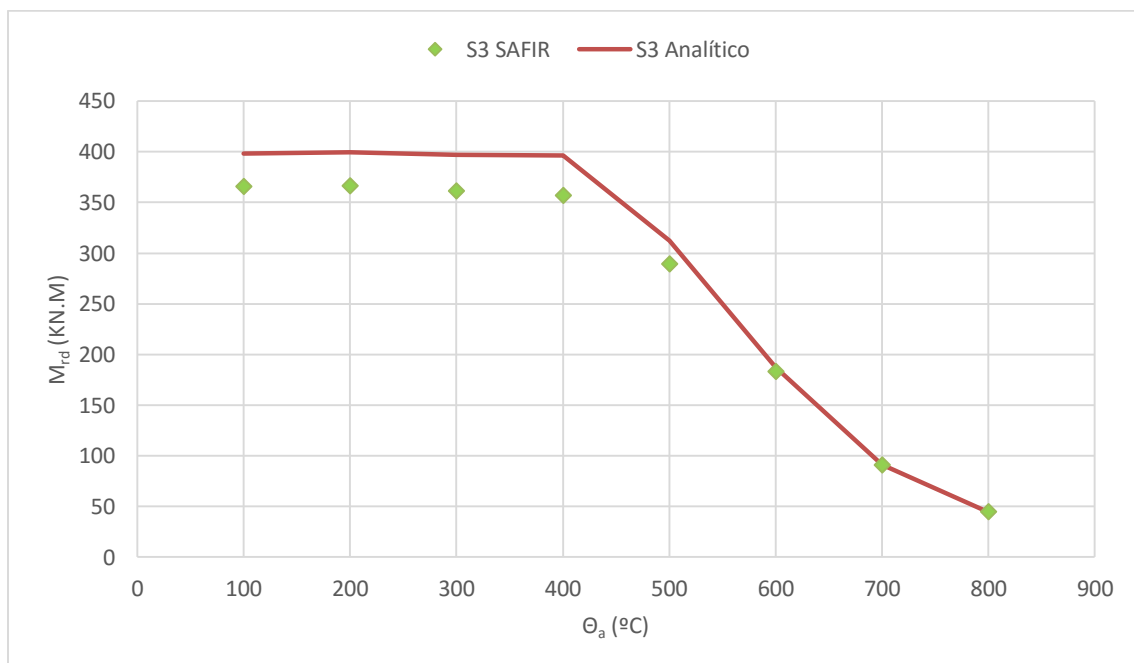


Figura A. 17. Resultados numéricos para secção S3 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável ferrítico 1.4003.

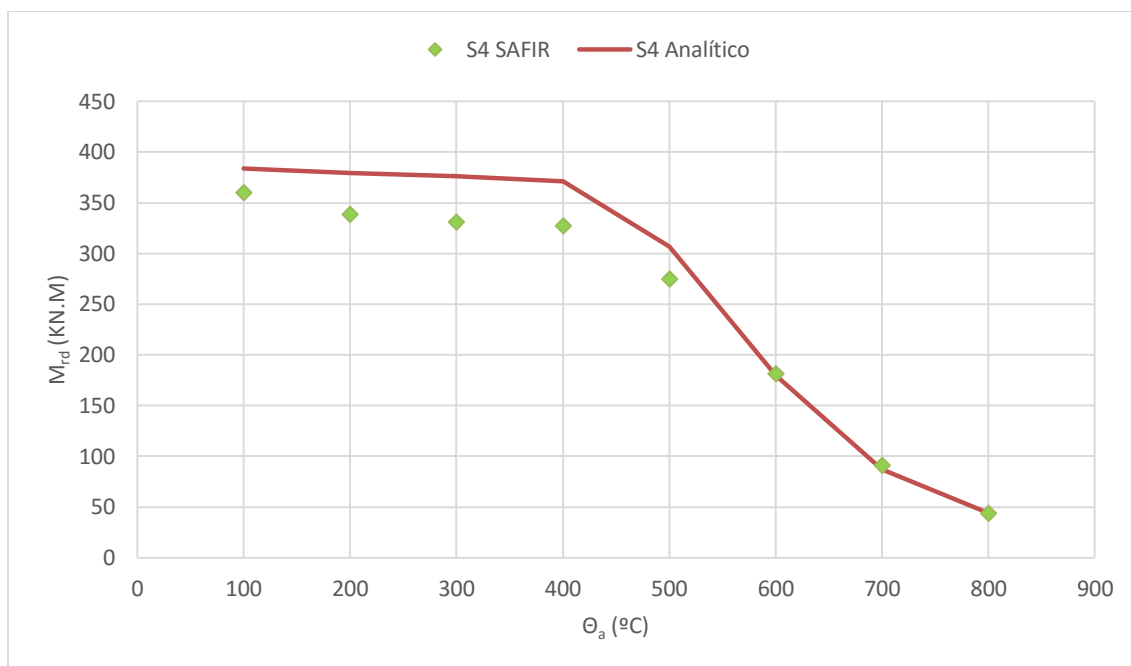


Figura A. 18. Resultados numéricos para secção S4 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável ferrítico 1.4003.

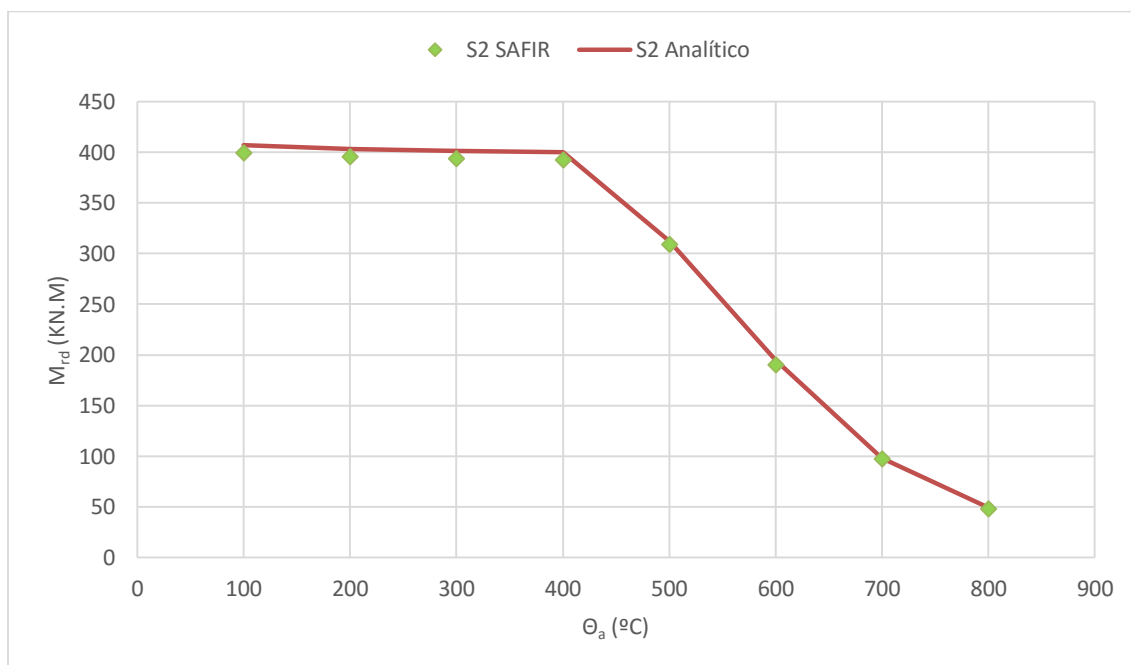


Figura A. 19. Resultados numéricos para secção S2 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462.

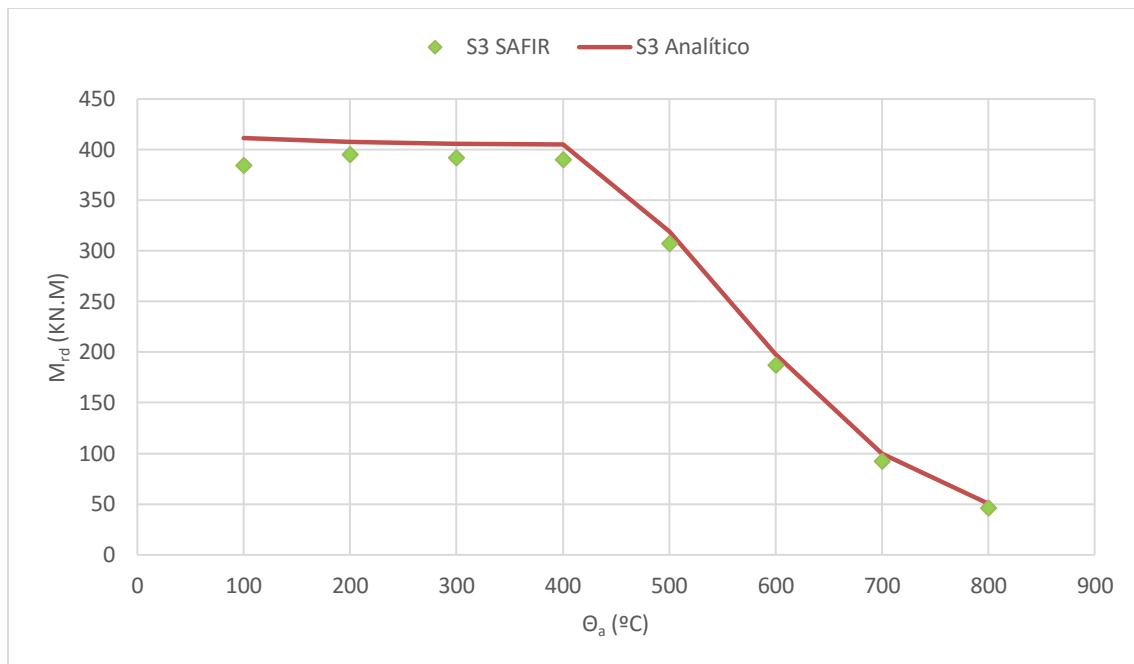


Figura A. 20. Resultados numéricos para seção S3 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462.

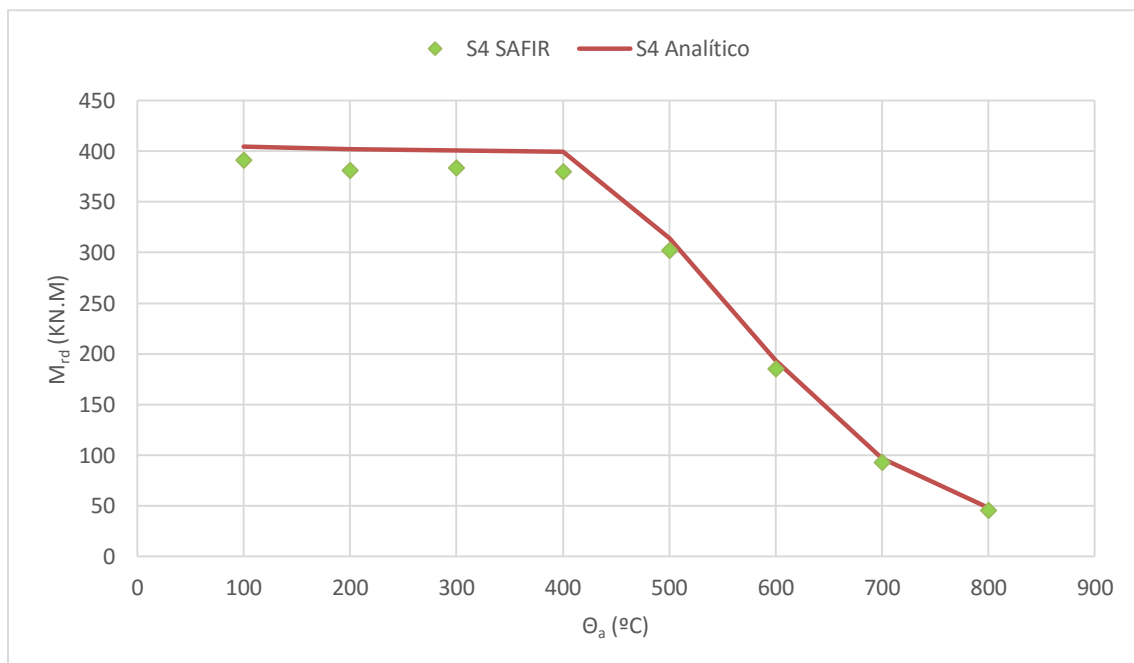


Figura A. 21. Resultados numéricos para seção S4 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462.

Os valores das secções S2, S3, S4 relativos ao ponto 5.2.2, para secção exposta a 1 lado ao fogo, e para as classes de aço descritas nesse ponto, apresentam-se de seguida na forma de gráficos.

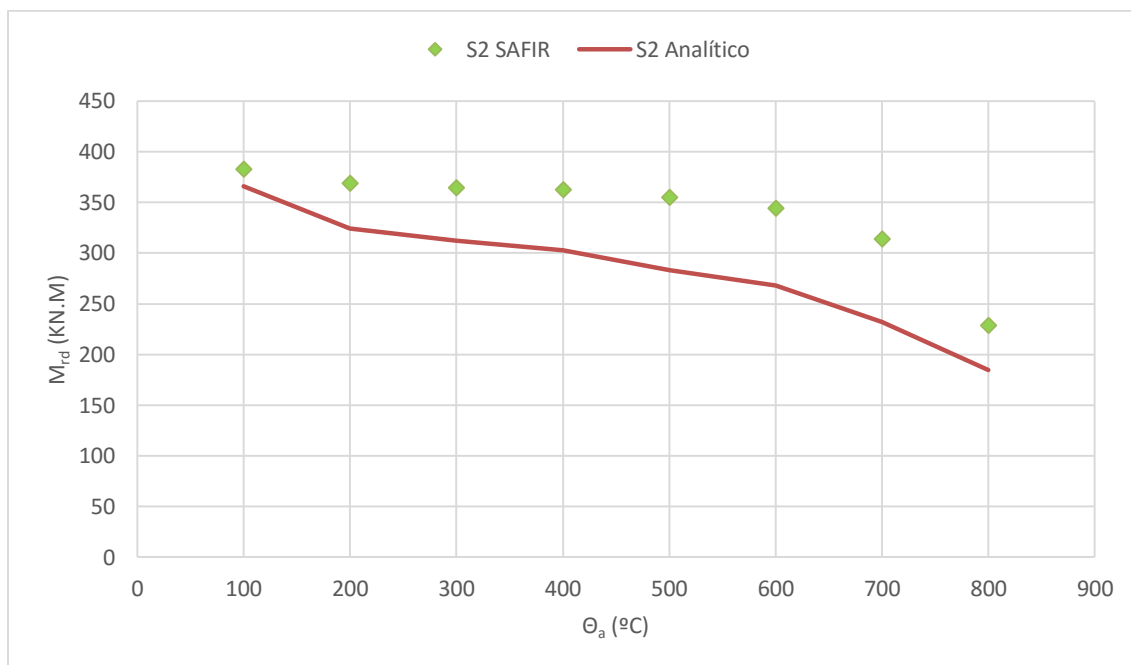


Figura A. 22. Resultados numéricos para secção S2 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável austenítico 1.4301.

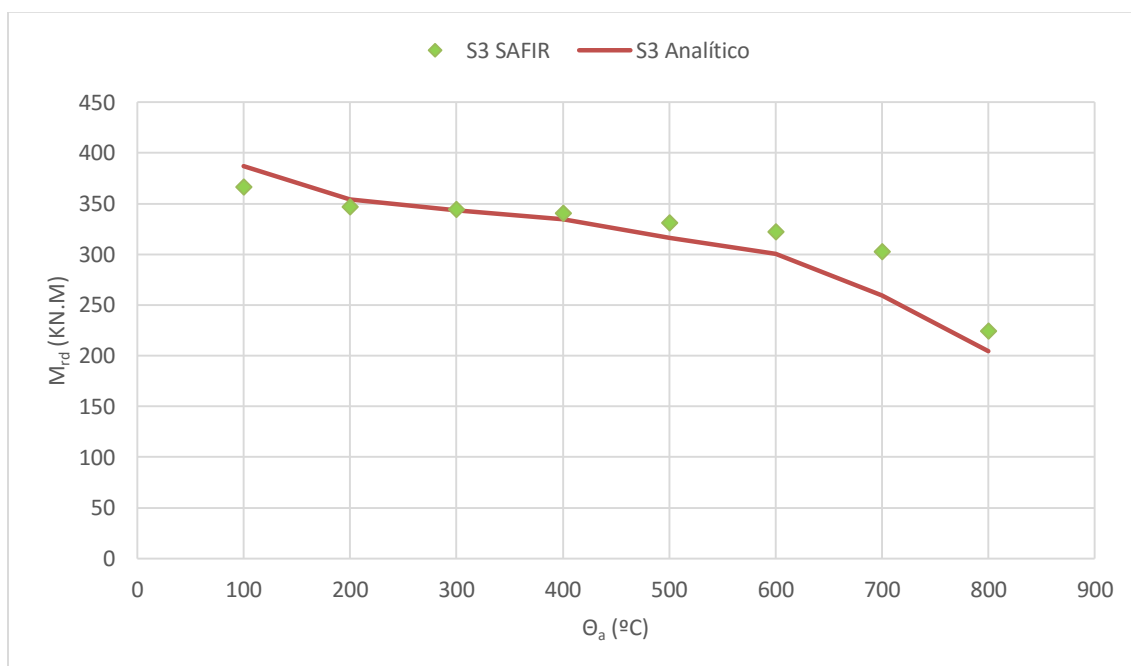


Figura A. 23. Resultados numéricos para secção S3 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável austenítico 1.4301.

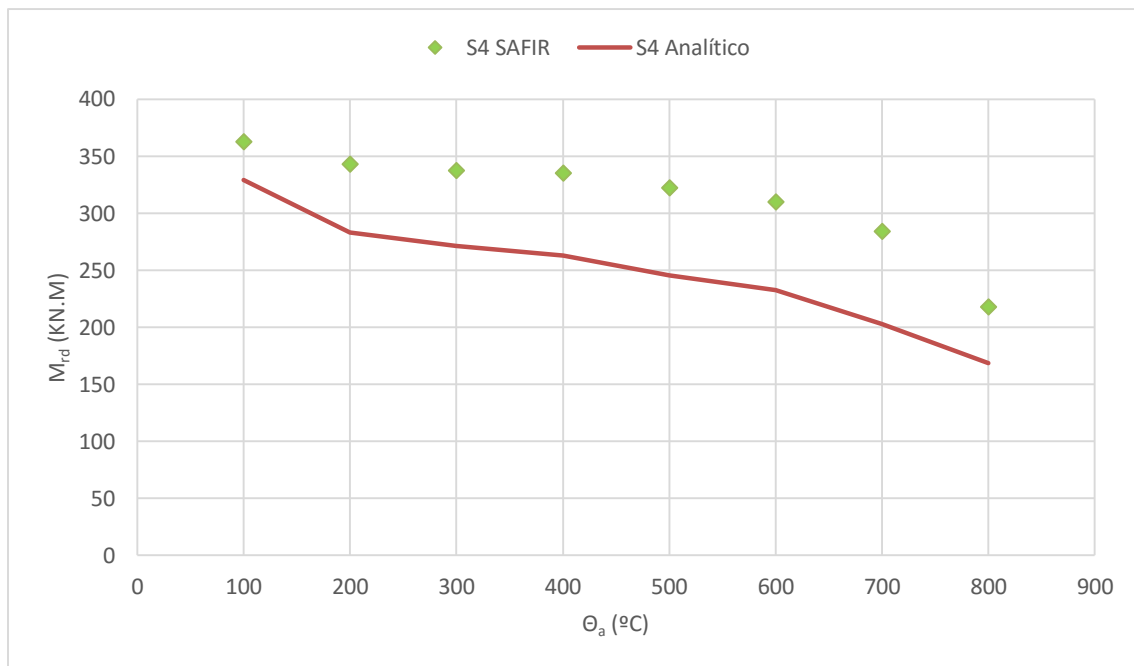


Figura A. 24. Resultados numéricos para secção S4 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável austenítico 1.4301.

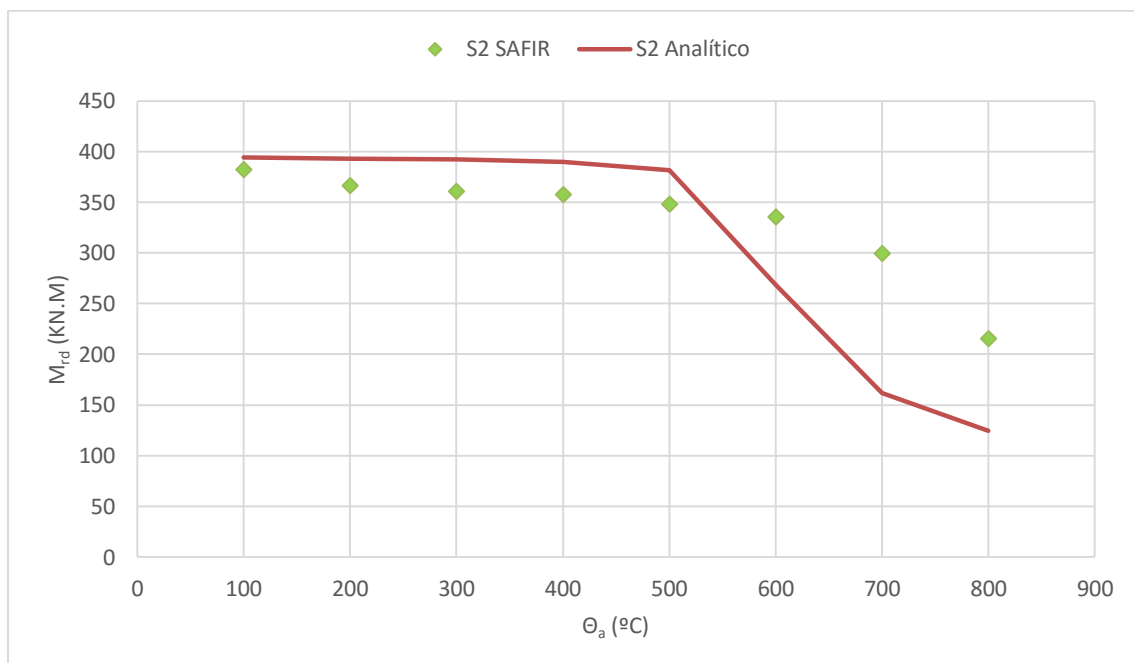


Figura A. 25. Resultados numéricos para secção S2 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável ferrítico 1.4003.

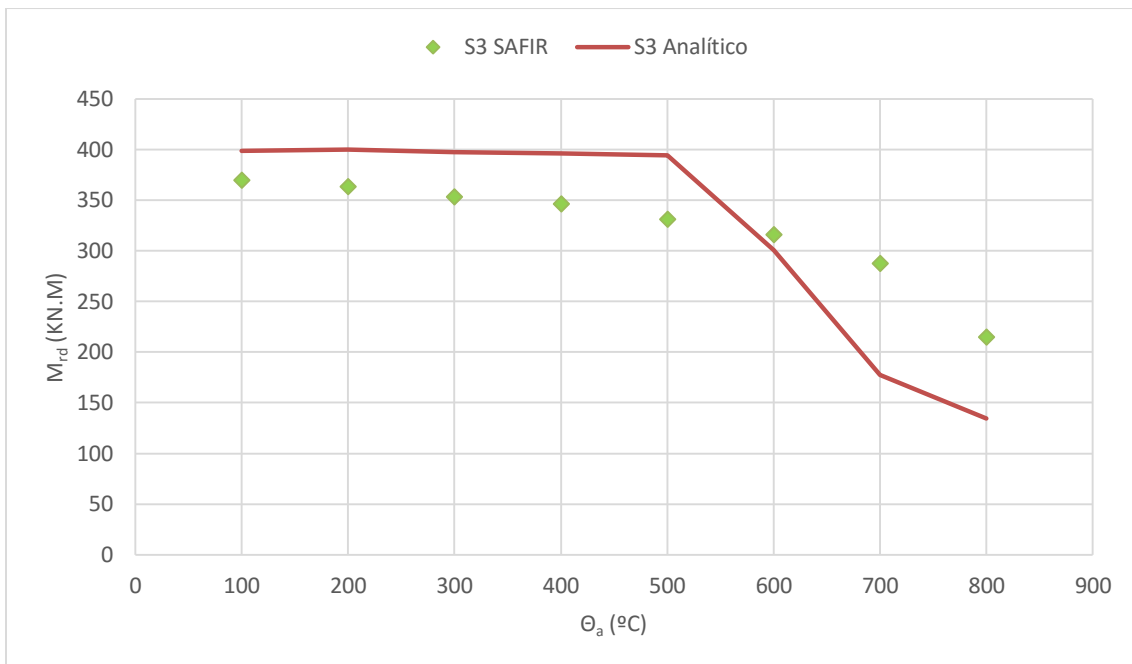


Figura A. 26. Resultados numéricos para secção S3 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável ferrítico 1.4003.

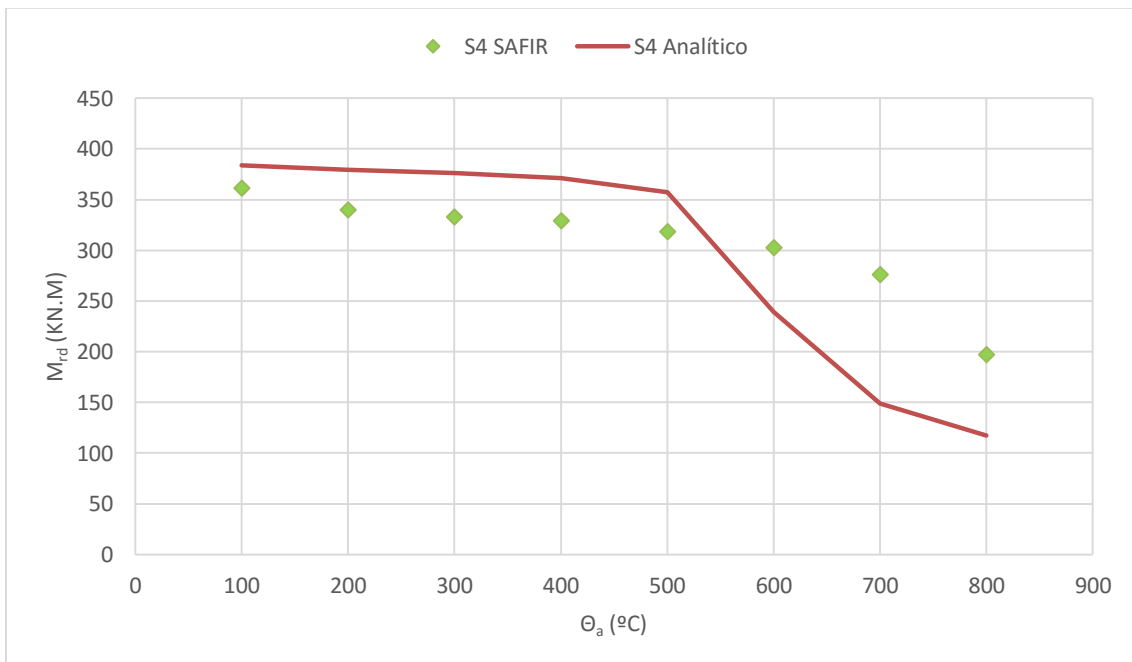


Figura A. 27. Resultados numéricos para secção S4 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável ferrítico 1.4003.

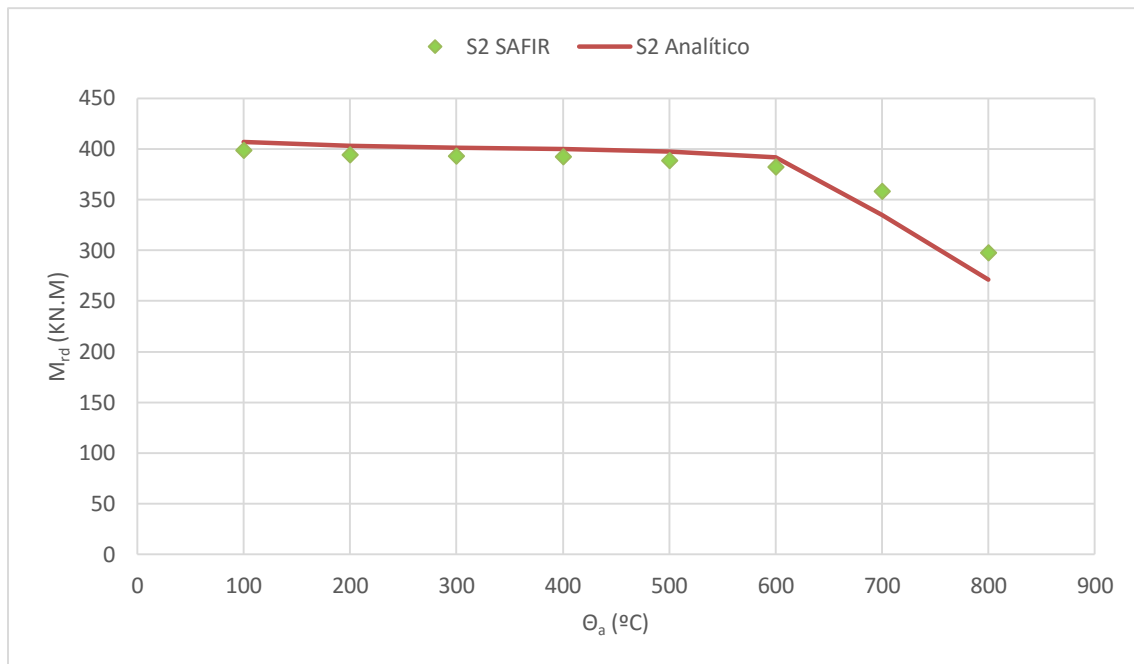


Figura A. 28. Resultados numéricos para secção S2 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462.

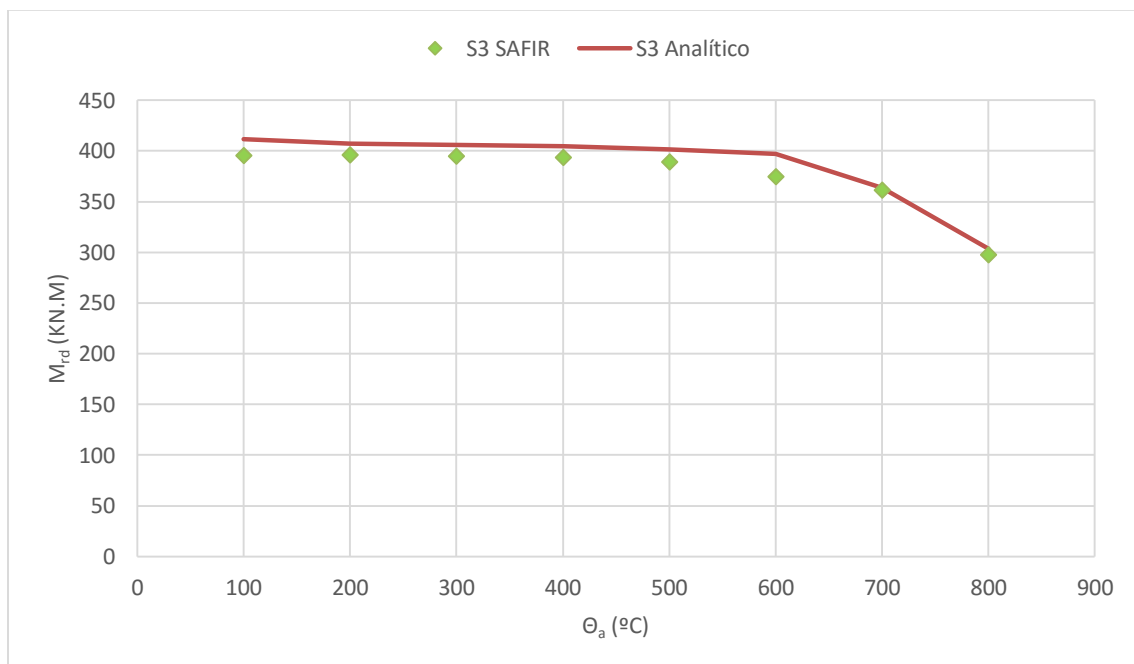


Figura A. 29. Resultados numéricos para secção S3 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462.

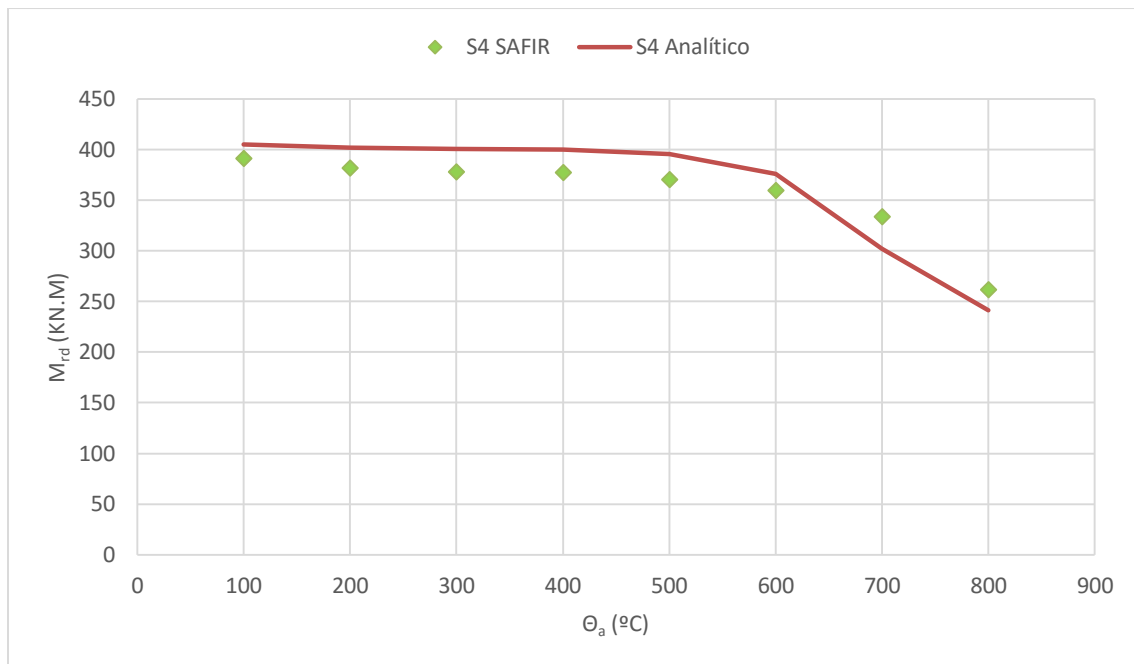


Figura A. 30. Resultados numéricos para secção S4 híbrida em aço carbono S235 e aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462.

Apresenta-se em seguida os valores referentes ao ponto 5.2.3.1, exposição ao fogo em 4 lados, para as secções S2, S3 e S4 e para as 3 classes de aço inoxidável em estudo

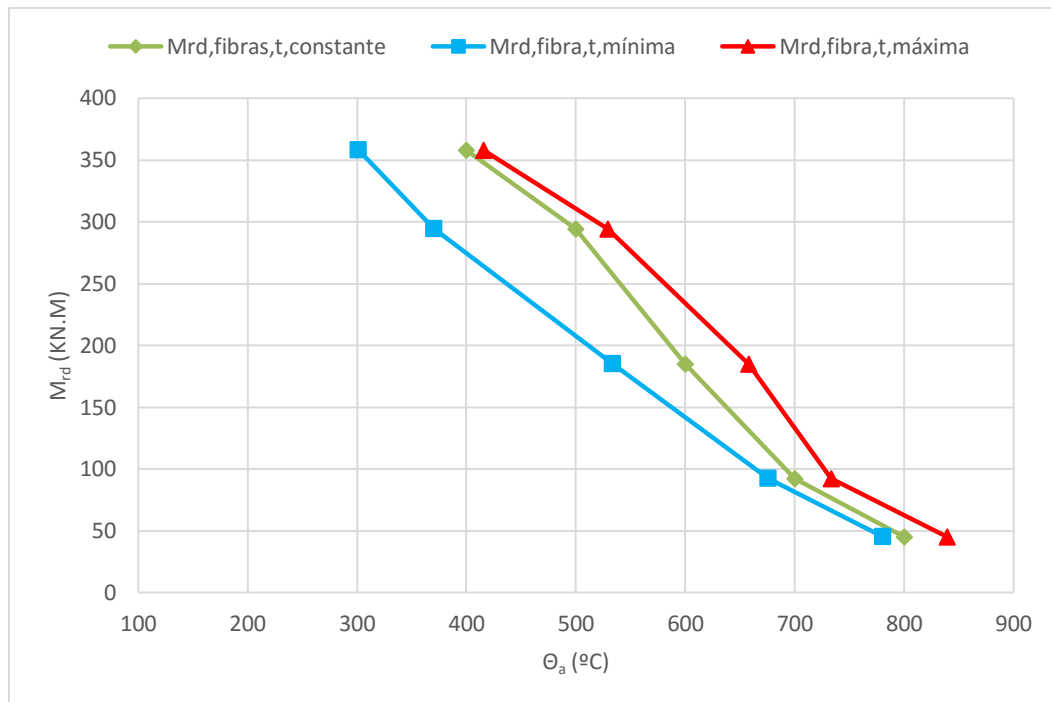


Figura A. 31. Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S2 com banzo em aço inoxidável austenítico 1.4301.

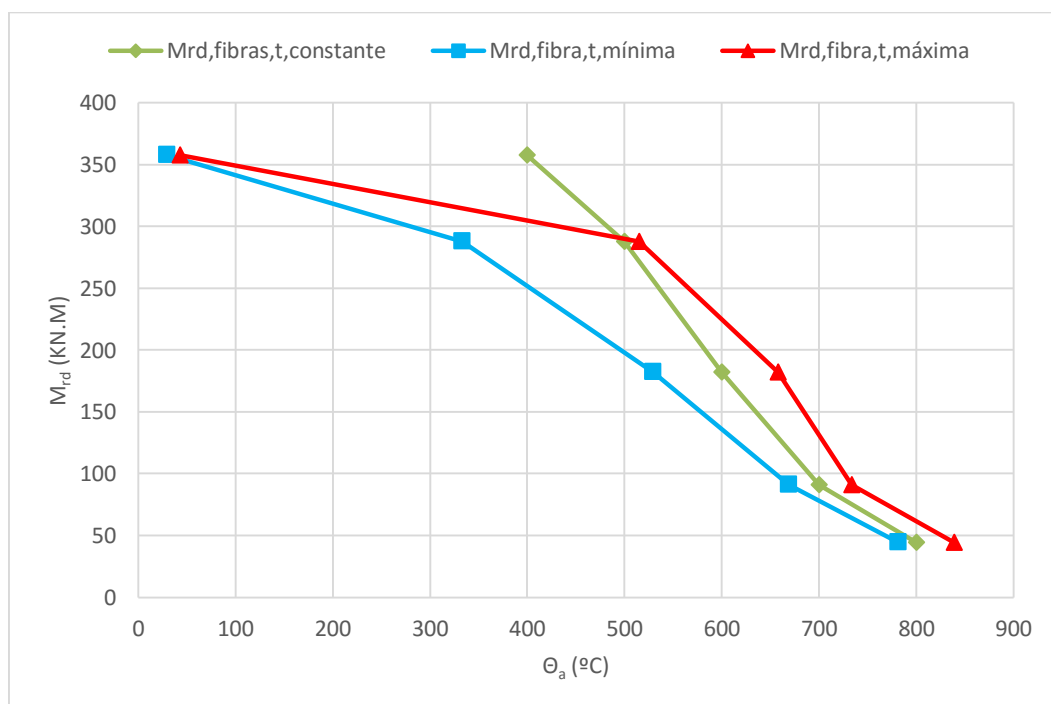


Figura A. 32. Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S3 com banzo em aço inoxidável austenítico 1.4301.

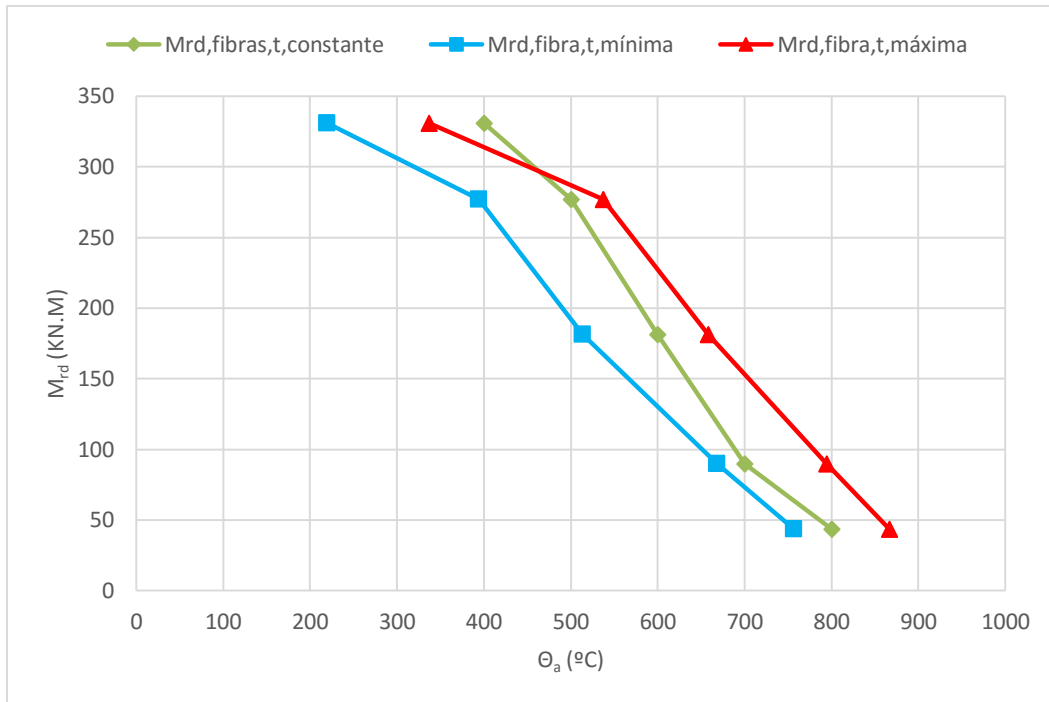


Figura A. 33. Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S4 com banço em aço inoxidável austenítico 1.4301.

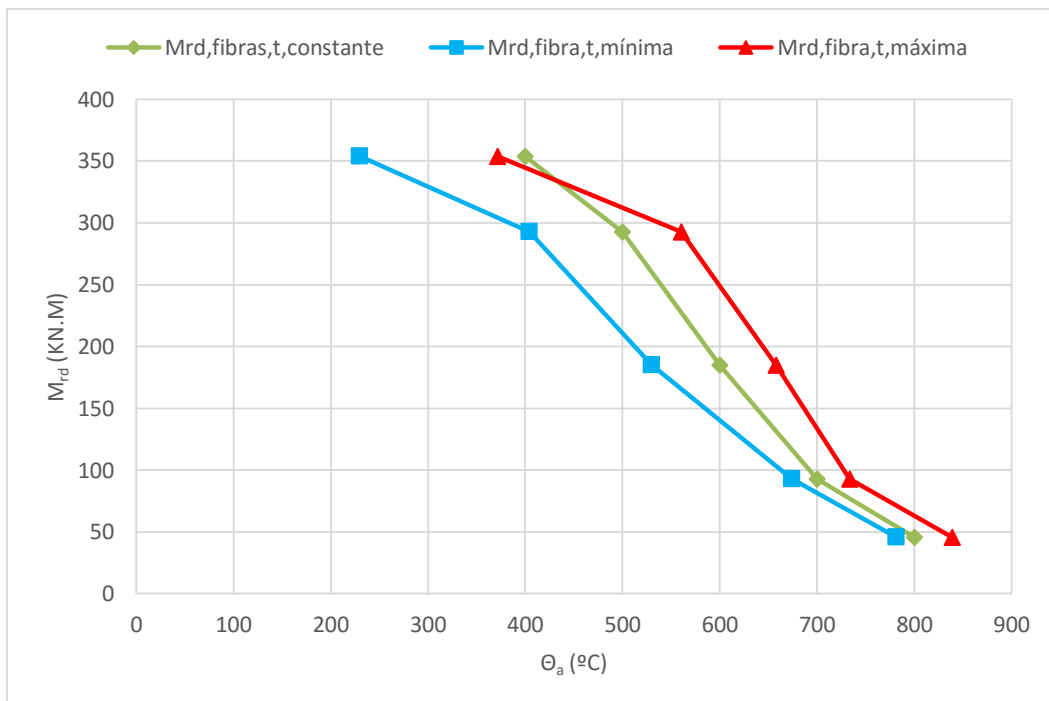


Figura A. 34. Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S2 com banço em aço inoxidável ferrítico 1.4003.

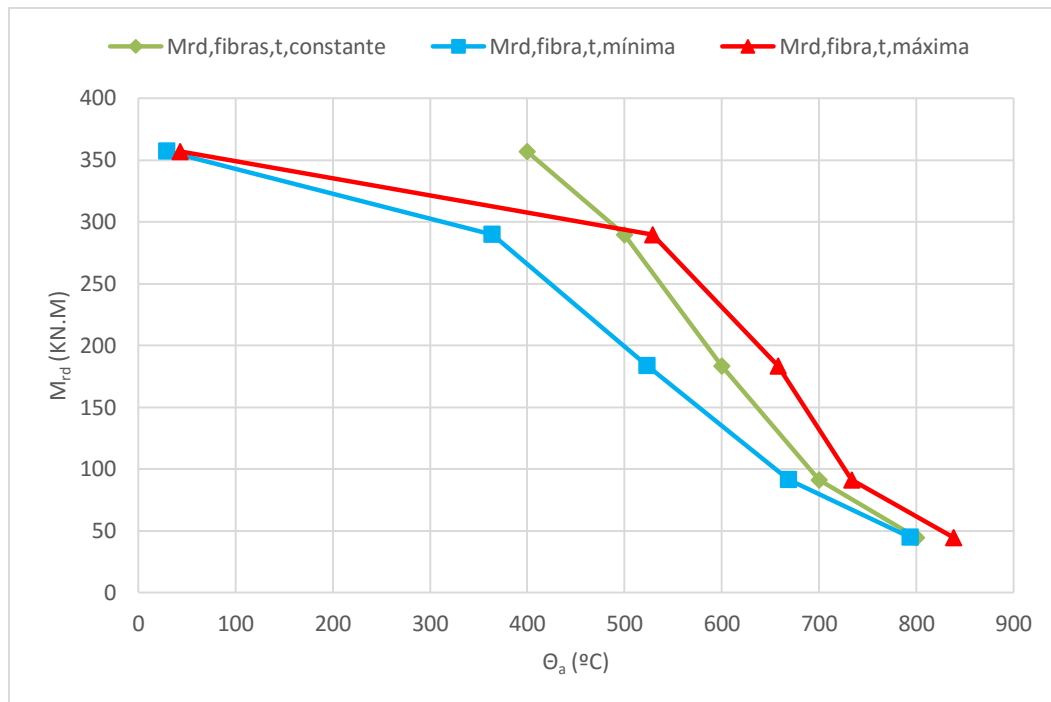


Figura A. 35. Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S3 com banzo em aço inoxidável ferrítico 1.4003.

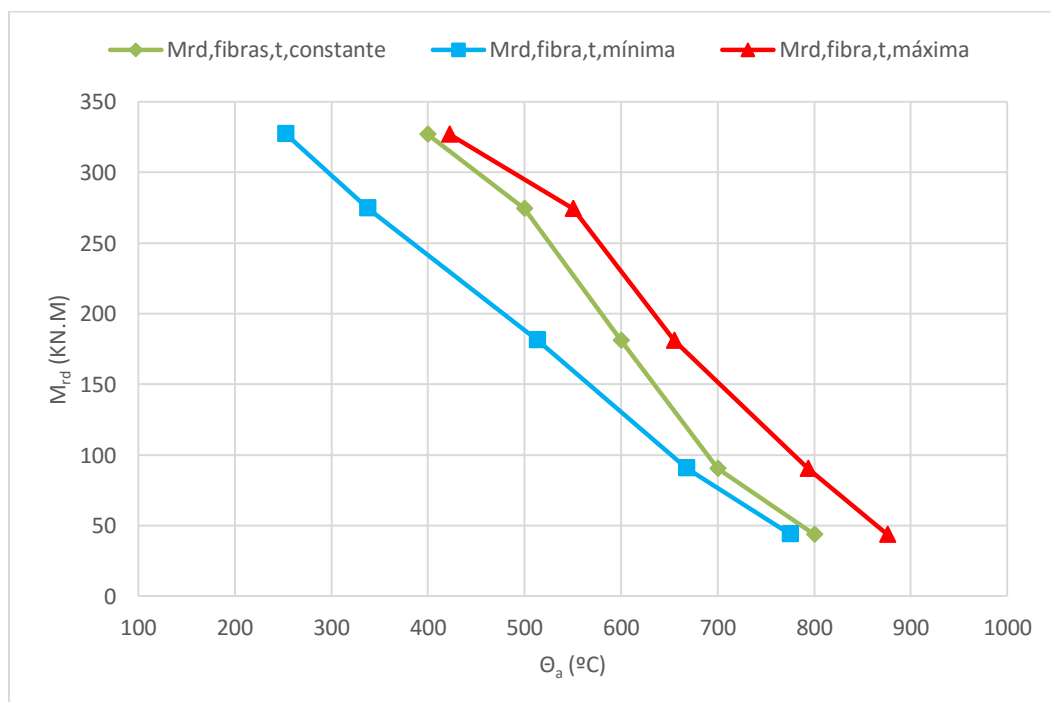


Figura A. 36. Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S4 com banzo em aço inoxidável ferrítico 1.4003.

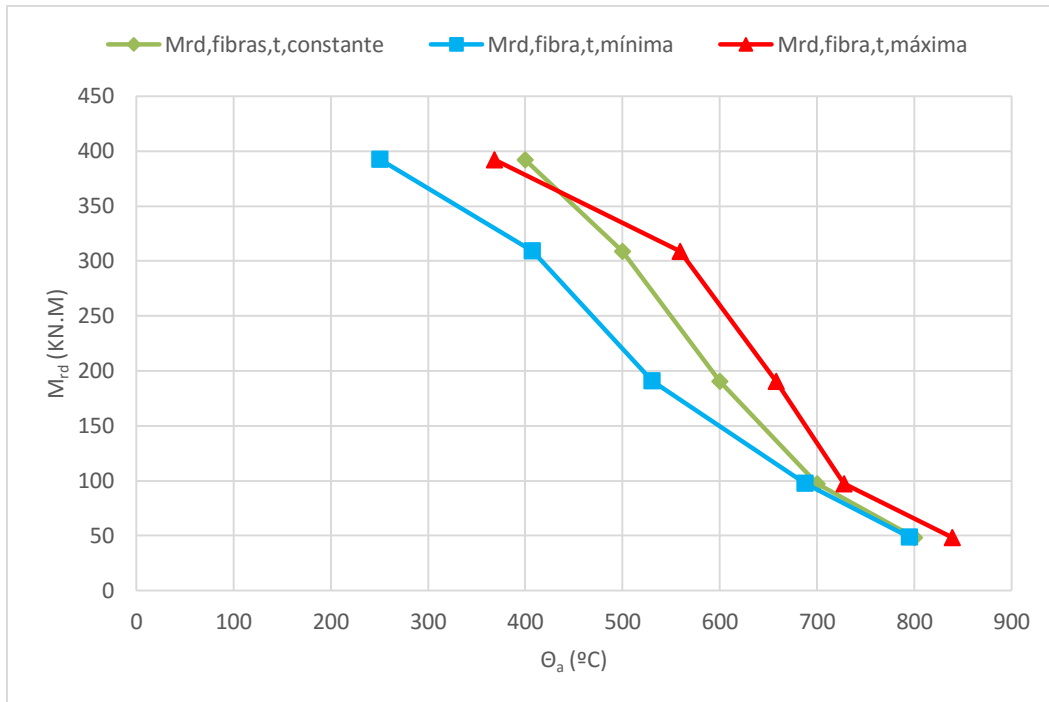


Figura A. 37. Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S2 com banço em aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462.

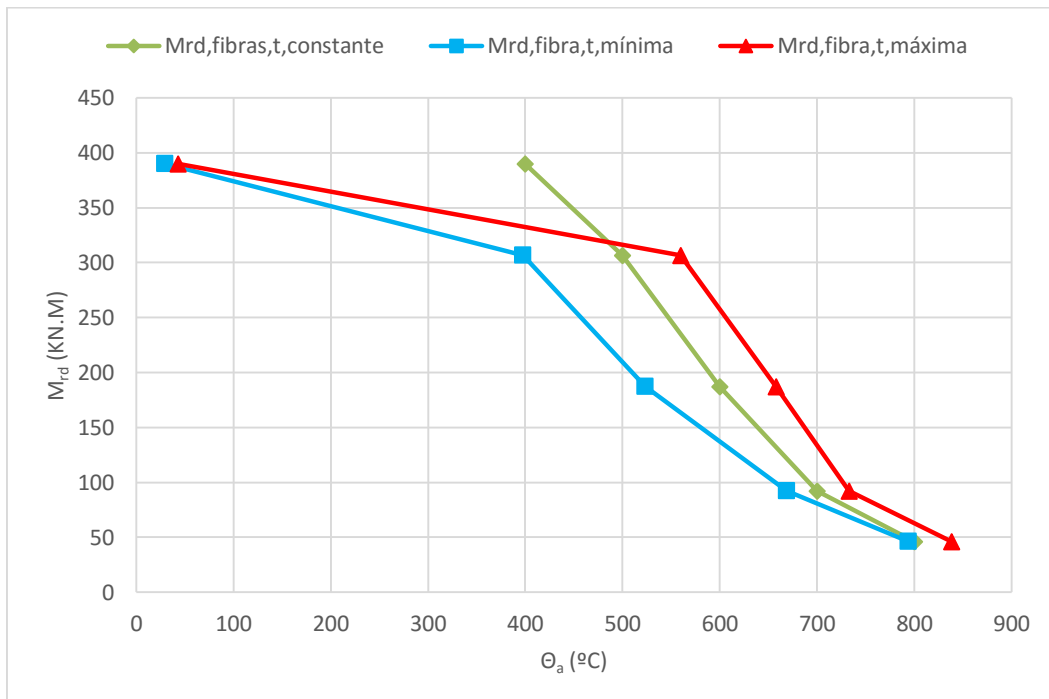


Figura A. 38. Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S3 com banço em aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462.

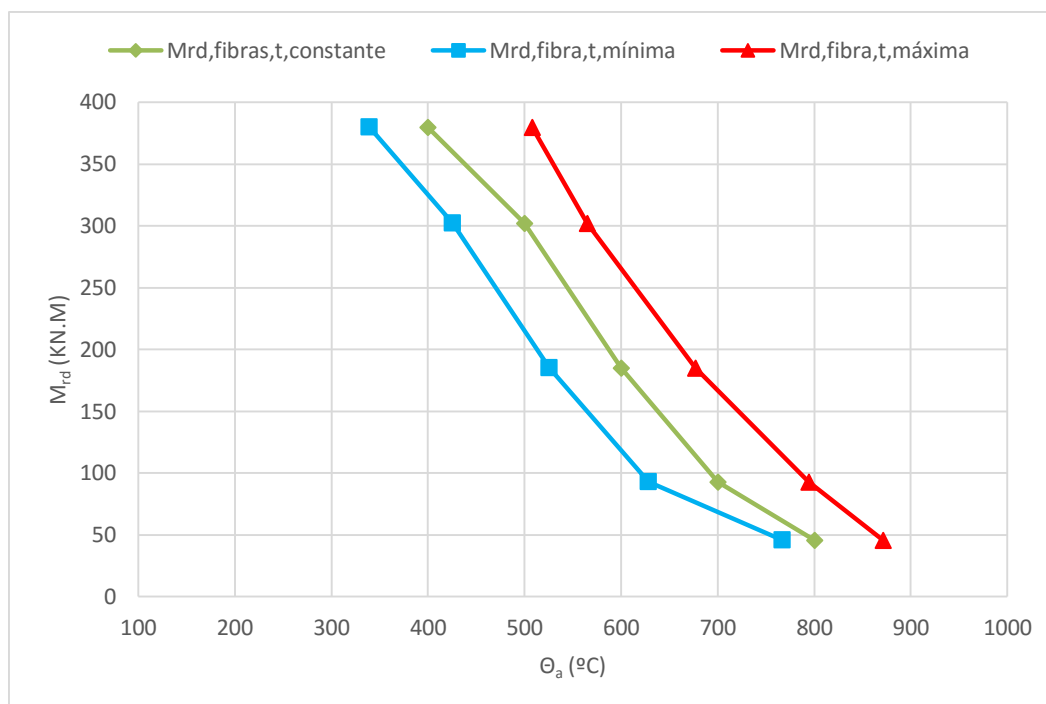


Figura A. 39- Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S4 com banzo em aço inoxidável austenítico-férrico 1.4462.

Apresenta-se em seguida os valores referentes ao ponto 5.2.3.2, exposição ao fogo em 1 lado, para as secções S2, S3 e S4 e para as 3 classes de aço inoxidável em estudo.

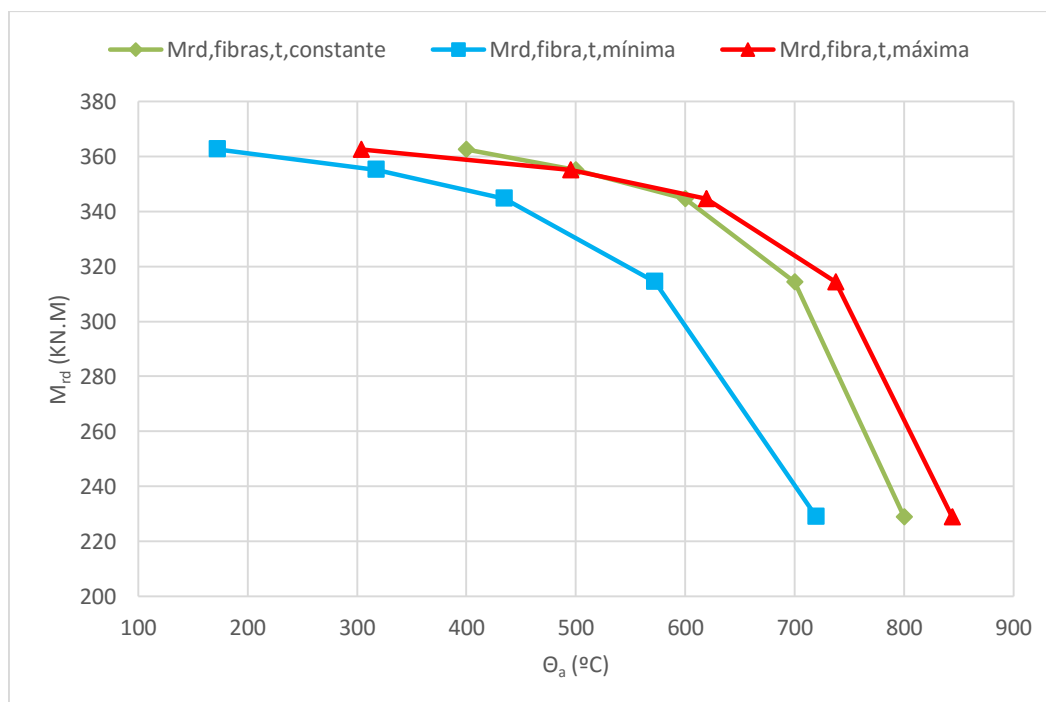


Figura A. 40- Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S2 com banzo em aço inoxidável austenítico 1.4301.

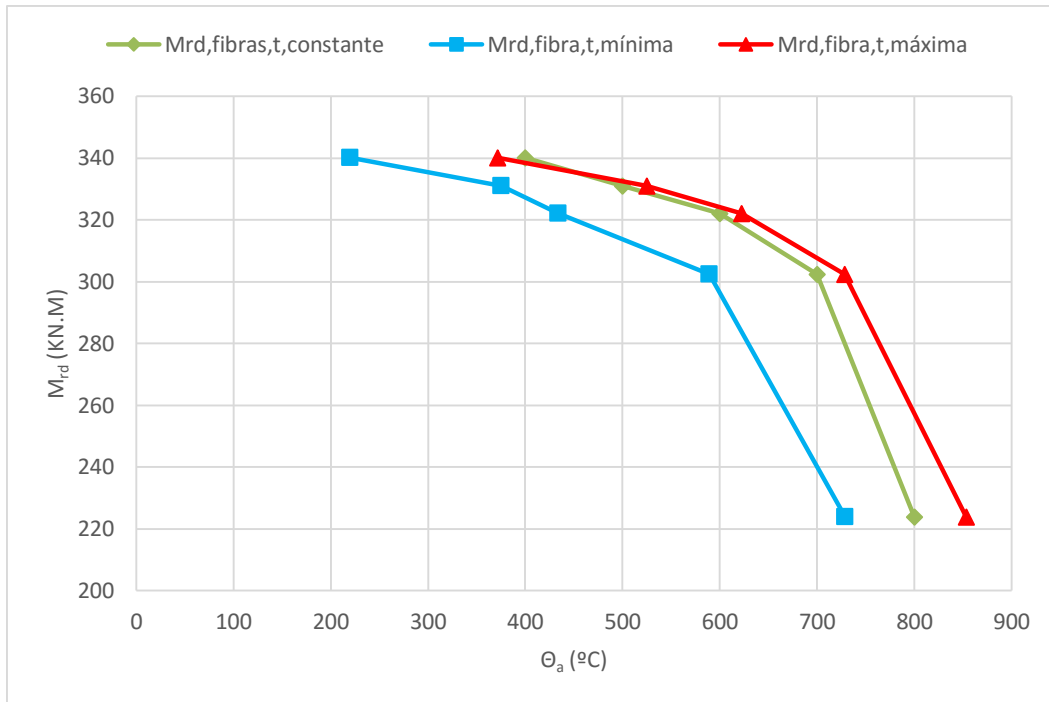


Figura A. 41- Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S3 com banzo em aço inoxidável austenítico 1.4301.

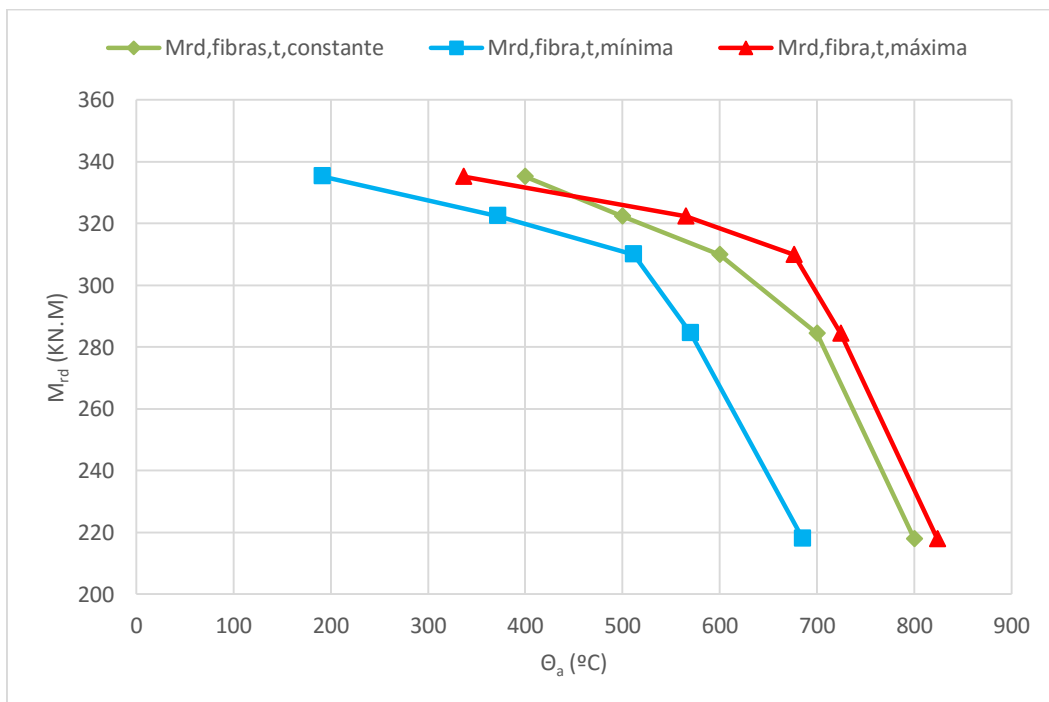


Figura A. 42. Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S4 com banzo em aço inoxidável austenítico 1.4301.

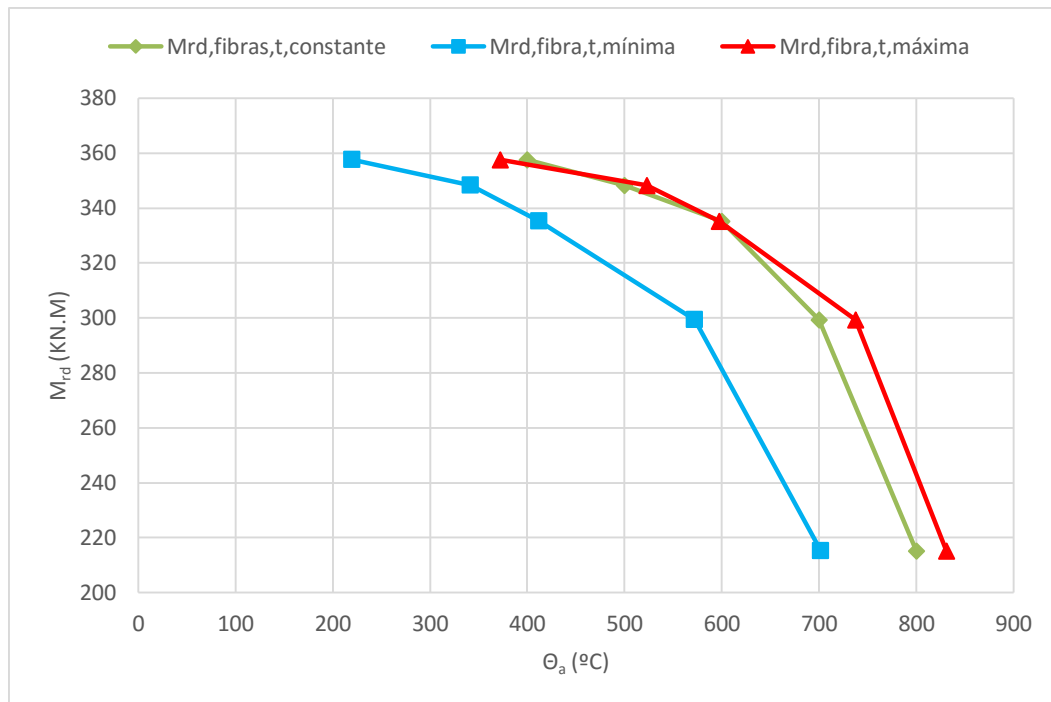


Figura A. 43. Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S2 com banzo em aço inoxidável ferrítico 1.4003.

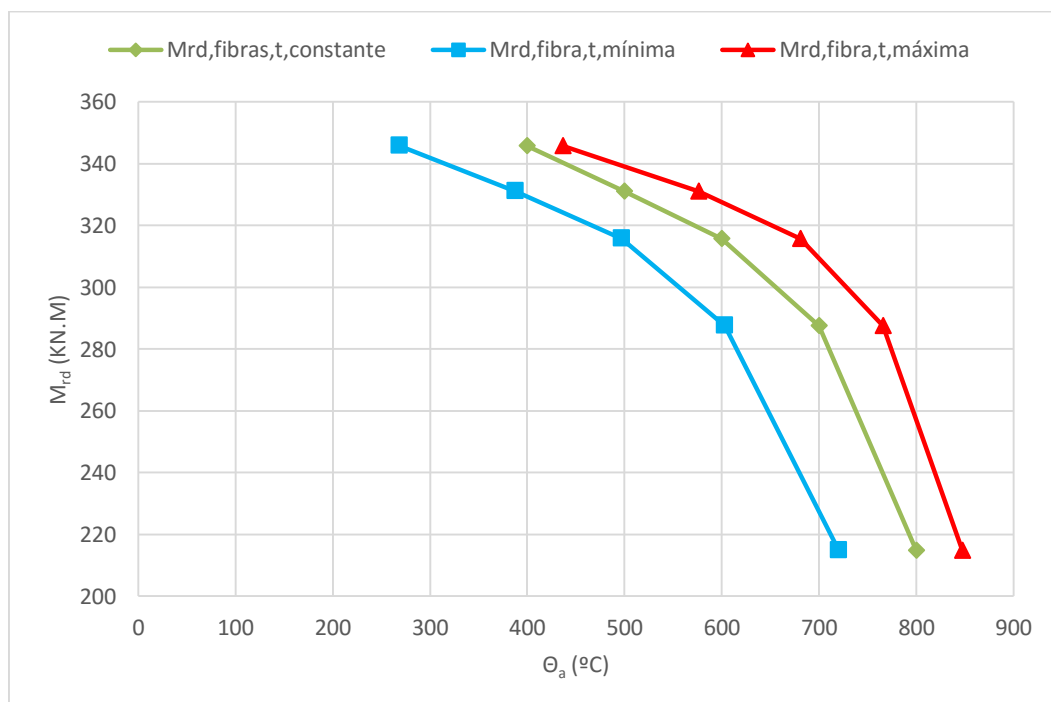


Figura A. 44. Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S3 com banzo em aço inoxidável ferrítico 1.4003.

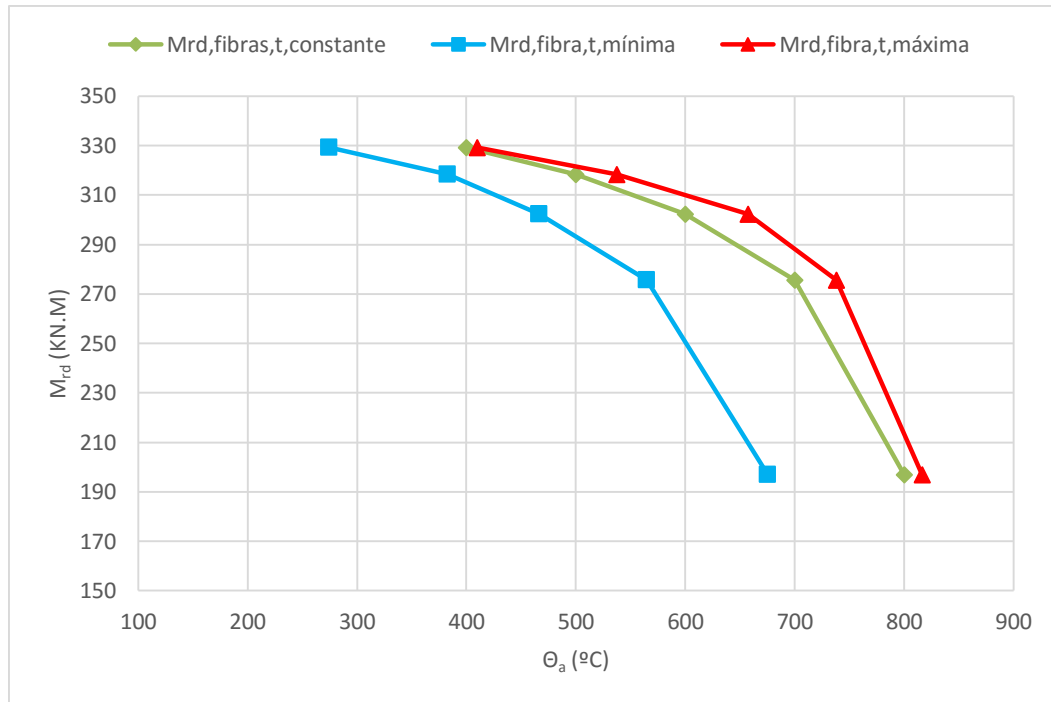


Figura A. 45. Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S4 com banço em aço inoxidável ferrítico 1.4003.

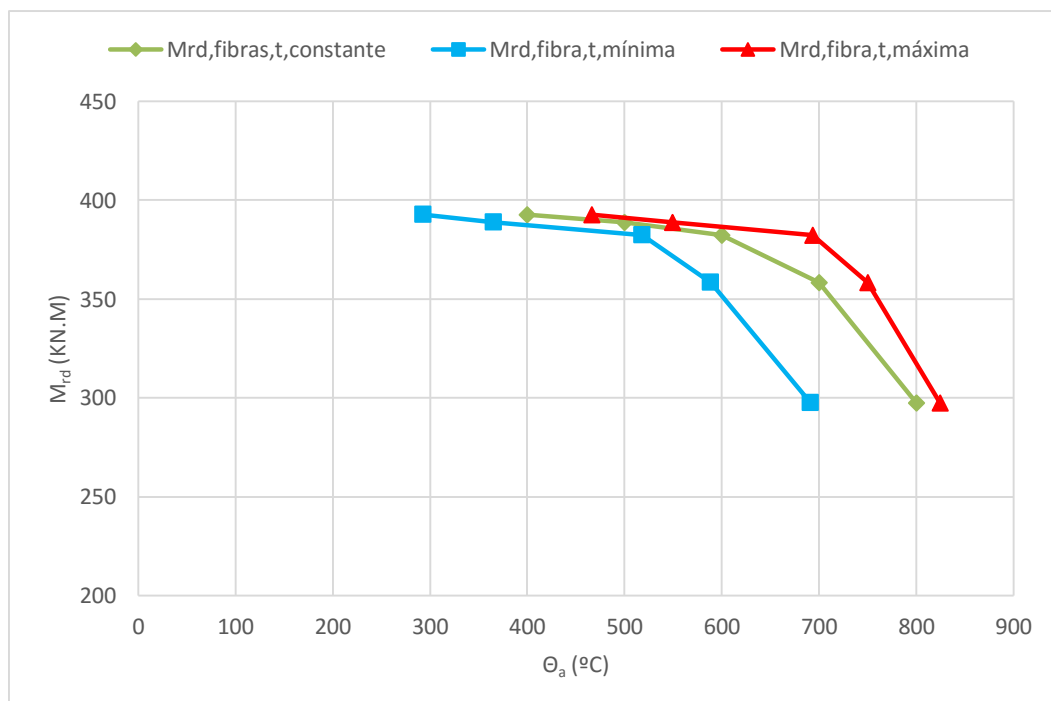


Figura A. 46. Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S2 com banço em aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462.

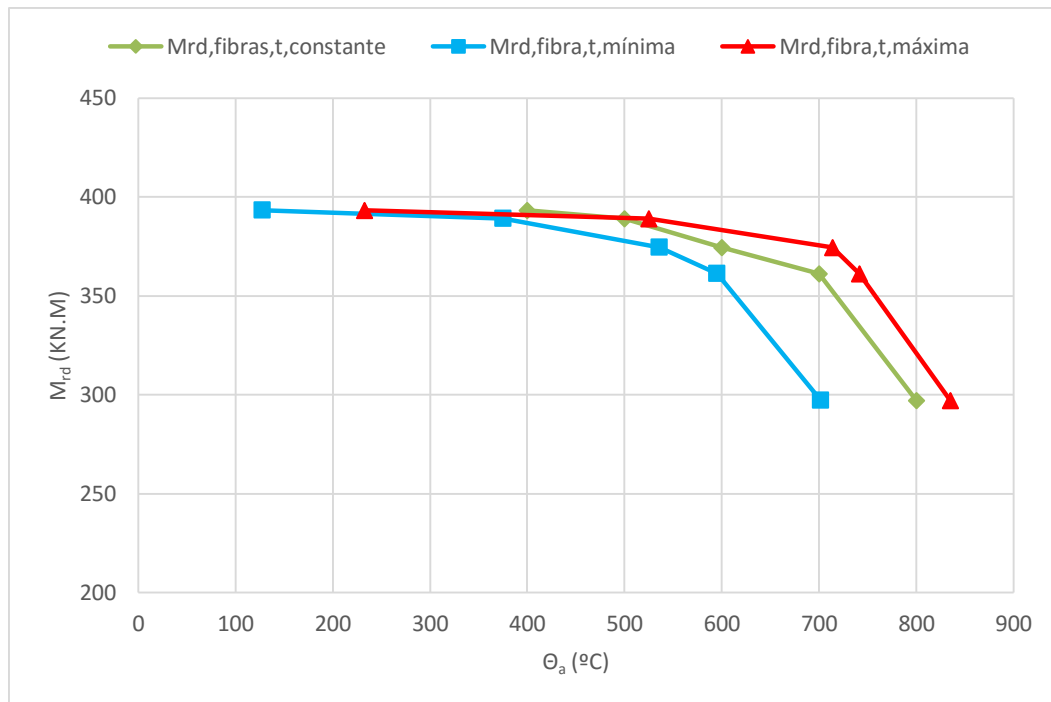


Figura A. 47. Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S3 com banzo em aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462.

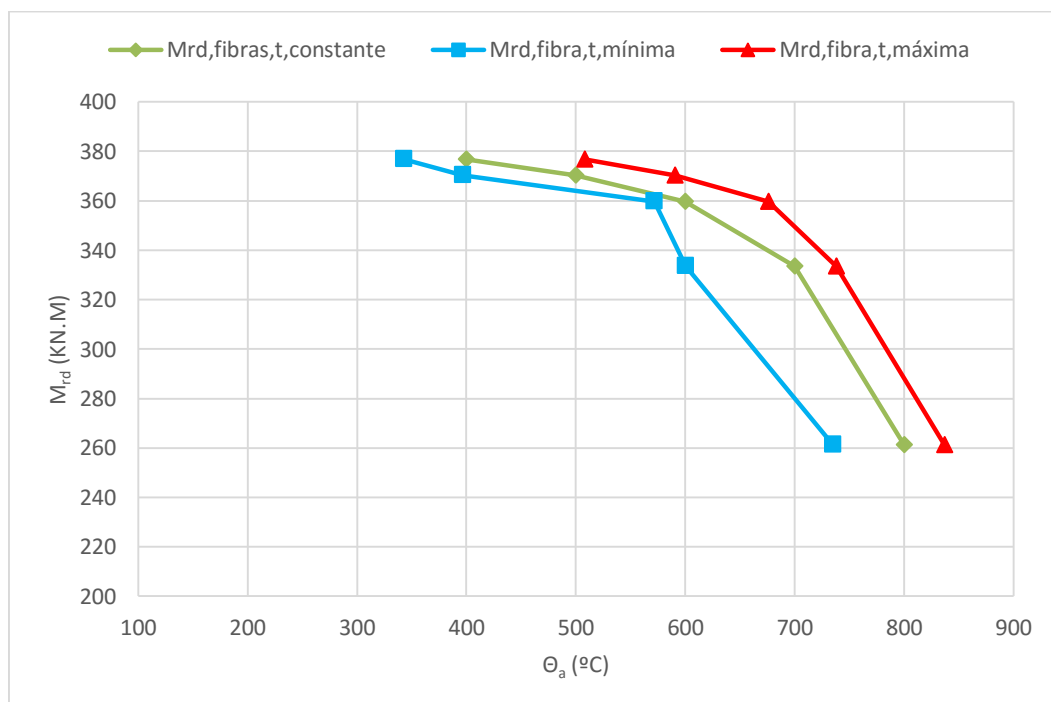


Figura A. 48. Resultados Estado Transitório vs. Carregamento com temperatura constante para a S4 com banzo em aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462.