



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Variação das Propriedades Mecânicas do Aço com a Temperatura

Documento apresentado para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil
na Especialidade de Mecânica Estrutural

Autor

Diogo Barrilaro Ruas Martins

Orientador

Aldina Maria da Cruz Santiago

Sandra Filomena Silva Jordão Alves

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correcções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, Julho, 2012

AGRADECIMENTOS

Para a realização desta tese estiveram envolvidos directa ou indirectamente muitos familiares, amigos, colegas e professores, que, cada um à sua maneira, me ajudaram de modo a que fosse possível elaborar este trabalho.

Aos orientadores desta dissertação, Professora Doutora Aldina Maria da Cruz Santiago e Professora Doutora Sandra Filomena Silva Jordão Alves quero agradecer todo o apoio, disponibilidade e acompanhamento demonstrado assim como todos os conselhos prestados que me guiaram para poder atingir os meus objectivos.

Aos meus Pais e à minha Irmã tenho de agradecer todo o apoio demonstrado, desde o início, estando sempre nos momentos mais felizes e também nos mais complicados, ajudando-me sempre a ultrapassar as dificuldades. O agradecimento estende-se aos meus Avós, aos meus Tios e Primos que me ajudaram sempre que necessário.

Um agradecimento especial à Marta por me ter ajudado e apoiado em todos os momentos, tendo sido muito importante a sua contribuição para esta dissertação.

Aos meus colegas e amigos, António Carvalho, Alexandre Fonseca, Emanuel Saraiva, Jorge Silva e Rui Gaio quero agradecer todo o apoio e disponibilidade que sempre me demonstraram. Aos meus amigos que, embora estando mais longe, me apoiaram sempre em todos os momentos.

Ao Pedro Barata quero agradecer pela ajuda nos ensaios realizados assim como em alguns aspectos relacionados com esta dissertação. Quero igualmente agradecer ao Miguel Serra, à Fernanda Lopes e à Cécile Haremza pela informação facultada e pela ajuda prestada.

RESUMO

Cenários recentes, tais como o incêndio nos armazéns do Chiado em 1998, o acidente e incêndio no World Trade Center em 2001 ou o incêndio num edifício em Broadgate em 1990, têm vindo a demonstrar a necessidade de se considerar o dimensionamento de edifícios em situações de incêndio, não só pela necessidade da consideração dessa nova solicitação, mas também pelo tipo de utilização da estrutura. No caso de edifícios em estrutura metálica, acresce ainda o problema da rápida degradação das propriedades mecânicas com o aumento da temperatura, da elevada esbelteza das secções (ex: $\lambda \approx 80$ para um HEB 240 da classe S355 com 5 metros) e da elevada condutibilidade térmica do aço (52,9 W/mK).

De forma a contribuir para o estudo da temática referida, está em curso na Universidade de Coimbra um projecto de investigação, Impactfire PTDC/ECM/110807/2009, cujo objectivo principal é caracterizar o comportamento de ligações metálicas quando sujeitas a cargas acidentais, nomeadamente impacto e incêndio.

O trabalho apresentado nesta tese insere-se nesse projecto e tem como principal objectivo a caracterização da degradação das propriedades mecânicas do aço com o aumento da temperatura.

Para um melhor conhecimento destes aspectos procedeu-se, numa fase inicial, a uma pesquisa exhaustiva e análise da regulamentação vigente, assim como de diversas publicações na área.

De seguida, realizou-se um tratamento estatístico de resultados obtidos em ensaios de provetes metálicos, em regime estacionário, a temperaturas elevadas já realizados por outros investigadores no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Numa 3ª fase, realizou-se uma nova campanha experimental com classes de resistência e qualidades de aço diferentes das anteriores. Esta campanha experimental serviu para avaliar a degradação das propriedades mecânicas dos aços utilizados no projecto Impactfire (tarefa 2). Os resultados aqui obtidos serão directamente utilizados para a calibração dos modelos numéricos em curso na tarefa 4 deste projecto.

Por fim, os resultados obtidos nestes ensaios foram comparados com os resultados já existentes e com as propostas regulamentares.

ABSTRACT

Recent settings, such as the fire in the Chiado stores in 1998, the accident and fire in the World Trade Centre in 2001 or the fire in a Broadgate's building in 1990, have shown the need to take into account the fire action in the design of buildings, not only for the need of this new request but also for the specific of use of the structure. In the case of buildings with steel structures, the problem becomes even more relevant due to the fast degradation of the mechanical properties with the rise of temperature, of the high slenderness of the sections (for example: $\lambda \approx 80$ for a 5 meter HEB 240 S355) and of high thermal conductivity (52,9 W/mK).

The presented work aims to contribute to the subject above mentioned, and is within the framework of the investigation research project, Impactfire PTDC/ECM/110807/2009, currently in progress at the Universidade de Coimbra. The main purpose of this project is to characterise the behaviour of the components of steel joints under accidental loads, such as impact and fire.

The work presented in this thesis fits in this project and its main goal is to characterise the degradation of the mechanical properties of steel with the rise of temperature.

For a better knowledge of these aspects it was necessary, in an initial phase, to perform some thorough research and analysis of the current regulations and some articles related to the area.

Then, a statistic analysis of the results already obtained through steady-state tests of steel specimens at higher temperatures was performed. The data used derived from tests already performed by other authors in the Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

In a third phase a new experimental campaign was developed with different resistance classes and qualities of steel from the previously mentioned. This experimental campaign was made to characterize the degradation of the mechanical properties of steel used in Impactfire project (task 2). The results obtained will be used in the calibration of numerical models, in progress in task 4 of this project.

Finally, the results obtained in the tests carried out in the framework of this project were compared with the existing results and the values proposed by the design codes.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Enquadramento e Objectivos	1
1.2	Estrutura da tese	2
2	ESTADO DO CONHECIMENTO.....	4
2.1	Regulamentação	4
2.1.1	Eurocódigo 3	4
2.1.2	Australian Standard (Código Australiano)	7
2.1.3	American National Standard (Código Americano)	8
2.1.4	British Standard (Código Britânico).....	9
2.1.5	Code of Practice for the Structural Use of Steel (Código utilizado em Hong Kong)	10
2.1.6	Indian Standard, General Construction in Steel – Code of Practice (Código Indiano)	11
2.1.7	Dimensionamento de estruturas de aço e de estruturas mistas aço-concreto de edifícios em situação de incêndio (Código Brasileiro).....	12
2.1.8	Comparação dos dados apresentados pelos diversos códigos	12
2.2	Ensaaios Experimentais	14
2.2.1	Aço de construção	14
2.2.2	Parafusos.....	26
2.2.3	Discussão dos resultados analisados	30
3	TRABALHOS ANTERIORES (FCTUC).....	32
3.1	Introdução e enquadramento.....	32
3.2	Resultados à temperatura ambiente	34
3.3	Resultados a altas temperaturas	37
3.3.1	Tubos	37
3.3.2	Perfis Laminados e Chapas.....	39
3.4	Degradação das propriedades mecânicas do aço com a temperatura	44
4	PROGRAMA EXPERIMENTAL DE AVALIAÇÃO DA REDUÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO PARA VÁRIOS VALORES DE TEMPERATURA.....	50
4.1	Introdução	50
4.2	Setup experimental	50
4.2.1	Esquema geral de ensaio.....	50
4.2.2	Procedimento de ensaio e correspondente instrumentação	52
4.3	Programa experimental	54

4.4	Resultados.....	56
4.4.1	Tubos	57
4.4.2	Perfis Laminados e Chapas.....	58
4.4.3	Degradação das propriedades do aço com a temperatura.....	60
5	CONCLUSÃO E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	64
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Incêndio nos Armazéns do Chiado (Neves <i>et al.</i> , 1995).....	1
Figura 2.1 - Factores de redução para a relação tensão-extensão do aço carbono a temperaturas elevadas (EN 1993-1-2, 2010)	5
Figura 2.2 - Relação tensão-extensão para o aço carbono a temperaturas elevadas. (Adaptado de EN 1993-1-2, 2010)	7
Figura 2.3 - Variação das propriedades mecânicas do aço com a temperatura (AS 4100-1998)	8
Figura 2.4 - Relação tensão-extensão para o aço a temperaturas elevadas (ANSI/AISC 360-10, 2010).....	9
Figura 2.5 - Variação das propriedades mecânicas do aço com a temperatura.....	12
Figura 2.6 - Comparação dos coeficientes de redução para a tensão de cedência	13
Figura 2.7 - Comparação dos coeficientes de redução para a tensão de cedência	13
Figura 2.8 - Variação dos coeficientes de redução para a tensão de cedência	14
Figura 2.9 - Factores de redução para os aços estudados (Kelly and Sha, 1999).....	15
Figura 2.10 - Comparação dos valores obtidos com os valores propostos pelo EN 1993-1-2, para o aço S355 (Outinen <i>et al.</i> , 2000).....	15
Figura 2.11 - Comparação dos factores de redução obtidos pelo “teste transiente” com os valores propostos pelo EN 1993-1-2, para o aço S460 (Outinen <i>et al.</i> , 2000).....	16
Figura 2.12 - Comparação entre os factores de redução obtidos nos testes, para a tensão de cedência, com os valores propostos pelo EN 1993-1-2 (Outinen and Mäkeläinen, 2002)	17
Figura 2.13 - Relação tensão-extensão do aço (Chen <i>et al.</i> , 2006)	18
Figura 2.14 - Relação tensão-extensão do aço para diversas temperaturas (Chen <i>et al.</i> , 2006)	18
Figura 2.15 - Comparação dos factores de redução experimentais com diversos regulamentos, para a tensão de cedência (Chen <i>et al.</i> , 2006)	19
Figura 2.16 - Comparação dos factores de redução experimentais com diversos regulamentos, para a tensão de cedência (Chen <i>et al.</i> , 2006)	20
Figura 2.17 - Factores de redução para a tensão de cedência, através do “teste transiente” (Schneider and Lange, 2009).....	21
Figura 2.18 - Comparação da relação tensão-extensão obtida pelos testes com a presente no Eurocódigo (Schneider and Lange, 2009)	21
Figura 2.19 - Comparação do módulo de elasticidade (Qiang <i>et al.</i> , 2011).....	22
Figura 2.20 - Factores de redução para o módulo de elasticidade dos aços S460 e S690 (Qiang <i>et al.</i> , 2012b).....	23

Figura 2.21 - Factores de redução para a tensão de cedência de acordo com a extensão (Qiang <i>et al.</i> , 2012b).....	25
Figura 2.22 - Factores de redução para a tensão de cedência de acordo com a extensão (Qiang <i>et al.</i> , 2012b).....	25
Figura 2.23 - Factores de redução da tensão última para os aços S460 e S690 (Qiang <i>et al.</i> , 2012b).....	26
Figura 2.24 - Parafusos de classe 4.6 e 8.8 a altas temperaturas (British Steel Technical Swinden Laboratories, 1993).....	27
Figura 2.25 - Comparação dos factores de redução para os parafusos de classe 8.8 a extensões de 0,5% e 5,0% com o EN 1993-1-2 (Kirby, 1995)	28
Figura 2.26 – a) Relação tensão-extensão; b) comparação dos factores de redução para os parafusos de classe 10.9 com o Eurocódigo (González and Lange, 2009)	29
Figura 2.27 - Comparação dos factores de redução obtidos com os propostos no Eurocódigo (Hanus <i>et al.</i> , 2011)	30
Figura 3.1 – Curvas tensão-extensão para tubos com 8 mm	35
Figura 3.2 – Curvas tensão-extensão para tubos com 10 e 12 mm	35
Figura 3.3 – Curvas tensão-extensão para perfis laminados e chapas da classe S275 com menos de 16 mm.....	35
Figura 3.4 – Curvas tensão-extensão para perfis laminados e chapas com mais de 16 mm	36
Figura 3.5 – Curvas tensão-extensão para perfis laminados e chapas da classe S355 com menos de 16 mm.....	36
Figura 3.6 – Curvas tensão-extensão para perfis laminados da classe S460.....	36
Figura 3.7 – Curvas tensão-extensão para tubos a 200 °C	37
Figura 3.8 – Curvas tensão-extensão para tubos a 400 °C	38
Figura 3.9 – Curvas tensão-extensão para tubos a 600 °C	38
Figura 3.10 – Curvas tensão-extensão para tubos a 800 °C	39
Figura 3.11 – Curvas tensão-extensão para perfis laminados e chapas a 100 °C.....	39
Figura 3.12 – Curvas tensão-extensão para perfis laminados e chapas a 200 °C.....	40
Figura 3.13 – Curvas tensão-extensão para perfis laminados e chapas a 300 °C.....	40
Figura 3.14 – Curvas tensão-extensão para perfis laminados e chapas a 400 °C.....	41
Figura 3.15 – Curvas tensão-extensão para perfis laminados e chapas a 500 °C da classe S355	41
Figura 3.16 – Curvas tensão-extensão para perfis laminados e chapas a 500 °C da classe S460	41
Figura 3.17 – Curvas tensão-extensão para perfis laminados e chapas a 600 °C.....	42
Figura 3.18 – Curvas tensão-extensão para perfis laminados e chapas a 700 °C da classe S355	42
Figura 3.19 – Curvas tensão-extensão para perfis laminados e chapas a 700 °C da classe S460	43
Figura 3.20 – Curvas tensão-extensão para perfis laminados e chapas a 800 °C.....	43
Figura 3.21 – Curvas tensão-extensão para perfis laminados e chapas.....	44

Figura 3.22 – Curva esquemática para se determinar as propriedades do aço estudadas.....	44
Figura 3.23 – Curvas tensão-extensão para perfis laminados e chapas da classe S355	45
Figura 3.24 – Curvas tensão-extensão para perfis laminados da classe S460.....	46
Figura 3.25 – Curvas tensão-extensão para tubos	47
Figura 3.26 – Variação das extensões com a temperatura.....	48
Figura 3.27 – Factores de redução	49
Figura 3.28 – Factores de redução	49
Figura 4.1 – Esquema geral do ensaio para altas temperaturas	51
Figura 4.2 – a) Forno aberto; b) parte esquerda, móvel; c) parte direita fixa.....	51
Figura 4.3 – Curva deslocamento-tempo.....	52
Figura 4.4 – Aumento de temperatura nos ensaios (450 °C e 600 °C).....	53
Figura 4.5 – Extensómetro de alta temperatura e suas componentes	53
Figura 4.6 – a) Máquina de refrigeração; b) ajuste vertical; c) ajuste horizontal.....	54
Figura 4.7 – a) Máquina de soldar termopares; b) termopares; c) posição dos termopares	54
Figura 4.8 – Exemplo de um provete a ensaiar a temperatura ambiente (Banzo IPE 300).....	56
Figura 4.9 – Modo de rotura dos provetes de tubos de 8 mm à temperatura ambiente.....	56
Figura 4.10 – Modo de rotura dos provetes de Chapa 15 mm a 450 °C	56
Figura 4.11 – Modo de rotura dos provetes de Chapa 15 mm a 600 °C	57
Figura 4.12 – Curvas tensão-extensão à temperatura ambiente	57
Figura 4.13 – Curvas tensão-extensão para tubos SHS 200x200x8 a 450 °C.....	58
Figura 4.14 – Curvas tensão-extensão para tubos SHS 200x200x10.....	58
Figura 4.15 – Curvas tensão-extensão para perfis e chapas a temperatura ambiente.....	59
Figura 4.16 – Curvas tensão-extensão para perfis laminados e chapas a 450 °C.....	59
Figura 4.17 – Curvas tensão-extensão para perfis laminados e chapas a 600 °C.....	59
Figura 4.18 – Curvas tensão-extensão para perfis laminados e chapas com menos de 16 mm.....	60
Figura 4.19 – Factores de redução para perfis laminados e chapas.....	61
Figura 4.20 – Factores de redução para perfis laminados e chapas.....	61
Figura 4.21 – Curvas tensão-extensão para tubos	62
Figura 4.22 – Factores de redução	63
Figura 4.23 – Factores de redução.....	63

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Factores de redução para a relação tensão-extensão do aço carbono a temperaturas elevadas (EN 1993-1-2, 2010)	5
Quadro 2.2 - Equações propostas para determinar a relação tensão-extensão do aço (EN 1993-1-2, 2010)	6
Quadro 2.3 - Equações propostas para determinar a relação tensão-extensão do aço tendo em conta o endurecimento (EN 1993-1-2, 2010)	6
Quadro 2.4 - Factores de redução da resistência para parafusos e soldas (EN 1993-1-2, 2010)	7
Quadro 2.5 - Propriedades do aço a temperaturas elevadas (ANSI/AISC 360-10, 2010).....	9
Quadro 2.6 - Factores de redução para a resistência de aços S275 e S355 (BS 5950-8, 2003)	10
Quadro 2.7 - Factores de redução para a resistência de parafusos de classe 4.6 e 8.8 e soldas (BS 5950-8, 2003)	10
Quadro 2.8 - Factores de redução para aço laminado a quente a altas temperaturas (Code of Practice for the Structural Use of Steel, 2010)	11
Quadro 2.9 - Factores de redução para parafusos e soldas a temperaturas elevadas (Code of Practice for the Structural Use of Steel, 2010)	11
Quadro 2.10 – Resumo dos trabalhos estudados	14
Quadro 2.11 - Características dos aços estudados (Outinen and Mäkeläinen, 2002).....	16
Quadro 2.12 - Factores de redução para as propriedades mecânicas do aço estrutural S350GD+Z de 20 °C a 1000 °C (Outinen and Mäkeläinen, 2002)	16
Quadro 2.13 - Propriedades mecânicas do aço estrutural S355J2H de 20 °C a 1000 °C (Outinen and Mäkeläinen, 2002)	17
Quadro 2.14 - Características dos materiais estudados (Chen <i>et al.</i> , 2006)	18
Quadro 2.15 - Factores de redução para o módulo de elasticidade e tensão de cedência para o aço XLERPLATE Grade 350 (Chen <i>et al.</i> , 2006).....	18
Quadro 2.16 - Factores de redução para o módulo de elasticidade e tensão de cedência para o aço BISPLATE 80 (Chen <i>et al.</i> , 2006).....	19
Quadro 2.17 - Factores de redução para o módulo de elasticidade obtidos pelo “teste transiente” (Chen <i>et al.</i> , 2006).....	20
Quadro 2.18 – Resultados obtidos para a tensão última do “teste transiente” e “teste estacionário” (Chen <i>et al.</i> , 2006)	20
Quadro 2.19 - Factores de redução para o módulo de elasticidade para o “teste estacionário” e “teste transiente”, respectivamente (Qiang <i>et al.</i> , 2011)	22
Quadro 2.20 - Redução do módulo de elasticidade dos aços S460 e S690 (Qiang <i>et al.</i> , 2012b)	23

Quadro 2.21 - Tensão de cedência efectiva para os aços S460 e S690 (Qiang <i>et al.</i> , 2012b)..	24
Quadro 2.22 - Factores de redução para a tensão de cedência efectiva para os aços S460 e S690 (Qiang <i>et al.</i> , 2012b).....	24
Quadro 2.23 - Redução da tensão última para os aços S460 e S690.....	26
Quadro 2.24 – Resumo dos ensaios estudados	27
Quadro 2.25 - Parafusos de classe 8.8 ensaiados (Kirby, 1995)	28
Quadro 2.26 - Características dos parafusos de classe 10.9 utilizados nos testes	29
Quadro 3.1 – Quadro resumo de todos os resultados tratados.....	32
Quadro 3.2 – Factores de redução para perfis laminados e chapas de classe S355.....	45
Quadro 3.3 – Factores de redução para perfis laminados de classe S460	46
Quadro 3.4 – Factores de redução para tubos de 8 mm e conjunto de 10 e 12 mm de espessura	47
Quadro 4.1 - Provetes ensaiados.....	55
Quadro 4.2 – Factores de redução para perfis laminados e chapas	60
Quadro 4.3 – Factores de redução para tubos com 8 e 10 mm de espessura.....	62

SIMBOLOGIA

Letras minúsculas latinas

f_y	Tensão de cedência a 20 °C
$f_{y,\theta}$	Tensão de cedência efectiva do aço a altas temperaturas θ_a
$f_{p,\theta}$	Tensão limite de proporcionalidade do aço a altas temperaturas θ_a
$f_{u,\theta}$	Tensão de rotura a altas temperaturas, tendo em conta o endurecimento
$k_{b,\theta}$	Factor de redução determinado para a temperatura adequada dos parafusos
$k_{E,\theta}$	Inclinação da recta que representa o domínio elástico, referida à inclinação a 20 °C
$k_{p,\theta}$	Tensão limite de proporcionalidade, referida à tensão de cedência a 20 °C
$k_{u,\theta}$	Tensão última, referida à tensão de cedência a 20 °C
$k_{y,\theta}$	Tensão de cedência efectiva, referida à tensão de cedência a 20 °C

Letras maiúsculas latinas

E_a	Módulo de elasticidade do aço à temperatura ambiente
$E_{a,\theta}$	Inclinação da recta que representa o domínio elástico para o aço a altas temperaturas θ_a
E_T	Módulo de elasticidade do aço à temperatura T
$F_p(T)$	Tensão limite de proporcionalidade à temperatura T
$F_u(T)$	Tensão última do aço à temperatura T
$F_y(T)$	Tensão de cedência efectiva do aço à temperatura T
T	Temperatura do elemento [°C]

Letras minúsculas gregas

$\varepsilon_{p,\theta}$	Extensão limite de proporcionalidade
$\varepsilon_{s,\theta}$	Extensão limite para o patamar de cedência, tendo em conta o endurecimento
$\varepsilon_{t,\theta}$	Extensão limite para o patamar de cedência
$\varepsilon_{u,\theta}$	Extensão última
$\varepsilon_{y,\theta}$	Extensão de cedência
θ_a	Temperatura do aço [°C]
σ	Valor da tensão

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento e Objectivos

O aço é um material utilizado desde longa data na construção e o seu comportamento à temperatura ambiente é comumente conhecido. No entanto, em situações de incêndio, a investigação desenvolvida é relativamente recente. Os principais aspectos que motivaram um estudo mais aprofundado sobre o comportamento de estruturas metálicas sob o efeito desta acção excepcional foram a segurança dos ocupantes e a procura de soluções relativamente económicas quando se pretende um dimensionamento em situação de incêndio. No que se refere à segurança dos ocupantes, um dos casos mais conhecidos, relacionados com o tema, foi o 11 de Setembro de 2001 onde o World Trade Center caiu devido ao impacto de aviões e consequente incêndio da estrutura. Em Portugal, o caso mais conhecido é o do incêndio nos Armazéns do Chiado, que destruiu por completo um conjunto de edifícios, muitos deles em estrutura metálica (Figura 1.1).

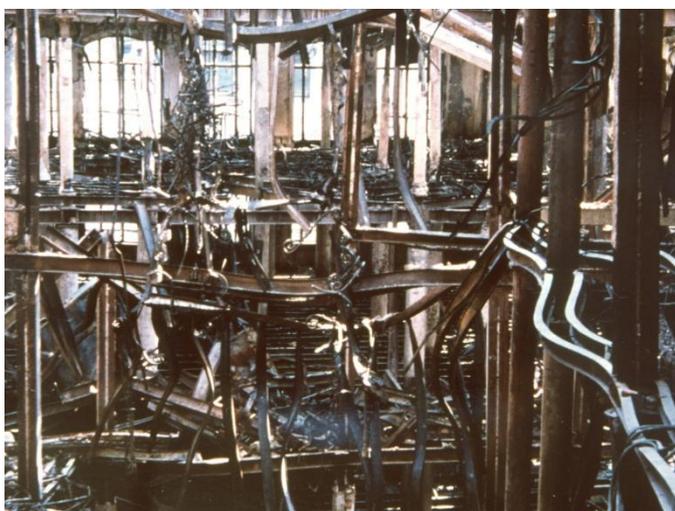


Figura 1.1 – Incêndio nos Armazéns do Chiado (Neves *et al.*, 1995)

Um das possibilidades para reduzir o efeito das altas temperaturas na estrutura metálica é a utilização de protecção contra incêndio, no entanto, a sua aplicação pode aumentar o custo da estrutura em 50% do custo do aço (Kelly and Sha, 1999).

De forma a minimizar estes custos, a investigação tem-se direccionado para a adopção de estratégias alternativas mais racionais e económicas em detrimento das soluções prescritas utilizadas no passado. Deste modo, no Reino Unido houve uma redução de 50% no custo total da construção metálica nas últimas décadas. Neste tempo o custo da protecção ao fogo de estruturas de aço baixou de 31% para 22% do custo total da construção (Vila Real, 2003).

O aço quando sujeito a temperaturas elevadas apresenta um desempenho pouco satisfatório: apresenta uma elevada condutibilidade térmica (52,9 W/mK comparativamente aos 2,0 W/mK de condutibilidade térmica do betão) e consequentemente a temperatura propaga-se muito depressa; possui secções transversais muito esbeltas (ex: $\lambda \approx 80$ para um HEB 240 da classe S355 com 5 metros) e as suas propriedades mecânicas degradam-se rapidamente com o aumento da temperatura. A capacidade resistente do aço a 700 °C corresponde a 23% da sua capacidade resistente à temperatura ambiente, a 800 °C já só possui 11% e a 900 °C restam somente 6% da capacidade resistente (Vila Real, 2003).

Um dos aspectos importantes no dimensionamento em situação de incêndio é o correcto conhecimento da relação tensão-extensão no aço para as várias temperaturas. Vários investigadores têm realizado ensaios experimentais, (em regime estacionário e/ou transiente) para averiguar o efeito da temperatura na degradação das propriedades mecânicas do aço. Esse efeito está reproduzido através de factores de redução, em relação às propriedades mecânicas à temperatura ambiente, nos principais regulamentos: o Eurocódigo (EN 1993-1-2, 2010), o Código Americano (ANSI/AISC 360-10, 2010), e o Código Britânico (BS 5950-8, 2003). Nestes regulamentos apenas se faz a distinção entre factores de redução a utilizar no caso de aço macio de construção e no caso de parafusos. Este trabalho pretende aprofundar mais este assunto, aferindo qual o efeito da classe de resistência e da classe de qualidade do aço, na degradação das propriedades mecânicas com o aumento da temperatura.

Assim, um dos objectivos deste trabalho é avaliar a degradação das propriedades mecânicas do aço com o aumento da temperatura para se utilizar os resultados no projecto de investigação Impactfire PTDC/ECM/110807/2009. Os resultados experimentais serão usados na definição e validação de modelos numéricos, que possibilitem a realização de estudos paramétricos que complementem o trabalho experimental.

1.2 Estrutura da tese

Esta tese encontra-se dividida em seis capítulos. De seguida faz-se um resumo de cada capítulo.

No **Capítulo 1 – Introdução**, apresenta-se o tema de estruturas metálicas sujeitas à acção de incêndio e de diversos aspectos relacionados com as suas propriedades quando sujeitas a esta

acção. Neste capítulo são ainda apresentados os objectivos do trabalho e a sua correspondente organização.

O **Capítulo 2 – Estudos prévios**, está dividido em dois subcapítulos (2.1 – Regulamentação e 2.2 - Ensaios experimentais). Na parte relativa à Regulamentação analisa-se e compara-se toda a informação que os diversos regulamentos apresentam relativamente à variação das propriedades mecânicas do aço com a temperatura. Na parte dos Ensaios experimentais são analisados trabalhos apresentados na bibliografia actual.

No **Capítulo 3 – Trabalhos anteriores (FCTUC)**, tratam-se os resultados obtidos em ensaios a temperatura ambiente e ensaios estacionários a temperaturas elevadas, já realizados na FCTUC. Estes dois tipos de ensaios foram separados em subcapítulos, elaborando-se gráficos de modo a analisar e comparar o comportamento dos diversos tipos de provetes ensaiados.

No **Capítulo 4 – Programa experimental**, descreve-se a campanha experimental enquadrada nesta tese e apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos.

No **Capítulo 5 – Conclusão e desenvolvimentos futuros**, resumem-se todos os resultados obtidos, realizados no âmbito deste trabalho, e apresentam-se as conclusões de acordo com as comparações feitas dos resultados obtidos nos ensaios, com os dados de outros autores e com os valores propostos pelos regulamentos.

2 ESTADO DO CONHECIMENTO

Para se determinar as propriedades mecânicas do aço a altas temperaturas, tais como, a tensão de cedência, tensão de proporcionalidade, tensão última e módulo de elasticidade existem dois tipos de ensaios, o “teste transiente” e o “teste estacionário”.

No “teste transiente” a carga aplicada no provete é constante, aumentando-se a temperatura de acordo com a taxa definida para cada ensaio. No “teste estacionário” a temperatura é mantida constante em certos patamares, enquanto se vai aumentando a carga aplicada a uma certa taxa de deformação.

O “teste transiente” é o mais realista relativamente à situação de incêndio, no entanto é mais difícil de realizar e a definição da curva de temperatura a considerar não é aplicável a todos os ensaios.

2.1 Regulamentação

Nesta parte foram apresentados alguns regulamentos, de forma exaustiva, tais como o Eurocódigo 3 (EN 1993-1-2, 2010), o código Australiano (AS 4100, 1998), o código Americano (ANSI/ASIC 360-10, 2010), o código Britânico (BS 5950-8, 2003), o código utilizado em Hong Kong (Code of Practice for the Structural Use of Steel, 2010), o código Indiano (IS 800, 2007) e o código Brasileiro (NBR 14323, 2003).

2.1.1 Eurocódigo 3

O EN 1993 é um dos documentos normativos que possui mais informação relativa às propriedades do aço a temperaturas elevadas. Existe inclusivamente uma parte específica neste código que trata somente da resistência ao fogo de estruturas de aço (EN 1993 1-2, 2010). O EN 1993-1-2, para além de tratar do dimensionamento de estruturas sujeitas a altas temperaturas, aborda a mudança das propriedades do aço a altas temperaturas, introduzindo o conceito de coeficientes de redução que relaciona o valor das propriedades do aço a altas temperaturas com os valores a 20 °C (Quadro 2.1 e Figura 2.1): tensão de cedência efectiva, tensão limite de proporcionalidade e módulo de elasticidade. No capítulo 3 do EN 1993-1-2 mostra-se a curva tensão-extensão do aço (Figura 2.2a e Quadro 2.2) a utilizar em situação de incêndio. Esta relação é utilizada para taxas de aquecimento entre 2 K/min e 50 K/min. Uma

alternativa proposta para a relação tensão-extensão é a consideração de endurecimento do aço até 400 °C (Figura 2.2b e Quadro 2.3) presente no Anexo A deste mesmo código.

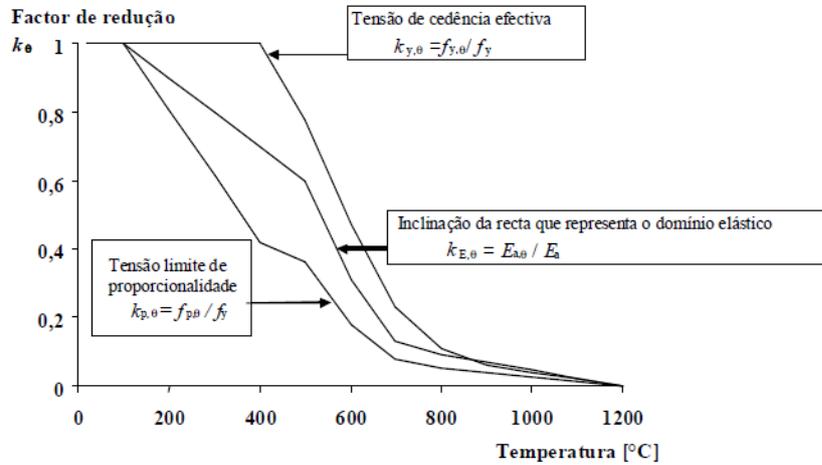


Figura 2.1 - Factores de redução para a relação tensão-extensão do aço carbono a temperaturas elevadas (EN 1993-1-2, 2010)

Quadro 2.1 - Factores de redução para a relação tensão-extensão do aço carbono a temperaturas elevadas (EN 1993-1-2, 2010)

Temperatura do aço θ_a	Factores de redução à temperatura θ_a referidos ao valor de f_y ou E_a a 20 °C		
	Factor de redução (referido a f_y) para a tensão de cedência efectiva $k_{\gamma,\theta} = f_{\gamma,\theta} / f_y$	Factor de redução (referido a f_y) para a tensão limite de proporcionalidade $k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y$	Factor de redução (referido a E_a) para a inclinação da recta que representa o domínio elástico $k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a$
20 °C	1,000	1,000	1,000
100 °C	1,000	1,000	1,000
200 °C	1,000	0,807	0,900
300 °C	1,000	0,613	0,800
400 °C	1,000	0,420	0,700
500 °C	0,780	0,360	0,600
600 °C	0,470	0,180	0,310
700 °C	0,230	0,075	0,130
800 °C	0,110	0,050	0,090
900 °C	0,060	0,0375	0,0675
1000 °C	0,040	0,0250	0,0450
1100 °C	0,020	0,0125	0,0225
1200 °C	0,000	0,0000	0,0000

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

Quadro 2.2 - Equações propostas para determinar a relação tensão-extensão do aço (EN 1993-1-2, 2010)

Domínio de extensões	Tensão σ	Módulo tangente		
$\varepsilon \leq \varepsilon_{p,\theta}$	$\varepsilon E_{a,\theta}$	$E_{a,\theta}$		
$\varepsilon_{p,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{y,\theta}$	$f_{p,\theta} - c + (b/a) [a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2]^{0,5}$	$\frac{b(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)}{a [a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2]^{0,5}}$		
$\varepsilon_{y,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{t,\theta}$	$f_{y,\theta}$	0		
$\varepsilon_{t,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{u,\theta}$	$f_{y,\theta} [1 - (\varepsilon - \varepsilon_{t,\theta}) / (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{t,\theta})]$	-		
$\varepsilon = \varepsilon_{u,\theta}$	0,00	-		
Parâmetros	$\varepsilon_{p,\theta} = f_{p,\theta} / E_{a,\theta}$	$\varepsilon_{y,\theta} = 0,02$	$\varepsilon_{t,\theta} = 0,15$	$\varepsilon_{u,\theta} = 0,20$
Funções	$a^2 = (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta} + c / E_{a,\theta})$ $b^2 = c(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})E_{a,\theta} + c^2$ $c = \frac{(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})^2}{(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})E_{a,\theta} - 2(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})}$			

Quadro 2.3 - Equações propostas para determinar a relação tensão-extensão do aço tendo em conta o endurecimento (EN 1993-1-2, 2010)

– para $0,02 < \varepsilon < 0,04$:

$$\sigma_a = 50(f_{u,\theta} - f_{y,\theta})\varepsilon + 2f_{y,\theta} - f_{u,\theta} \tag{A.1a}$$

– para $0,04 \leq \varepsilon \leq 0,15$:

$$\sigma_a = f_{u,\theta} \tag{A.1b}$$

– para $0,15 < \varepsilon < 0,20$:

$$\sigma_a = f_{u,\theta} [1 - 20(\varepsilon - 0,15)] \tag{A.1c}$$

– para $\varepsilon \geq 0,20$:

$$\tag{A.1d}$$

– para $\theta_a < 300$ °C:

$$f_{u,\theta} = 1,25f_{y,\theta} \tag{A.2a}$$

– para 300 °C $\leq \theta_a < 400$ °C:

$$f_{u,\theta} = f_{y,\theta}(2 - 0,0025 \theta_a) \tag{A.2b}$$

– para $\theta_a \geq 400$ °C:

$$f_{u,\theta} = f_{y,\theta} \tag{A.2c}$$

Adicionalmente, o Eurocódigo também trata das propriedades dos parafusos para altas temperaturas. (Anexo D do EN 1993-1-2), ver Quadro 2.4.

Quadro 2.4 - Factores de redução da resistência para parafusos e soldas (EN 1993-1-2, 2010)

Temperatura θ_a	Factor de redução para parafusos, $k_{b,\theta}$ (tração e corte)	Factor de redução para soldaduras, $k_{w,\theta}$
20	1,000	1,000
100	0,968	1,000
150	0,952	1,000
200	0,935	1,000
300	0,903	1,000
400	0,775	0,876
500	0,550	0,627
600	0,220	0,378
700	0,100	0,130
800	0,067	0,074
900	0,033	0,018
1000	0,000	0,000

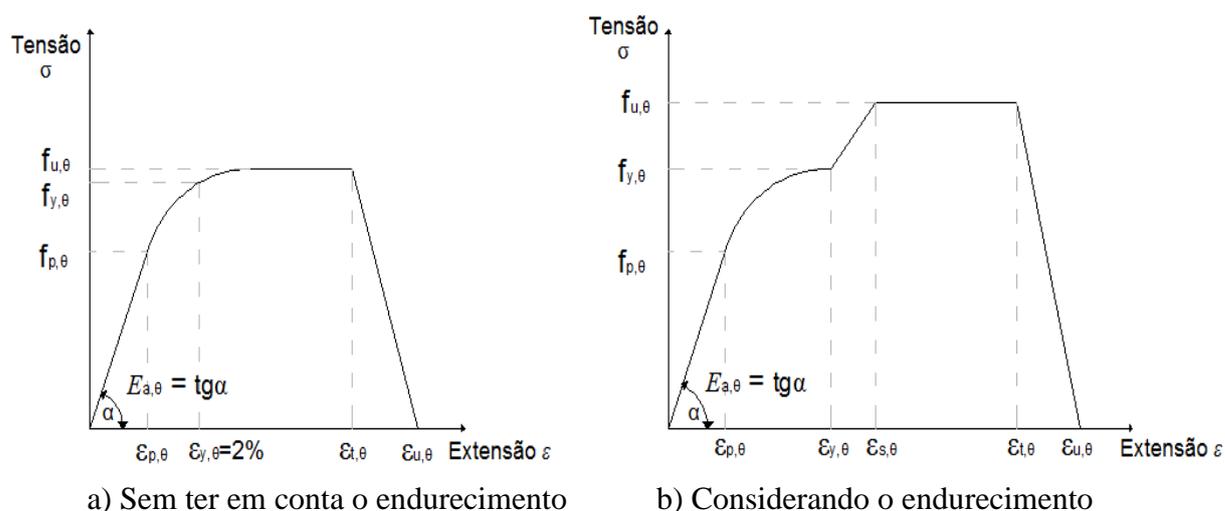


Figura 2.2 - Relação tensão-extensão para o aço carbono a temperaturas elevadas. (Adaptado de EN 1993-1-2, 2010)

2.1.2 Australian Standard (Código Australiano)

O código Australiano de dimensionamento de estruturas metálicas designa-se por AS 4100 (AS 4100, 1998) e a parte 12 é relativa ao dimensionamento em situação de incêndio. Este código apresenta as relações entre a tensão de cedência e o módulo de elasticidade, para diversas temperaturas (Figura 2.3), e na parte 12.4 são propostas fórmulas para as referidas relações, através das quais é possível calcular coeficientes de redução.

Para a tensão de cedência:

$$\frac{f_{y,\theta}}{f_y} = 1,0 \quad \text{quando } 0^\circ\text{C} < T \leq 215^\circ\text{C}$$

$$= \frac{905 - T}{690} \quad \text{quando } 215^\circ\text{C} < T \leq 905^\circ\text{C}$$

Para o módulo de elasticidade:

$$\frac{E_{a,\theta}}{E_a} = 1,0 + \left[\frac{T}{2000 \left[\ln \left(\frac{T}{1100} \right) \right] \right] \quad \text{quando } 0^\circ\text{C} < T \leq 600^\circ\text{C}$$

$$= \frac{690 \left(1 - \frac{T}{1000} \right)}{T - 53,5} \quad \text{quando } 600^\circ\text{C} < T \leq 1000^\circ\text{C}$$

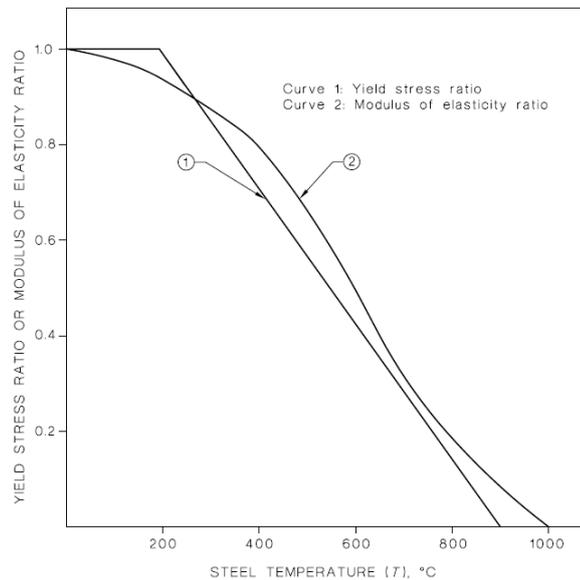


Figura 2.3 - Variação das propriedades mecânicas do aço com a temperatura (AS 4100-1998)

2.1.3 American National Standard (Código Americano)

O código Americano (ANSI/AISC 360-10, 2010) possui muitas semelhanças com o EN 1993-1-2. O dimensionamento de estruturas expostas ao fogo é apresentado no Anexo 4. Neste anexo, tal como no EN 1993-1-2, é apresentada uma curva tensão-extensão para o aço (Figura 2.4). Na parte 4.2.3.2 deste regulamento são abordadas as mudanças de propriedade do aço a altas temperaturas: módulo de elasticidade, tensão de cedência, tensão de proporcionalidade e tensão última (Quadro 2.5). O código Americano não refere nada relativamente à alteração das propriedades dos parafusos para altas temperaturas.

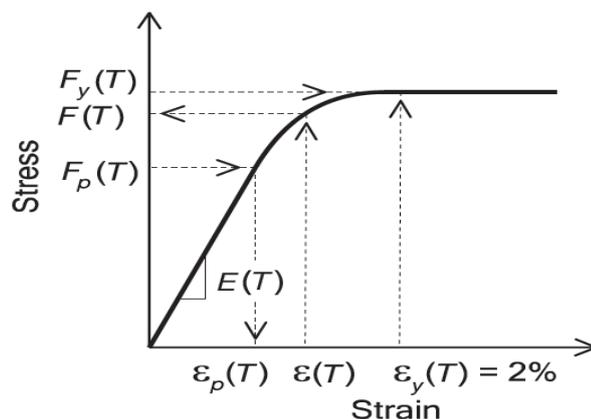


Figura 2.4 - Relação tensão-extensão para o aço a temperaturas elevadas (ANSI/AISC 360-10, 2010)

Quadro 2.5 - Propriedades do aço a temperaturas elevadas (ANSI/AISC 360-10, 2010)

Steel Temperature, °F (°C)	$k_E = E(T)/E = G(T)/G$	$k_p = F_p(T)/F_y$	$k_y = F_y(T)/F_y$	$k_u = F_u(T)/F_y$
68 (20)	1.00	1.00	1.00	1.00
200 (93)	1.00	1.00	1.00	1.00
400 (204)	0.90	0.80	1.00	1.00
600 (316)	0.78	0.58	1.00	1.00
750 (399)	0.70	0.42	1.00	1.00
800 (427)	0.67	0.40	0.94	0.94
1000 (538)	0.49	0.29	0.66	0.66
1200 (649)	0.22	0.13	0.35	0.35
1400 (760)	0.11	0.06	0.16	0.16
1600 (871)	0.07	0.04	0.07	0.07
1800 (982)	0.05	0.03	0.04	0.04
2000 (1093)	0.02	0.01	0.02	0.02
2200 (1204)	0.00	0.00	0.00	0.00

2.1.4 British Standard (Código Britânico)

Tal como o EN 1993-1-2, o código Britânico (BS 5950-8, 2003) possui uma parte relativa à resistência de estruturas de aço quando expostas ao fogo. Neste código apenas se apresenta a variação da resistência para diferentes temperaturas em função do valor de extensão (0.5%, 1.5% e 2.0%) (secção 6, BS 5950-8). Os valores presentes são específicos a aços S275 e S355, nada é referido para aço de classe de resistência superior (Quadro 2.6). No que se refere às características dos parafusos, para altas temperaturas, a informação é apresentada no Quadro 2.7.

Quadro 2.6 - Factores de redução para a resistência de aços S275 e S355 (BS 5950-8, 2003)

Temperature °C	Strength retention factors at a strain (in %) of:		
	0.5	1.5	2.0
100	0.97	1.000	1.000
150	0.959	1.000	1.000
200	0.946	1.000	1.000
250	0.884	1.000	1.000
300	0.854	1.000	1.000
350	0.826	0.968	1.000
400	0.798	0.956	0.971
450	0.721	0.898	0.934
500	0.622	0.756	0.776
550	0.492	0.612	0.627
600	0.378	0.460	0.474
650	0.269	0.326	0.337
700	0.186	0.223	0.232
750	0.127	0.152	0.158
800	0.071	0.108	0.115
850	0.045	0.073	0.079
900	0.030	0.059	0.062
950	0.024	0.046	0.052

Quadro 2.7 - Factores de redução para a resistência de parafusos de classe 4.6 e 8.8 e soldas (BS 5950-8, 2003)

Temperature °C	Strength retention factor for bolts (Tension and shear)	Strength retention factor for welds
20	1.00	1.00
100	0.97	1.00
150	0.95	1.00
200	0.94	1.00
300	0.90	1.00
400	0.78	0.88
500	0.55	0.63
600	0.22	0.38
700	0.10	0.13
800	0.07	0.07
900	0.03	0.02
1 000	0.00	0.00

2.1.5 Code of Practice for the Structural Use of Steel (Código utilizado em Hong Kong)

O código utilizado em Hong Kong (Code of Practice for the Structural Use of Steel, 2010) tem uma estrutura muito parecida com as dos códigos Australiano e Americano. A parte relativa à resistência de elementos ao fogo está presente no capítulo 12 do código de dimensionamento de estruturas metálicas. Os parâmetros analisados neste código são os mesmos do BS 5950-8, a resistência do aço e parafusos. Tal como para os outros códigos, neste existem factores de redução que relacionam os valores da resistência a altas temperaturas com o valor da resistência a 20 °C (Quadro 2.8 e Quadro 2.9).

Quadro 2.8 - Factores de redução para aço laminado a quente a altas temperaturas (Code of Practice for the Structural Use of Steel, 2010)

Temperature (°C)	Strength reduction factors
20 °C	1.00
100 °C	1.00
200 °C	0.89
300 °C	0.78
400 °C	0.65
500 °C	0.53
600 °C	0.30
700 °C	0.13
800 °C	0.07
900 °C	0.05
1000 °C	0.03
1100 °C	0.02
1200 °C	0.00

Quadro 2.9 - Factores de redução para parafusos e soldas a temperaturas elevadas (Code of Practice for the Structural Use of Steel, 2010)

Temperature (°C)	Strength reduction factors for bolts	Strength reduction factors for welds
20 °C	1.00	1.00
100 °C	0.97	1.00
150 °C	0.95	1.00
200 °C	0.94	1.00
300 °C	0.90	1.00
400 °C	0.78	0.88
500 °C	0.55	0.63
600 °C	0.22	0.38
700 °C	0.10	0.13
800 °C	0.07	0.07
900 °C	0.03	0.02
1000 °C	0.00	0.00

2.1.6 Indian Standard, General Construction in Steel – Code of Practice (Código Indiano)

O código utilizado na Índia (IS 800, 2007) possui muitas semelhanças com o código Australiano. O capítulo 16 aborda a resistência ao fogo e na parte 16.4 apresentam-se equações que permitem calcular factores de redução para a tensão de cedência e o módulo de elasticidade.

Para a tensão de cedência:

$$\frac{f_{y,\theta}}{f_y} = 1,0 \quad \text{quando } 0^\circ\text{C} < T \leq 215^\circ\text{C}$$

$$= \frac{905 - T}{905} \quad \text{quando } 215^\circ\text{C} < T \leq 905^\circ\text{C}$$

Para o módulo de elasticidade:

$$\frac{E_{a,\theta}}{E_a} = 1,0 + \left[\frac{T}{2000 \left[\ln \left(\frac{T}{1100} \right) \right]} \right] \quad \text{quando } 0^\circ\text{C} < T \leq 600^\circ\text{C}$$

$$= \frac{690 \left(1 - \frac{T}{1000} \right)}{T - 53,5} \quad \text{quando } 600^\circ\text{C} < T \leq 1000^\circ\text{C}$$

Quando analisado este código foi descoberta uma incoerência. O gráfico apresentado pelo código não está de acordo com a equação relativa à tensão de cedência, proposta pelo mesmo. O gráfico é idêntico ao código Australiano mas as equações dos dois são diferentes (Figura 2.5).

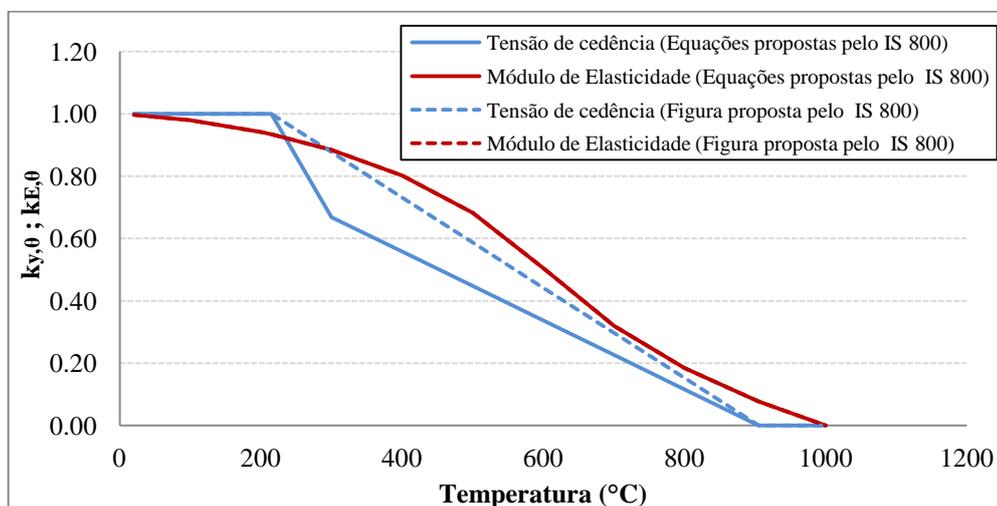


Figura 2.5 - Variação das propriedades mecânicas do aço com a temperatura

2.1.7 Dimensionamento de estruturas de aço e de estruturas mistas aço-concreto de edifícios em situação de incêndio (Código Brasileiro)

O código Brasileiro (NBR 14323, 2003) é idêntico ao Eurocódigo. A única diferença reside no facto de neste não se apresentar o factor de redução para a tensão de proporcionalidade.

2.1.8 Comparação dos dados apresentados pelos diversos códigos

À excepção do código Britânico e do código utilizado em Hong Kong, todos os códigos têm uma apresentação semelhante dos valores de factor de redução (Figura 2.6). O código mais conservador é o Indiano pois os factores baixam para valores perto dos 200 °C; os factores de redução propostos pelo EN 1993-1-2 e AISC 360-10 só baixam para temperaturas superiores

a 400 °C. Embora estes códigos só proponham a redução para temperaturas mais elevadas relativamente aos outros códigos, também consideram uma redução mais rápida da tensão de cedência. A partir dos 700 °C os valores tornam-se muito semelhantes.

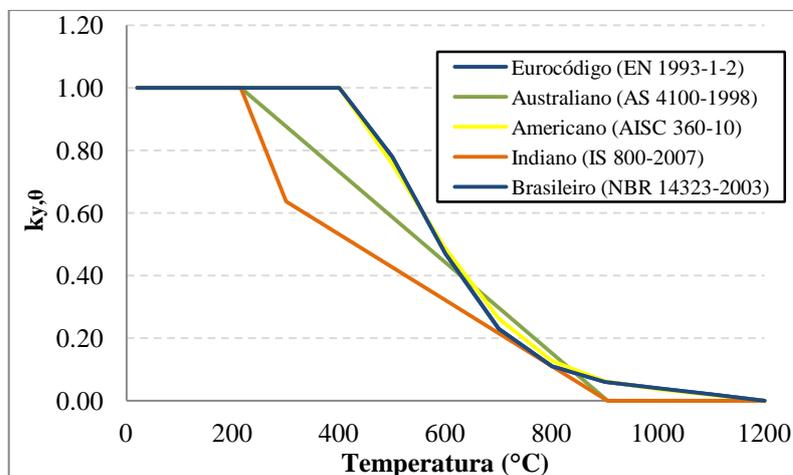


Figura 2.6 - Comparação dos coeficientes de redução para a tensão de cedência

A informação relativa à tensão de proporcionalidade só é apresentada no EN 1993-1-2 e no código Americano (Figura 2.7). Os factores apresentados pelos dois regulamentos são praticamente idênticos, havendo só uma ligeira diferença entre os 400 °C e 800 °C.

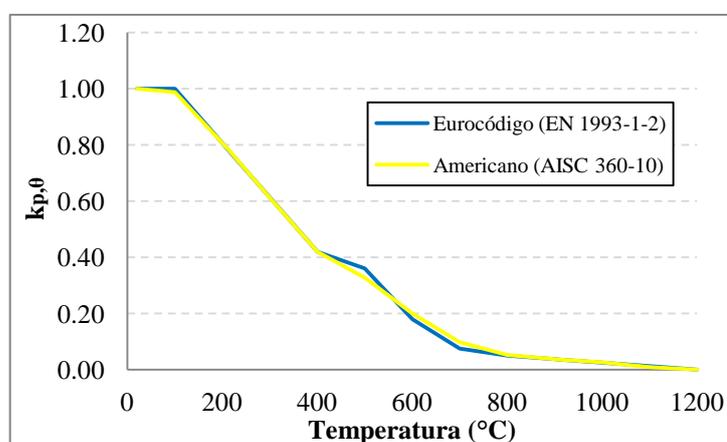


Figura 2.7 - Comparação dos coeficientes de redução para a tensão de cedência

Para o módulo de elasticidade todos os códigos tratados, à excepção do Britânico e do utilizado em Hong Kong, apresentam valores para os factores de redução (Figura 2.8). A informação apresentada no IS 800 e AS 4100 é idêntica, os valores propostos pelo EN 1993-1-2 e pelo AISC 360-10 possuem pequenas diferenças entre si. Estes últimos são mais conservadores.

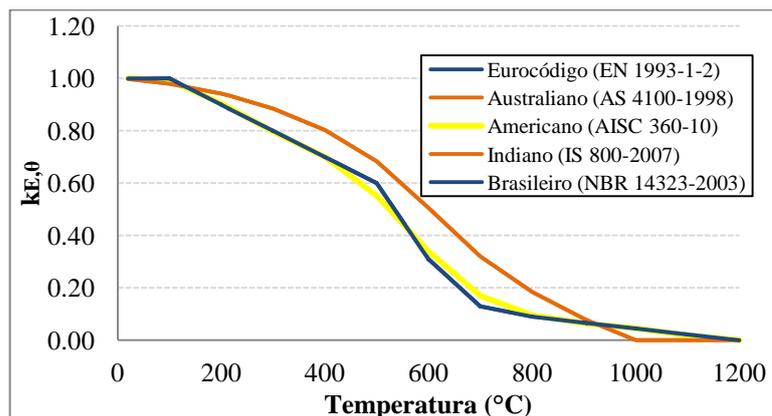


Figura 2.8 - Variação dos coeficientes de redução para a tensão de cedência

2.2 Ensaios Experimentais

2.2.1 Aço de construção

No Quadro 2.10 resumem-se os principais trabalhos experimentais realizados para avaliar as propriedades mecânicas do aço de construção com o aumento de temperatura

Quadro 2.10 – Resumo dos trabalhos estudados

Autor	Classe de aço	Teste	Ano
Kelly e Sha	S275	Teste Estacionário	1999
Outinen <i>et al.</i>	S355 e S460	Teste Estacionário e Teste Transiente	2000
Outinen e Mäkeläinen	S350GD+Z e S355J2H	Teste Transiente	2002
Chen <i>et al.</i>	BISPLATE 80 (S355JR) e XLERPLATE Grade 350 (S690Q)	Teste Estacionário e Teste Transiente	2006
Schneider e Lange	S460M e S460N	Teste Estacionário e Teste Transiente	2009
Qiang <i>et al.</i>	S690	Teste Estacionário e Teste Transiente	2011
Qiang <i>et al.</i>	S460 e S690	Teste Estacionário	2012

Kelly e Sha (1999) compararam as propriedades mecânicas de aço resistente ao fogo com aço macio S275 a altas temperaturas, utilizando o “teste estacionário” (taxa de extensão 1%/min) para determinar a tensão de cedência até 900 $^{\circ}\text{C}$ (Figura 2.9). As propriedades dos aços resistentes ao fogo só diminuem as suas propriedades a partir dos 600 $^{\circ}\text{C}$, enquanto as

propriedades do aço S275 diminuem logo a partir de 400 °C. Para temperatura perto de 750 °C os factores de redução são idênticos para os dois tipos de aço.

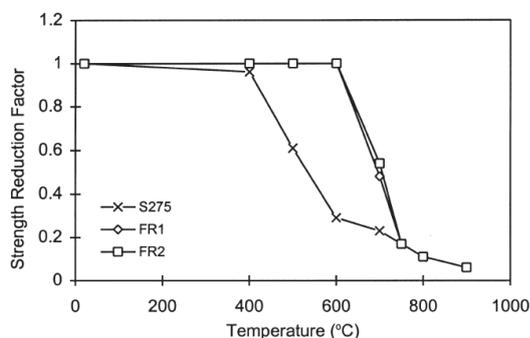


Figura 2.9 - Factores de redução para os aços estudados (Kelly and Sha, 1999)

Outinen *et al.* (2000) estudaram o comportamento dos aços S355 e S460 quando submetidos a altas temperaturas. Para obterem os resultados pretendidos utilizaram o “teste transiente” de modo a determinar o módulo de elasticidade e tensão de cedência até cerca de 950 °C; realizaram ainda “testes estacionários” para comparação de valores. A taxa utilizada nos ensaios transientes variou entre 10 °C/min e 30 °C/min e foi notado que os resultados não tinham grande diferença para cada uma das taxas. A Figura 2.10a e a Figura 2.10b comparam os resultados do aço S355 com os valores propostos pelo EN 1993-1-2. Os valores obtidos pelo “teste transiente” não são muito diferentes dos propostos pelo EN 1993-1-2. A maior diferença encontrada foi entre os 300 °C e 600 °C para o módulo de elasticidade. Para o aço S460 pode-se verificar que os factores de redução para o módulo de elasticidade são idênticos aos do regulamento até 500 °C (Figura 2.11a). A partir de 500 °C, esses valores são superiores aos apresentados pelo Eurocódigo. Relativamente à tensão de cedência, os valores propostos pelo EN 1993-1-2 são superiores aos calculados entre as temperaturas de 100 °C e 500 °C (Figura 2.11b). Os restantes valores aproximam-se dos propostos pelo EN 1993-1-2.

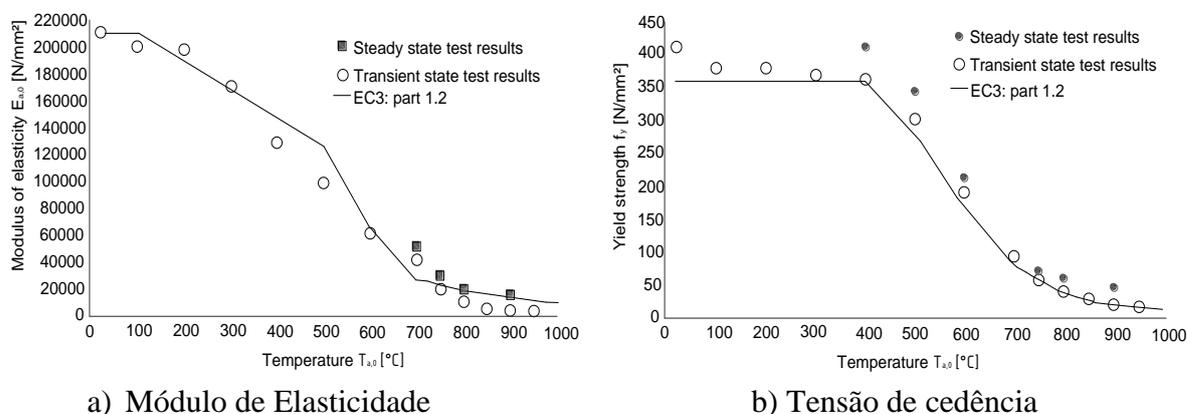


Figura 2.10 - Comparação dos valores obtidos com os valores propostos pelo EN 1993-1-2, para o aço S355 (Outinen *et al.*, 2000)

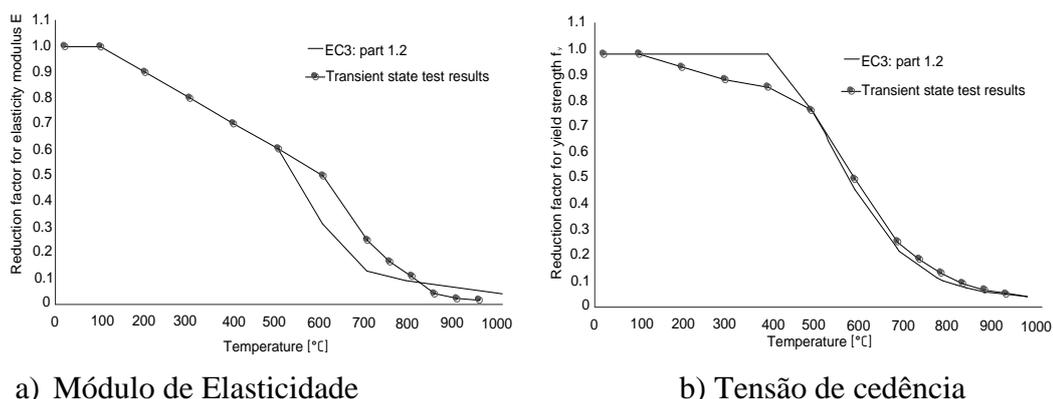


Figura 2.11 - Comparação dos factores de redução obtidos pelo “teste transiente” com os valores propostos pelo EN 1993-1-2, para o aço S460 (Outinen *et al.*, 2000)

Em 2002, Outinen e Mäkeläinen (2002) realizaram uma série de “testes transientes” (taxa de aquecimento 20 °C/min), para investigar as propriedades mecânicas de diferentes tipos de aço (S350GD+Z e S355J2H) ver Quadro 2.11. Deve-se referir que o aço S350GD+Z não é um aço corrente utilizado para perfis laminados, mas sim para elementos enformados a frio.

Quadro 2.11 - Características dos aços estudados (Outinen and Mäkeläinen, 2002)

Steel grade	Nominal f_y (N/mm ²)	Measured f_y (N/mm ²)	Material standard
S350GD+Z	350	402	SFS-EN 10 147
S355J2H	355	539–566 [†]	SFS-EN 10 219-1

Quadro 2.12 - Factores de redução para as propriedades mecânicas do aço estrutural S350GD+Z de 20 °C a 1000 °C (Outinen and Mäkeläinen, 2002)

Steeltemp. θ_a [°C]	Reduction factor for the slope of the linear elastic range $k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$	Reduction factor for proportional limit $k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$	Reduction factor for satisfying deformation criteria (informative only) $k_{x,\theta} = f_{x,\theta}/f_y$	Reduction factor for yield strength $k_{p0.2,\theta} = f_{p0.2,\theta}/f_y$	Reduction factor for yield strength $k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$
20	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
100	1.000	0.970	0.970	1.000	0.970
200	0.900	0.807	0.910	0.863	0.932
300	0.800	0.613	0.854	0.743	0.895
400	0.700	0.420	0.790	0.623	0.857
500	0.600	0.360	0.580	0.483	0.619
600	0.310	0.180	0.348	0.271	0.381
700	0.130	0.075	0.132	0.106	0.143
800	0.090	0.000	0.089	0.077	0.105
900	0.068	0.000	0.057	0.031	0.067
950	0.056	0.000	0.055	0.023	0.048
1000	0.045	0.000	0.025	0.014	0.029

O Quadro 2.12 apresenta coeficientes de redução obtidos para o aço S350GD+Z. Os dados obtidos para a tensão de cedência foram comparados, com os valores presentes no EN 1993-1-

2 (Figura 2.12). Através da análise do gráfico verifica-se que a tensão de cedência deste aço diminui mais rapidamente do que os valores propostos pelo Eurocódigo. Nos testes realizados para o aço S355J2H o Quadro 2.13 apresenta os valores das propriedades para cada temperatura.

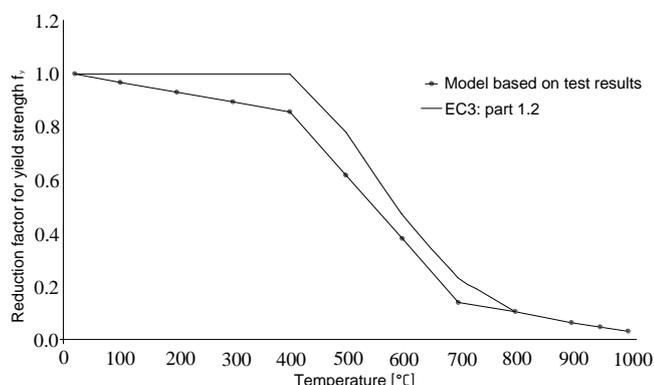


Figura 2.12 - Comparação entre os factores de redução obtidos nos testes, para a tensão de cedência, com os valores propostos pelo EN 1993-1-2 (Outinen and Mäkeläinen, 2002)

Quadro 2.13 - Propriedades mecânicas do aço estrutural S355J2H de 20 °C a 1000 °C (Outinen and Mäkeläinen, 2002)

Temp. [°C]	Modulus of elasticity E [N/mm ²]	Proportional limit f_B [N/mm ²]	Yield strength f_y [N/mm ²]	Yield strength $R_{p0.2}$ [N/mm ²]	Yield strength $R_{10.5}$ [N/mm ²]
20	210000	481.1	566	520	526
100	210000	481.1	566	520	526
200	189000	441.48	549.02	485	496
300	168000	367.9	537.7	439	455
400	147000	311.3	481.1	381	399
500	126000	169.8	367.9	255	280
600	65100	67.92	181.12	118	132
700	27300	39.62	101.88	66	72
750	23100	28.3	67.92	46	51
800	18900	19.81	42.45	29	33
850	16537.5	11.32	31.13	20	23
900	14175	6.792	22.64	13	17
950	11812.5	5.66	19.81	12	14
1000	9450	4.528	22.64	10	11

Chen *et al.* (2006) realizaram ensaios experimentais onde determinaram as características mecânicas de dois materiais BISPLATE 80 e XLERPLATE Grade 350 a altas temperaturas. O aço BISPLATE 80 corresponde a um aço S355JR e o aço XLERPLATE Grade 350 a um aço S690Q (Quadro 2.14). Através do “teste estacionário” (velocidade de deslocamento igual a 0,2 mm/min) os autores determinaram os factores de redução para o módulo de elasticidade e para a tensão de cedência efectiva a extensões de 0.2%, 0.5%, 1.5% e 2.0% (Figura 2.13). Os autores utilizaram ainda o “teste transiente” para obter a relação tensão-extensão para as diversas temperaturas (Figura 2.14). Os factores de redução, para as propriedades estudadas, são apresentados no Quadro 2.15 e no Quadro 2.16.

Quadro 2.14 - Características dos materiais estudados (Chen *et al.*, 2006)

Steel	$f_{0.2,normal}$ (MPa)	$f_{0.5,normal}$ (MPa)	$f_{1.5,normal}$ (MPa)	$f_{2.0,normal}$ (MPa)	$f_{u,normal}$ (MPa)	E_{normal} (GPa)	ϵ_f (%)
High strength steel	789	790	813	823	847	223	7
Mild steel	401	409	445	465	552	220	30

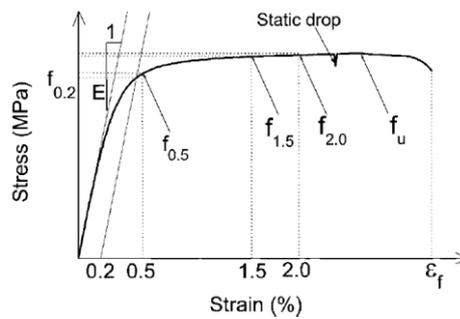


Figura 2.13 - Relação tensão-extensão do aço (Chen *et al.*, 2006)

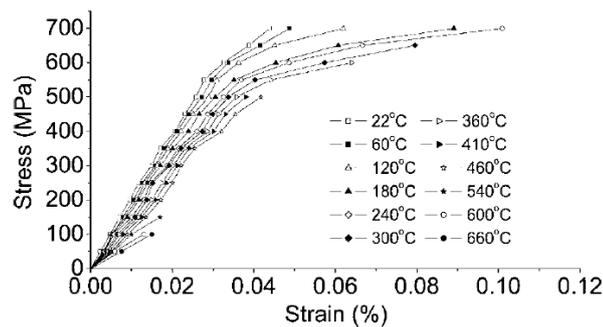


Figura 2.14 - Relação tensão-extensão do aço para diversas temperaturas (Chen *et al.*, 2006)

Quadro 2.15 - Factores de redução para o módulo de elasticidade e tensão de cedência para o aço XLERPLATE Grade 350 (Chen *et al.*, 2006)

T (°C)	E_T/E_{normal}	$f_{0.2,T}/f_{0.2,normal}$	$f_{0.5,T}/f_{0.5,normal}$	$f_{1.5,T}/f_{1.5,normal}$	$f_{2.0,T}/f_{2.0,normal}$
22	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
60	1.04	0.95	0.96	0.96	0.96
120	1.01	0.94	0.94	0.96	0.96
150	1.04	0.96	0.95	0.98	0.99
180	1.02	0.92	0.92	0.97	0.97
240	0.98	0.89	0.89	0.99	1.00
300	0.99, 1.00*	0.90, 0.88*	0.91, 0.89*	0.98, 0.97*	0.99, 0.98*
410	0.92	0.87	0.87	0.94	0.94
460	0.94	0.80	0.81	0.85	0.84
540	0.87	0.75	0.75	0.76	0.74
600	0.73	0.60	0.61	0.56	0.59
660	0.73	0.43	0.44	0.43	0.42
720	0.51	0.21	0.21	0.22	0.22
770	0.49	0.14	0.14	0.15	0.14
830	0.33	0.08	0.08	0.08	0.09
940	0.12	0.05	0.05	0.05	0.05

Quadro 2.16 - Factores de redução para o módulo de elasticidade e tensão de cedência para o aço BISPLATE 80 (Chen *et al.*, 2006)

T (°C)	E_T/E_{normal}	$f_{0,2,T}/f_{0,2,normal}$	$f_{0,5,T}/f_{0,5,normal}$	$f_{1,5,T}/f_{1,5,normal}$	$f_{2,0,T}/f_{2,0,normal}$
22	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
60	1.00	0.96	0.95	0.96	0.96
120	0.95	0.95	0.94	0.96	0.96
150	0.96	0.94	0.95	0.96	0.96
180	0.98, 0.97*	0.92, 0.92*	0.92, 0.93*	0.95, 0.97*	0.95, 0.97*
240	1.03	0.90	0.95	1.05	1.05
300	0.95	0.95	0.99	1.11	1.11
360	0.93	0.86	0.89	1.03	1.04
410	0.93, 0.89*	0.90, 0.90*	0.94, 0.94*	1.04, 1.04*	1.03, 1.03*
460	0.89	0.81	0.85	0.93	0.93
540	0.90	0.78	0.82	0.87	0.86
600	0.82	0.71	0.74	0.76	0.74
660	0.77	0.56	0.58	0.57	0.55
720	0.65	0.35	0.36	0.32	0.31
830	0.48	0.15	0.15	0.14	0.13
940	0.27, 0.26*	0.09, 0.09*	0.09, 0.09*	0.09, 0.09*	0.09, 0.08*

Nota: * corresponde a resultados obtidos para um ensaio adicional.

Os resultados experimentais foram comparados com os valores do código Americano (AISC), American Society of Civil Engineers (ASCE), do código Australiano (AS 4100), do Eurocódigo (EN 1993-1-2), do código Britânico (BS 5950-8) e com trabalhos prévios (Figura 2.15 e Figura 2.16). Da análise dos gráficos notou-se que, na maioria dos casos, os factores obtidos experimentalmente foram superiores aos apresentados pelos regulamentos e aos valores obtidos em ensaios realizados por outros autores. Quando se analisou os factores para uma extensão de 0,2% verificou-se que os resultados obtidos nos ensaios são próximos do AISC até 600 °C, aumentando para temperaturas superiores (Figura 2.15a).

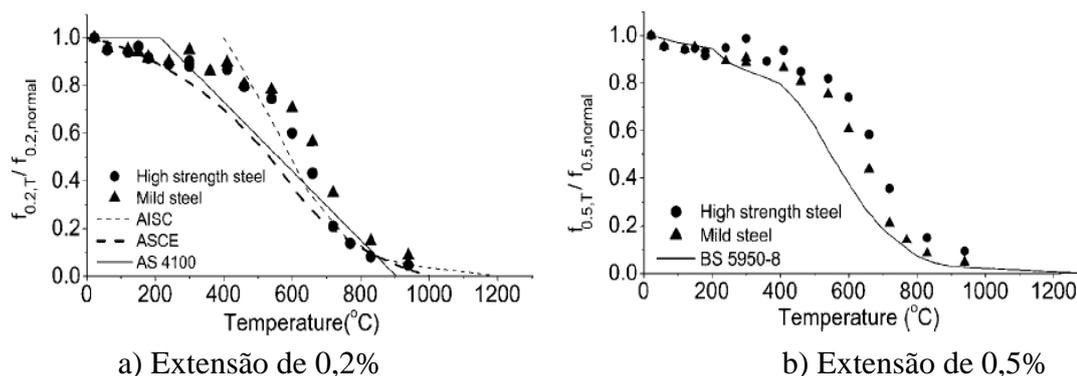


Figura 2.15 - Comparação dos factores de redução experimentais com diversos regulamentos, para a tensão de cedência (Chen *et al.*, 2006)

A análise dos gráficos para extensões de 0.5%, 1.5% e 2.0% foi muito semelhante (Figura 2.15b, Figura 2.16a e Figura 2.16b). Os valores dos factores são, na maioria dos casos, superiores aos dos regulamentos, excepto para a extensão 1,5% onde o valor dos factores de

redução para BISPLATE 80 são inferiores (Figura 2.16a), até 400 °C. A partir de 800 °C os valores dos factores voltam a ficar semelhantes para os regulamentos e para os ensaios.

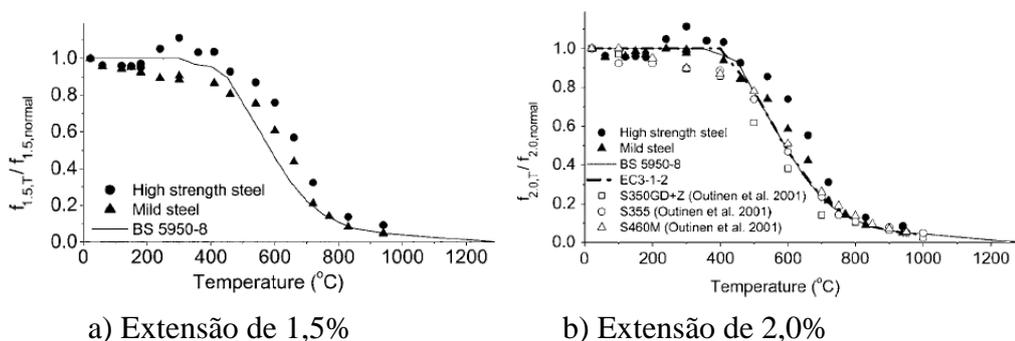


Figura 2.16 - Comparação dos factores de redução experimentais com diversos regulamentos, para a tensão de cedência (Chen *et al.*, 2006)

Para confirmar os resultados, os autores realizaram “testes transientes” no aço XLERPLATE Grade 350 para o módulo de elasticidade e tensão última (Quadro 2.17 e Quadro 2.18).

Quadro 2.17 - Factores de redução para o módulo de elasticidade obtidos pelo “teste transiente” (Chen *et al.*, 2006)

Temperature (°C)	22	60	120	180	240	300	360	410	460	540	600	660
E_T (GPa)	209.2	192.9	186.5	170.7	161.7	154.3	142.9	134.9	126.6	125.8	92.0	66.3
E_T/E_{normal}	1.00	0.92	0.89	0.82	0.77	0.74	0.68	0.64	0.61	0.60	0.44	0.32

Quadro 2.18 – Resultados obtidos para a tensão última do “teste transiente” e “teste estacionário” (Chen *et al.*, 2006)

Temperature (°C)	$f_{t,u,T}$ (MPa)	$f_{u,T}$ (MPa)	$f_{u,T-drop}$ (MPa)
22	>700	856, 838*	838, 820*
60	>700	812	793
120	>700	822	811
150	>700	840	824
180	>700	833	812
240	>700	846	812
300	>700	853, 830*	809, 786*
410	600–650	787	735
460	500–550	694	642
540	350–400	620	550
600	150–200	498	407
660	100–150	357	250
720	50–100	178	109
770	50–100	119	57
830	1–50	75	34
940	<1	43	22

Notas: Os valores apresentados para $f_{t,u,T}$ correspondem ao “teste transiente” e para $f_{u,T}$ correspondem ao “teste estacionário”. * correspondem a resultados obtidos para um ensaio adicional.

Schneider e Lange (2009) realizaram ensaios experimentais para determinar o comportamento do aço S460M e S460N a altas temperaturas. A diferença entre estes dois aços é que a letra M corresponde a aços termomecânicos e a letra N a aço normalizados. Os parâmetros analisados foram obtidos através dos “teste transiente” e do “teste estacionário”. O “teste transiente” (taxa de aquecimento de 10K/min) foi realizado de modo a obter-se os parâmetros do aço, enquanto o “teste estacionário” só foi utilizado para confirmar os valores obtidos. Os resultados obtidos para o aço S460M e S460N foram comparados com o EN 1993-1-2 (Figura 2.17a e Figura 2.17b), podendo-se verificar que os factores de redução são inferiores aos apresentados no EN 1993-1-2. As curvas tensão-extensão são comparadas com os valores propostos pelo EN 1993-1-2, sendo que, para um valor de extensão constante, os valores apresentados pelo EN 1993-1-2 são superiores aos obtidos nos ensaios (Figura 2.18a e Figura 2.18b).

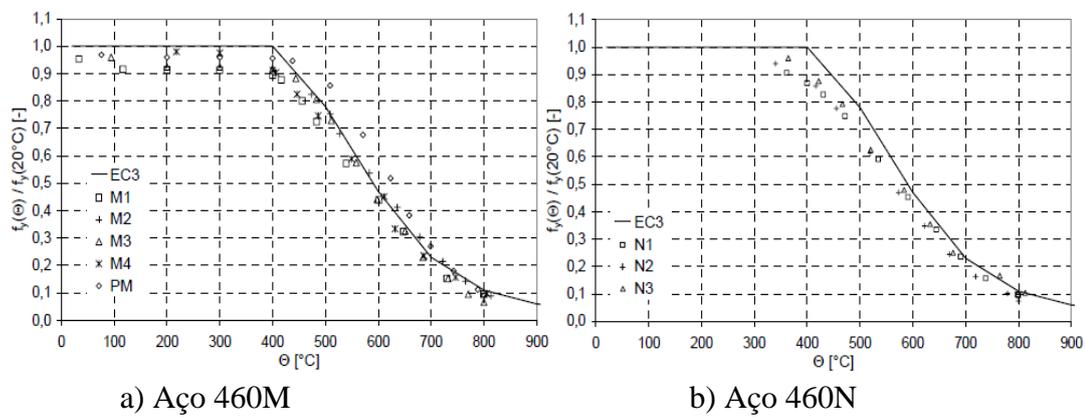


Figura 2.17 - Factores de redução para a tensão de cedência, através do “teste transiente” (Schneider and Lange, 2009)

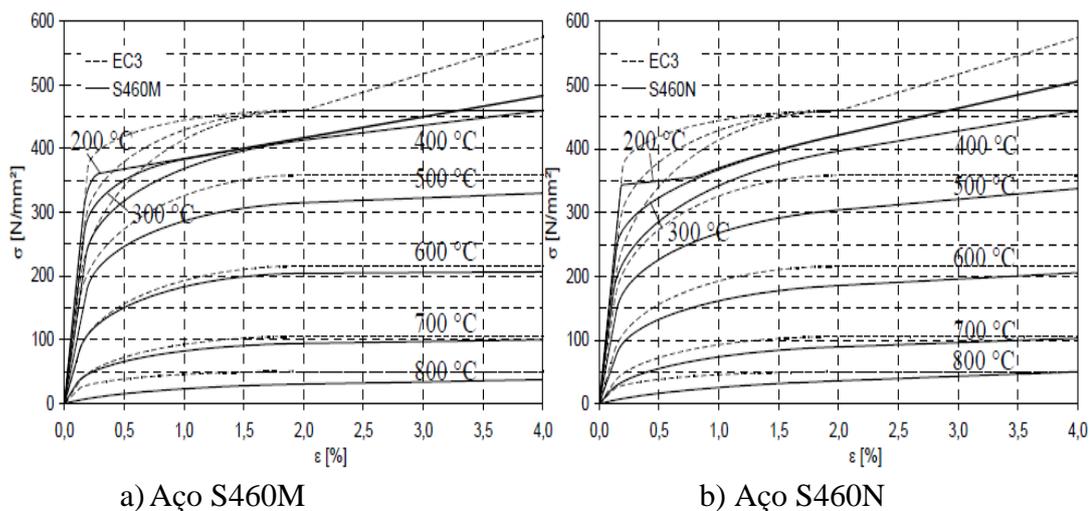


Figura 2.18 - Comparação da relação tensão-extensão obtida pelos testes com a presente no Eurocódigo (Schneider and Lange, 2009)

Qiang *et al.* (2011) estudaram a variação do módulo de elasticidade do aço S690 para altas temperaturas (Quadro 2.19) realizando “testes estacionários” (taxa de deformação 0,005/min) e “testes transientes” (taxa de aquecimento de 50 °C/min).

Quadro 2.19 - Factores de redução para o módulo de elasticidade para o “teste estacionário” e “teste transiente”, respectivamente (Qiang *et al.*, 2011)

Temperature (°C)	Elastic modulus (MPa)	Reduction factor	Temperature (°C)	Elastic modulus (MPa)	Reduction factor
20	204690	1.000	20	205890	1.000
100	204592	1.000	100	202267	0.982
200	179146	0.875	200	178874	0.869
300	171819	0.839	250	176515	0.857
400	158608	0.775	300	173242	0.841
500	140127	0.685	350	160829	0.781
550	111788	0.546	400	151457	0.736
600	76105	0.372	450	142459	0.692
700	28848	0.141	500	133146	0.647
			550	110642	0.537
			600	76238	0.370
			650	42027	0.204
			700	20480	0.099

Os resultados obtidos para os dois testes foram comparados com os dados presentes em alguns regulamentos (EN 1993-1-2, AS 4100-1998 e AISC-2010) e com um ensaio experimental realizado por Chen (2006) (Figura 2.19). É possível notar que os factores de redução obtidos para o “teste estacionário” são, na maior parte das vezes, superiores aos factores recolhidos para o “teste transiente”. O EN 1993-1-2 e o AISC possuem valores de factores de redução inferiores aos obtidos para o ensaio experimental, enquanto o AS 4100, na maior parte dos casos, tem valores de factor de redução superiores aos obtidos no ensaio. Os ensaios realizados por Chen (2006) já foram analisados anteriormente.

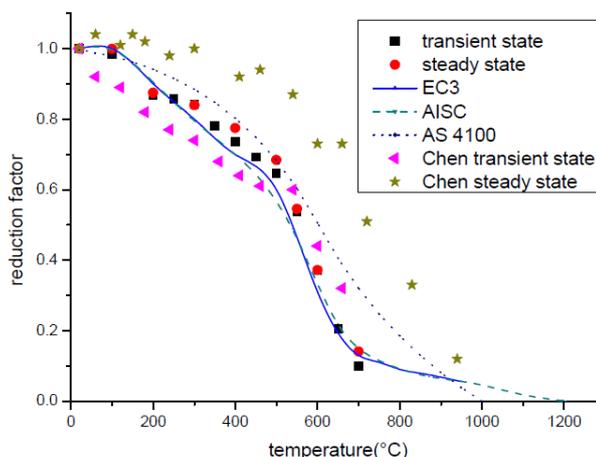


Figura 2.19 - Comparação do módulo de elasticidade (Qiang *et al.*, 2011)

Mais recentemente, Qiang *et al.*, 2012b estudaram o comportamento de dois aços de alta resistência, S460 e S690, determinando as propriedades dos dois aços a altas temperaturas através do “teste estacionário”, para temperaturas até 1000 °C. As propriedades avaliadas foram o módulo de elasticidade, tensão de cedência efectiva e tensão última efectiva. De notar o facto de a tensão de cedência ter sido determinada para as extensões de 0.2%, 0.5%, 1.5% e 2.0%. O módulo de elasticidade foi apresentado no Quadro 2.20.

Quadro 2.20 - Redução do módulo de elasticidade dos aços S460 e S690 (Qiang *et al.*, 2012b)

Temperature (°C)	S460		S690	
	E-modulus (MPa)	Residual factor	E-modulus (MPa)	Residual factor
20	202,619	1.000	212,490	1.000
100	-	-	211,800	0.997
200	-	-	210,808	0.992
300	202,300	0.998	210,400	0.990
400	198,870	0.981	208,900	0.983
500	194,910	0.962	205,900	0.969
600	191,320	0.944	203,500	0.958
650	190,000	0.938	195,250	0.919
700	186,140	0.919	184,761	0.870
750	176,184	0.870	168,879	0.795
800	173,660	0.857	160,010	0.753
850	170,780	0.843	149,520	0.704
900	163,980	0.809	142,538	0.671
1000	144,470	0.713	137,063	0.645

Nota: O módulo de elasticidade do aço S460, para 100 °C e 200 °C, não sofreu alterações relativamente ao seu valor à temperatura ambiente.

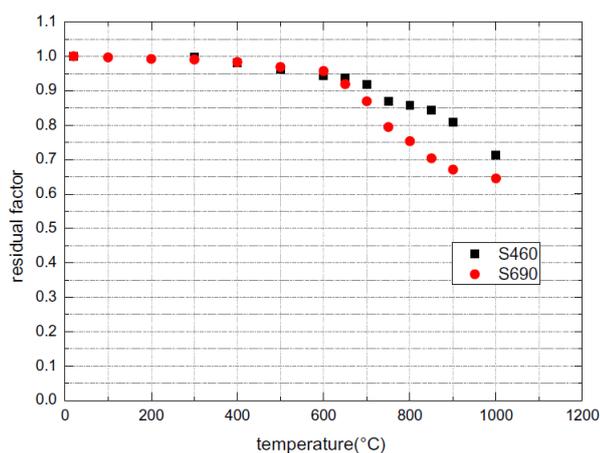


Figura 2.20 - Factores de redução para o módulo de elasticidade dos aços S460 e S690 (Qiang *et al.*, 2012b)

Na Figura 2.20 é de notar que os coeficientes de redução são semelhantes para os dois aços, até 600 °C. A partir dos 600 °C, o módulo de elasticidade do aço S690 decresce mais rapidamente. Um facto importante a realçar foi que os dois aços a 1000 °C não perderam

metade das suas propriedades, o que é precisamente o contrário do que é apresentado por todos os regulamentos e do que todos os outros ensaios realizados, onde a 1000 °C as propriedades do aço já estariam a menos de 6% relativamente à temperatura ambiente.

Para a tensão de cedência os resultados são resumidos no Quadro 2.21 e no Quadro 2.22, e foram elaborados gráficos que permitem uma melhor observação da redução desta propriedade (Figura 2.21 e Figura 2.22).

Quadro 2.21 - Tensão de cedência efectiva para os aços S460 e S690 (Qiang *et al.*, 2012b)

Temperature (°C)	S460				S690			
	0.2%	0.5%	1.5%	2.0%	0.2%	0.5%	1.5%	2.0%
20	490	495	490	524	789	806	784	786
100	-	-	-	-	787	801	787	787
200	-	-	-	-	787	782	789	789
300	490	496	495	521	785	781	781	781
400	489	489	495	498	786	806	788	786
500	494	496	490	509	786	807	790	790
600	480	478	492	506	785	802	783	786
650	466	472	474	473	793	800	769	783
700	474	474	471	472	705	707	702	698
750	442	439	430	455	591	591	603	608
800	428	425	437	432	484	484	486	486
850	427	427	428	441	420	420	417	418
900	427	424	425	426	320	321	375	394
1000	374	375	387	400	301	301	328	351

Nota: O módulo de elasticidade do aço S460 para, 100 °C e 200 °C, não sofreu alterações relativamente ao seu valor à temperatura ambiente.

Quadro 2.22 - Factores de redução para a tensão de cedência efectiva para os aços S460 e S690 (Qiang *et al.*, 2012b)

Temperature (°C)	S460				S690			
	0.2%	0.5%	1.5%	2.0%	0.2%	0.5%	1.5%	2.0%
20	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
100	-	-	-	-	0.998	0.994	1.004	1.002
200	-	-	-	-	0.998	0.971	1.006	1.004
300	1.000	1.002	1.010	0.995	0.995	0.970	0.997	0.995
400	0.997	0.988	1.011	0.951	0.997	1.000	1.005	1.001
500	1.007	1.002	1.000	0.972	0.997	1.002	1.007	1.005
600	0.980	0.966	1.005	0.965	0.995	0.995	0.999	1.001
650	0.950	0.954	0.968	0.903	1.006	0.993	0.981	0.997
700	0.968	0.959	0.960	0.901	0.894	0.877	0.895	0.889
750	0.901	0.887	0.876	0.868	0.749	0.733	0.769	0.775
800	0.874	0.858	0.891	0.824	0.614	0.600	0.619	0.618
850	0.871	0.863	0.873	0.843	0.532	0.521	0.531	0.532
900	0.871	0.858	0.867	0.813	0.405	0.399	0.478	0.502
1000	0.763	0.758	0.790	0.764	0.381	0.373	0.419	0.447

Nota: O módulo de elasticidade do aço S460 para, 100 °C e 200 °C, não sofreu alterações relativamente ao seu valor à temperatura ambiente.

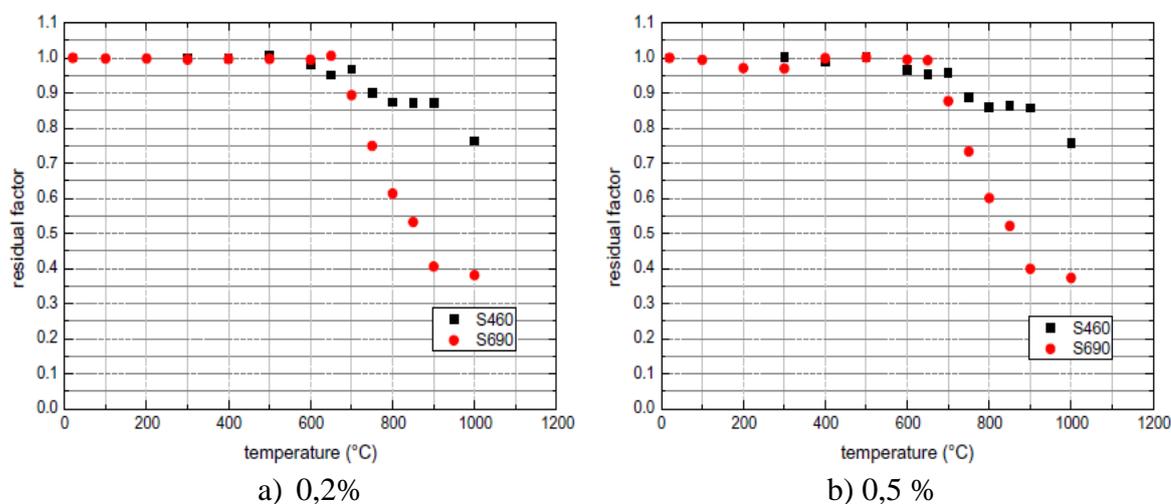


Figura 2.21 - Factores de redução para a tensão de cedência de acordo com a extensão (Qiang *et al.*, 2012b)

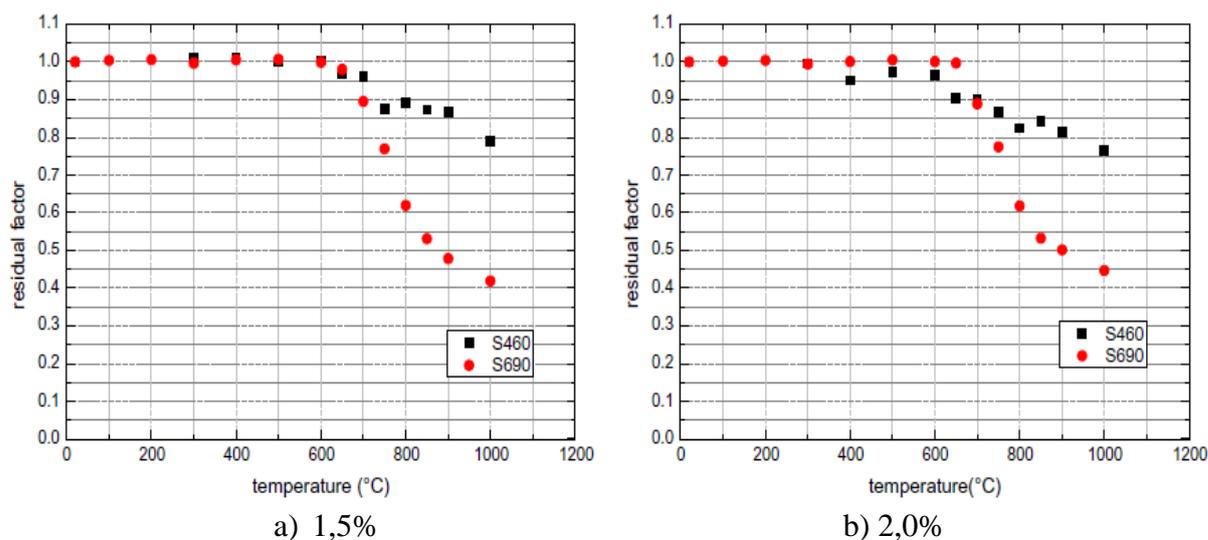


Figura 2.22 - Factores de redução para a tensão de cedência de acordo com a extensão (Qiang *et al.*, 2012b)

Através dos gráficos (Figura 2.21 e Figura 2.22) apresentados verificou-se que, tal como para o módulo de elasticidade, a tensão de cedência dos dois aços apresenta a mesma degradação até temperaturas à volta de 600 °C. Para temperaturas mais elevadas, os factores de redução são mais baixos para o aço S690. Para a tensão de cedência também se verificou que, a 1000 °C, os aços estudados não perderam metade do valor das suas propriedades.

A degradação da tensão última, para os dois aços, é apresentada no Quadro 2.23 e na Figura 2.23 Tal como para as propriedades anteriores, os valores dos coeficientes de redução só são diferentes a partir dos 600 °C.

Quadro 2.23 - Redução da tensão última para os aços S460 e S690 (Qiang *et al.*, 2012b)

Temperature (°C)	S460		S690	
	Ultimate strength	Residual factor	Ultimate strength	Residual factor
20	640	1.000	820	1.000
100	-	-	823	1.003
200	-	-	823	1.003
300	638	0.996	822	1.002
400	637	0.995	820	0.999
500	631	0.985	821	1.001
600	621	0.970	820	1.000
650	608	0.950	807	0.983
700	605	0.945	743	0.906
750	566	0.884	646	0.788
800	571	0.892	552	0.673
850	580	0.906	507	0.619
900	568	0.887	485	0.592
1000	521	0.814	470	0.573

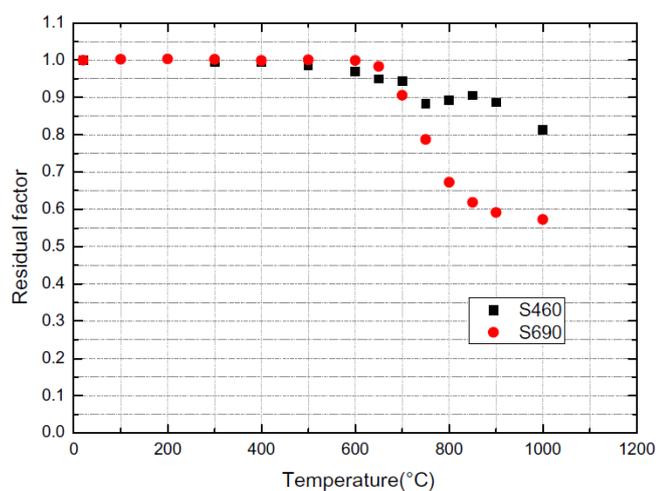


Figura 2.23 - Factores de redução da tensão última para os aços S460 e S690 (Qiang *et al.*, 2012b)

2.2.2 Parafusos

No Quadro 2.24 resumem-se os principais trabalhos experimentais sobre a variação das propriedades mecânicas do aço utilizado em parafusos com o aumento de temperatura.

Quadro 2.24 – Resumo dos ensaios estudados

Autor	Parafuso (Classe)	Teste	Ano
British Steel Technical Swinden Laboratories	4.6 e 8.8	-	1993
Kirby	8.8	Teste Transiente	2003
González e Lange	10.9	Teste Estacionário e Teste Transiente	2009
Hanus <i>et al.</i>	8.8	Teste Estacionário	2011

O British Steel Technical Swinden Laboratories (1993) apresentou resultados de duas classes de parafusos, 4.6 e 8.8, a altas temperaturas. Da Figura 2.24 é possível verificar que as características do parafuso 8.8, para uma extensão de 0,2%, diminuem mais rapidamente que as dos parafusos 4.6, quando sujeitos a temperaturas elevadas. De realçar também o facto de as características do parafuso de classe 4.6 aumentarem para temperaturas próximas de 300 °C.

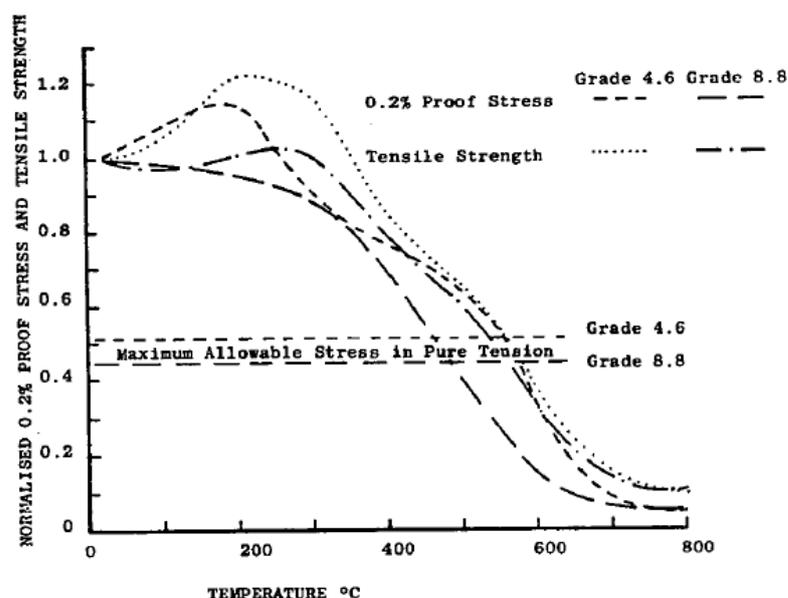


Figura 2.24 - Parafusos de classe 4.6 e 8.8 a altas temperaturas (British Steel Technical Swinden Laboratories, 1993)

Kirby (1995) realizou ensaios de modo a conhecer o comportamento de parafusos de classe 8.8 a altas temperaturas (Quadro 2.25). Os ensaios foram realizados até 800 °C a uma taxa de aquecimento entre 5 °C/min e 10 °C/min. Os factores de redução obtidos foram comparados para extensões de 0,5% e 5,0% com os valores propostos no EN 1993-1-2 para aços laminados a quente, S355 (Figura 2.25). O coeficiente σ_x/σ_y corresponde à relação entre a tensão a uma determinada extensão x e a tensão medida para uma extensão de 0,2% à

temperatura ambiente. Da análise do gráfico notou-se que os factores de redução obtidos para parafusos de classe 8.8 são inferiores aos propostos pelo Eurocódigo para aço estruturais.

Quadro 2.25 - Parafusos de classe 8.8 ensaiados (Kirby, 1995)

<i>Mechanical property</i>		<i>Requirement</i>
Tensile strength R_m	min.	785 N/mm ²
	max.	981 N/mm ²
0.2% Proof stress $R_{0.2}$	min.	628 N/mm ²
Stress under proof load S_p		571 N/mm ²
Elongation after fracture	min.	12%
Brinell Hardness HB	min.	225
	max.	300
Rockwell Hardness HRC	min.	18
	max.	31
Vickers Hardness HV30	min.	225
	max.	300
Charpy Impact Strength	min.	30J

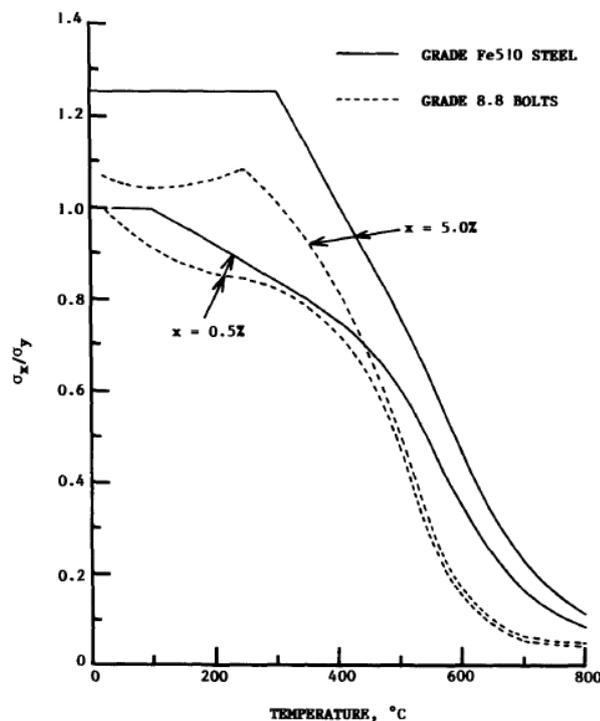


Figura 2.25 - Comparação dos factores de redução para os parafusos de classe 8.8 a extensões de 0,5% e 5,0% com o EN 1993-1-2 (Kirby, 1995)

González e Lange (2009) estudaram a resistência de parafusos de classe 10.9 (Quadro 2.26) utilizando “testes transientes” e “testes estacionários” (Figura 2.26a), comparando os resultados com os dados propostos pelo EN 1993-1-2 (Figura 2.26b). O “teste estacionário” foi realizado com uma velocidade de carregamento igual 0,001 mm/min e o “teste transiente” com uma taxa de aquecimento de 10 K/min.

Quadro 2.26 - Características dos parafusos de classe 10.9 utilizados nos testes (González and Lange, 2009)

Steel grade	minimum tensile strength	minimum strength at strain of 0,2%	minimum expansion	minimum lateral contraction	Vickers hardness, HN; F ≥ 98 N
10.9 bolt	1040 N/mm ²	940 N/mm ²	9 %	48 %	320 - 380

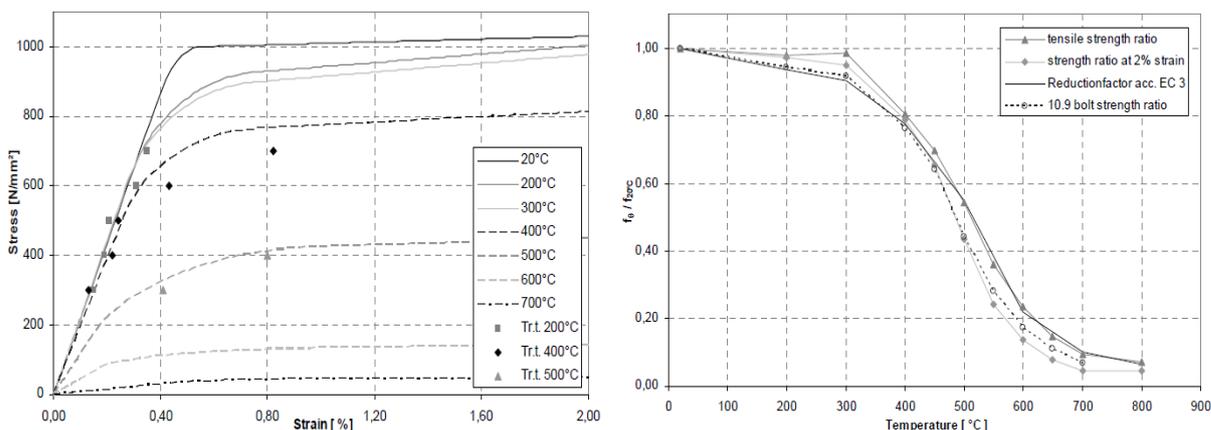


Figura 2.26 – a) Relação tensão-extensão; b) comparação dos factores de redução para os parafusos de classe 10.9 com o Eurocódigo (González and Lange, 2009)

Da Figura 2.26a observa-se que os resultados obtidos pelos dois testes são muito semelhantes. Relativamente aos factores de redução (Figura 2.26b), estes são inferiores aos apresentados pelo EN 1993-1-2, à excepção dos factores para temperaturas entre 20 °C e 450 °C onde são praticamente idênticos.

Recentemente, Hanus *et al.* (2011) testaram parafusos de classe 8.8 sujeitos a altas temperaturas em tracção e corte. Para determinar os coeficientes de redução para parafusos, utilizaram o “teste estacionário” até temperaturas de 800 °C. Os testes foram realizados para uma taxa de aquecimento entre 10 °C/min e 30 °C/min, sendo os valores obtidos comparados com os presentes no EN 1993-1-2 (Figura 2.27). Os valores determinados não diferem muito e aproximam-se dos propostos pelo Eurocódigo, registando-se apenas diferença para as temperaturas de 200 °C e 400 °C, onde o factor de redução é maior e menor do que os factores presentes no Eurocódigo, respectivamente.

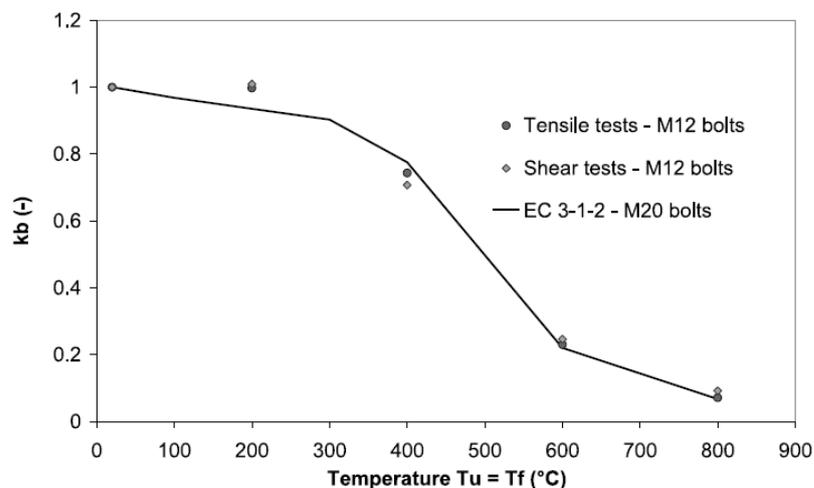


Figura 2.27 - Comparação dos factores de redução obtidos com os propostos no Eurocódigo (Hanus et al., 2011)

2.2.3 Discussão dos resultados analisados

As principais conclusões a retirar dos estudos analisados são:

- i. Os valores obtidos em ensaios de aços macios são muito próximos dos apresentados pelo Eurocódigo e AISC.
- ii. Os resultados obtidos para aços macios utilizando o teste transiente são sempre mais próximos dos dados apresentados pelos códigos (Eurocódigo e AISC).
- iii. Os resultados obtidos variam muito consoante o tipo de aço estudado. O aço S350GD+Z testado por Outinen e Mäkeläinen (2002) perdeu as suas características logo que a temperatura aumentou, o aço S460M e S460N estudado por Schneider e Lange (2009) só variou as suas características a partir de 400 °C assim como os aços S355JR e S690Q ensaiados por Chen *et al.* (2006) e os aços S460 e S690 testados por Qiang *et al.* (2012b). As propriedades do aço S690 testado por Qiang *et al.* (2011) começaram a baixar para temperaturas próximas de 200 °C.
- iv. Em testes diferentes, para o mesmo tipo de aço, existem grandes diferenças nos resultados. Por exemplo, os resultados obtidos para os aços S460 por Schneider e Lange (2009) são muito diferentes dos obtidos por Qiang *et al.* (2012b). Neste caso, o aço utilizado por Qiang *et al.* (2012b) não chega a perder metade do valor das suas características para temperaturas próximas de 1000 °C, ao contrário do aço utilizado por Schneider e Lange, que teve um comportamento muito próximo do apresentado no

EN 1993-1-2. O aço S690 foi testado por Chen *et al.*, 2006, Qiang *et al.* 2011 e Qiang *et al.* 2012b. Os resultados obtidos para os dois primeiros casos foram muito idênticos, estando até muito próximos dos valores propostos pelo EN 1993-1-2. No entanto, os valores provenientes dos ensaios de Qiang *et al.* 2012b foram totalmente diferentes dos outros ensaios, porque, para altas temperaturas, as propriedades determinadas tiveram resultados muito superiores.

- v. Um aspecto notado foi que Outinen *et al.* (2000) e Qiang *et al.* (2011) obtiveram resultados diferentes para os dois tipos de teste que utilizaram (“teste transiente” “e teste estacionário”). Para os ensaios que realizaram, obtiveram sempre valores superiores para o “teste estacionário” do que para o “teste transiente”.
- vi. Relativamente aos parafusos, os valores apresentados pelos autores são similares aos valores propostos pelo Eurocódigo.

3 TRABALHOS ANTERIORES (FCTUC)

3.1 Introdução e enquadramento

Neste capítulo trataram-se e analisaram-se resultados obtidos em ensaios de tracção à temperatura ambiente e temperatura elevada em regime estacionário, por autores do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra (AS - Santiago *et al.*, 2009; CH - Haremza *et al.*, 2012; FL - Lopes *et al.*, 2012). A gama de temperaturas variou de ensaio para ensaio, sendo a temperatura máxima estudada de 1000 °C. Os resultados analisados foram divididos de acordo com a classe de aço estudado, do tipo de provete e do autor. As classes dos aços estudados foram S275JR, S355J2G3, S355J2+N, S355J0+M, S355J2H, S355JR e S460M, sendo os provetes retirados de tubos SHS 200x200x8, SHS 200x200x10, SHS 200x200x12 e SHS 250x250x10, tubos CHS 250x250x10, alma e banzo de UPN 200, alma e banzo de IPE 300, alma e banzo de IPE 550, alma e banzo de HEB 300, chapas de 8, 10, 12 e 15 e 25 mm (Quadro 3.1).

Quadro 3.1 – Quadro resumo de todos os resultados tratados

Provete	Norma	Temperatura (°C)	Classe do aço	Largura (mm)	Espessura (mm)	Nº de provetes	Autor
IPE 300 Alma	EN 10025-2	20	S355J2G3	6,72	6,01	2	Aldina Santiago (AS)
	EN 10025-2	100	S355J2G3	6,00	6,75	1	
	EN 10025-2	200	S355J2G3	6,77	5,99	1	
	EN 10025-2	300	S355J2G3	5,93	6,66	1	
	EN 10025-2	400	S355J2G3	6,04	6,96	1	
	EN 10025-2	500	S355J2G3	5,98	6,70	1	
	EN 10025-2	600	S355J2G3	6,00	6,85	1	
	EN 10025-2	700	S355J2G3	6,07	6,72	1	
	EN 10025-2	800	S355J2G3	6,08	6,72	1	
	EN 10025-2	900	S355J2G3	6,12	6,85	1	
IPE 300 Banzo	EN 10025-2	1000	S355J2G3	6,09	6,83	1	Aldina Santiago (AS)
	EN 10025-2	20	S355J2G3	3,98	10,70	2	
	EN 10025-2	100	S355J2G3	3,91	10,64	1	
	EN 10025-2	200	S355J2G3	4,01	10,71	1	
	EN 10025-2	300	S355J2G3	4,03	10,75	1	
EN 10025-2	400	S355J2G3	4,01	10,72	1		

	EN 10025-2	500	S355J2G3	4,03	10,79	1	
	EN 10025-2	600	S355J2G3	4,03	10,63	1	
	EN 10025-2	800	S355J2G3	3,97	10,74	1	
	EN 10025-2	1000	S355J2G3	4,07	10,72	1	
HEB 300 Alma	EN 10025-2	20	S355J2G3	6,07	12,20	1	
	EN 10025-2	400	S355J2G3	6,06	10,80	1	
	EN 10025-2	800	S355J2G3	6,08	12,00	1	
	EN 10025-2	900	S355J2G3	6,02	11,90	1	
	EN 10025-2	1000	S355J2G3	6,03	11,90	1	
HEB 300 Banzo	EN 10025-2	20	S355J2G3	6,12	18,70	1	
	EN 10025-2	100	S355J2G3	6,17	18,90	1	
	EN 10025-2	200	S355J2G3	6,02	19,30	1	
	EN 10025-2	300	S355J2G3	6,25	18,80	1	
	EN 10025-2	400	S355J2G3	6,15	18,80	1	
	EN 10025-2	500	S355J2G3	6,30	19,40	1	
	EN 10025-2	600	S355J2G3	6,09	19,10	1	
	EN 10025-2	700	S355J2G3	6,27	19,20	1	
Chapa 200x100x15	EN 10025-2	20	S355J2+N	10,00	15,00	2	Cécile Haremza (CH)
Alma IPE 550	EN 10025-2	20	S355J0+M	20,00	11,00	3	
	EN 10025-2	500	S355J0+M	20,10	11,10	3	
	EN 10025-2	700	S355J0+M	20,00	11,20	3	
Banzo IPE 550	EN 10025-2	20	S355J0+M	25,10	17,00	3	
	EN 10025-2	500	S355J0+M	24,90	16,70	3	
	EN 10025-2	700	S355J0+M	24,90	16,70	3	
Alma HEB 300	EN 10025-2	20	S460M	20,00	11,00	3	
	EN 10025-2	500	S460M	20,10	11,00	3	
	EN 10025-2	700	S460M	20,10	11,00	3	
Banzo HEB 300	EN 10025-2	20	S460M	25,00	18,50	3	
	EN 10025-2	20	S460M	25,00	18,50	3	
	EN 10025-2	20	S460M	25,00	18,50	3	
Perfil UPN 200 Alma	EN 10025-2	20	S275JR	20,00	8,60	3	Fernanda Lopes (FL)
Perfil UPN 200 Banzo	EN 10025-2	20	S275JR	20,00	8,60	3	
Chapa 8 mm	EN 10025-2	20	S275JR	5,00	8,00	3	
Chapa 10 mm	EN 10025-2	20	S275JR	5,00	10,00	3	
Chapa 12 mm	EN 10025-2	20	S275JR	5,00	12,00	3	
Chapa 15 mm	EN 10025-2	20	S275JR	5,00	15,00	3	
Chapa 495x495x25	EN 10025-2	20	S275JR	10,00	25,00	3	

SHS200x200x8	EN 10219-2	20	S355J2H	20,00	7,00	3
	EN 10219-2	200	S355J2H	5,00	8,00	3
	EN 10219-2	400	S355J2H	5,00	8,00	3
	EN 10219-2	600	S355J2H	5,00	8,00	3
	EN 10219-2	800	S355J2H	5,00	8,00	3
SHS200x200x10	EN 10219-2	20	S355J2H	20,00	8,80	3
	EN 10219-2	200	S355J2H	5,00	10,00	3
	EN 10219-2	400	S355J2H	5,00	10,00	3
	EN 10219-2	600	S355J2H	5,00	10,00	3
	EN 10219-2	800	S355J2H	5,00	10,00	3
SHS200x200x12	EN 10219-2	20	S355J2H	20,00	11,00	3
	EN 10219-2	200	S355J2H	5,00	12,00	3
	EN 10219-2	400	S355J2H	5,00	12,00	3
	EN 10219-2	600	S355J2H	5,00	12,00	3
	EN 10219-2	800	S355J2H	5,00	12,00	3
Alma IPE 300	EN 10025-2	20	S355JR	20,00	7,20	3
Banzo IPE 300	EN 10025-2	20	S355JR	20,00	9,30	3
SHS 250x250x10	EN 10219-2	20	S355J2H	5,00	10,00	3
CHS 250x250x10	EN 10219-2	20	S355J2H	10,00	10,00	3

3.2 Resultados à temperatura ambiente

Os resultados analisados foram apresentados de acordo com a norma onde estão inseridos, isto é, foram divididos em tubos com 8 mm de espessura, tubos com 10 e 12 mm de espessura (EN 10219-2) e perfis laminados e chapas da classe S275, S355 e S460 com mais e menos de 16 mm de espessura (EN 10025-2). Para cada conjunto de elementos estudados apresentou-se uma curva média aproximada de modo a resumir o comportamento desses conjuntos de elementos.

Relativamente aos provetes de tubos nota-se que há muitas diferenças dentro da mesma classe de aço (Figura 3.1 e Figura 3.2). Os valores de tensão de cedência para espessura de 10 mm são superiores às de 12 e 8 mm. A mais elevada tensão de cedência obtida foi para o provete CHS 250x250x10, enquanto os valores mais baixos de tensão correspondem aos provetes SHS 200x200x8. Para estes casos não existe patamar de cedência e a diferença entre a tensão de cedência e tensão última é reduzida. Um nota importante a assinalar para os tubos de 10 e 12 mm é o facto de a extensão na rotura variar muito entre provetes e também dentro do mesmo tipo de provete.

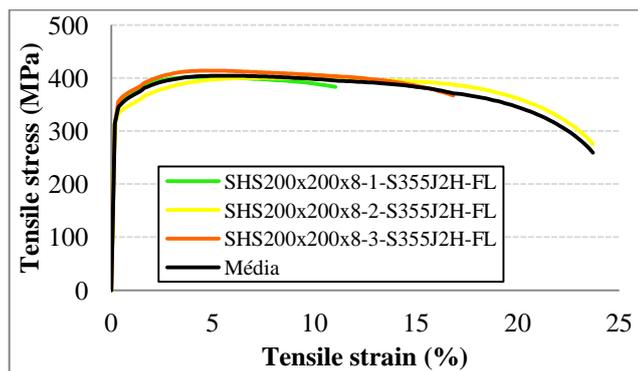


Figura 3.1 – Curvas tensão-extensão para tubos com 8 mm

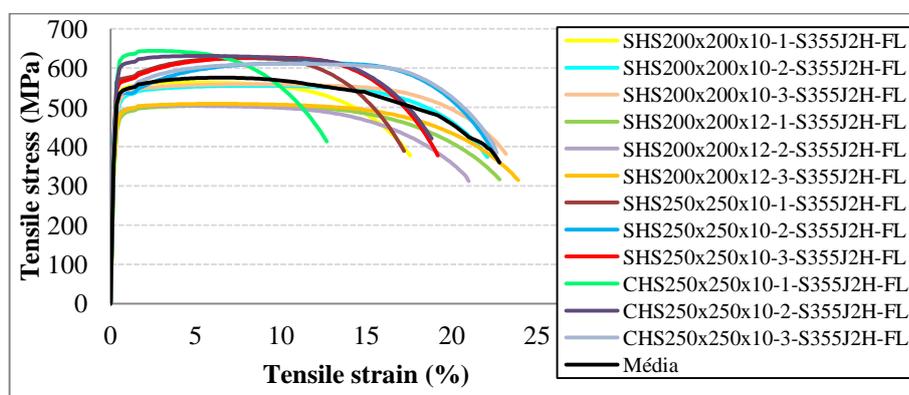


Figura 3.2 – Curvas tensão-extensão para tubos com 10 e 12 mm

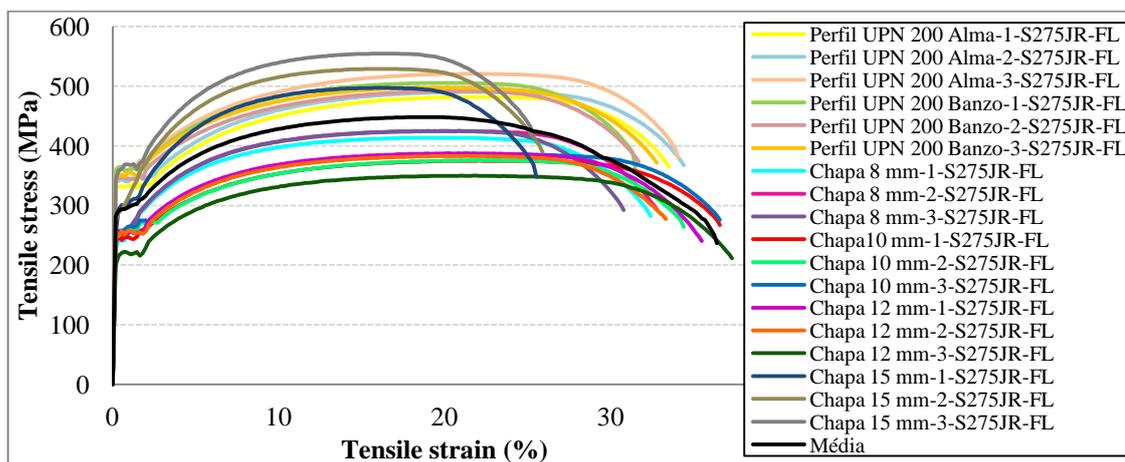


Figura 3.3 – Curvas tensão-extensão para perfis laminados e chapas da classe S275 com menos de 16 mm

De acordo com a análise da Figura 3.3 verifica-se que houve alguma diferença entre os dados analisados. Os valores mais baixos de tensão correspondem a chapas de 8, 10 e 12 mm de espessura e os mais altos para as chapas de 15 mm. Os perfis laminados apresentam valores

muito próximos das chapas de 15 mm. De salientar que as chapas (8, 10 e 12 mm) de classe de aço S275 apresentam o maior valor de extensão na rotura quando comparada com os perfis ou mesmo com os tubos. Ao contrário do verificado nos tubos, os aços laminados e chapas apresentam patamar de cedência (Figura 3.3, Figura 3.4a, Figura 3.4b, Figura 3.5, Figura 3.6a e Figura 3.6b).

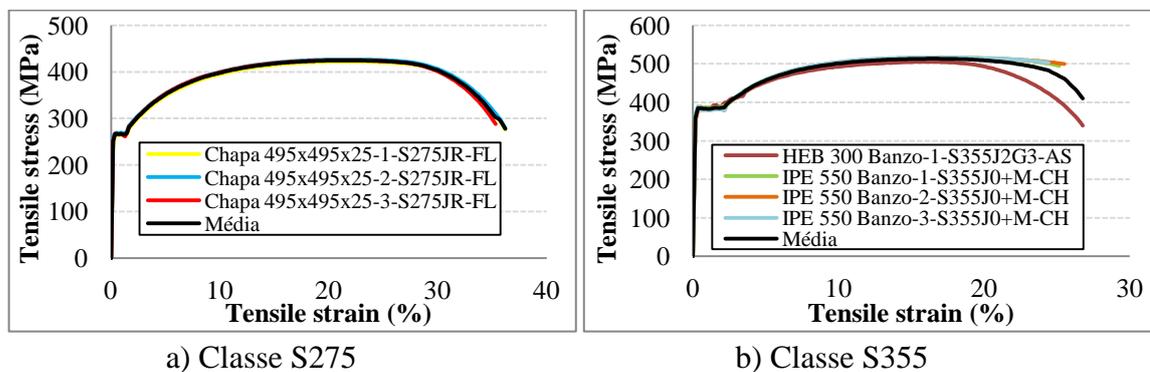


Figura 3.4 – Curvas tensão-extensão para perfis laminados e chapas com mais de 16 mm

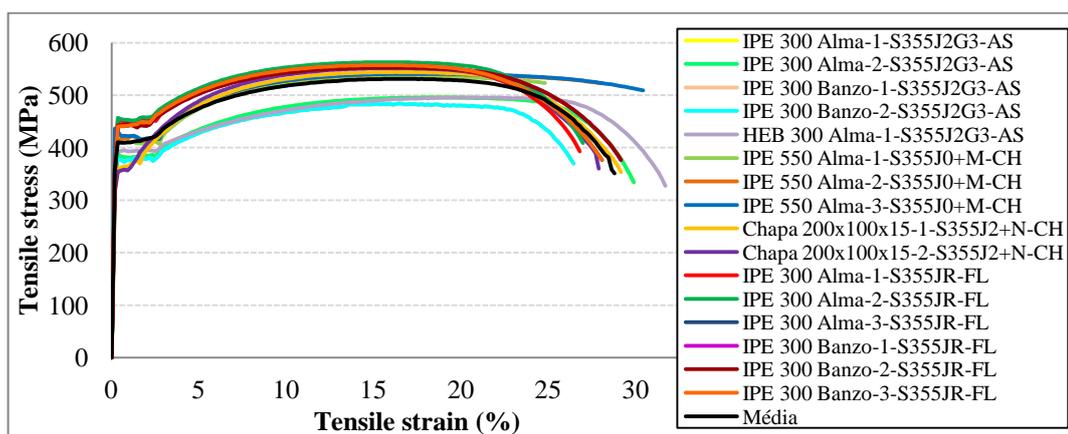


Figura 3.5 – Curvas tensão-extensão para perfis laminados e chapas da classe S355 com menos de 16 mm

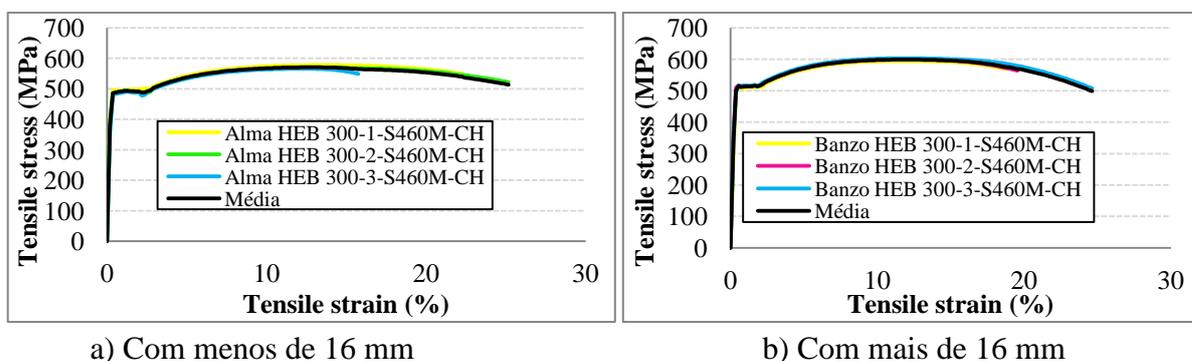


Figura 3.6 – Curvas tensão-extensão para perfis laminados da classe S460

3.3 Resultados a altas temperaturas

Tal como para o subcapítulo 3.2, os resultados analisados foram apresentados de acordo com a norma em que se inserem e de acordo com a temperatura a que foram ensaiados. Adicionalmente, e em todos os gráficos, apresentou-se uma curva média aproximada que resume o comportamento do grupo de provetes analisados.

3.3.1 Tubos

Os primeiros gráficos apresentados, Figura 3.7a e Figura 3.7b, correspondem a ensaios realizados a 200 °C. Para os tubos, os valores da tensão de cedência e da tensão última são sempre muito próximos, nomeadamente para os mais espessos (10 e 12 mm). Tal como a temperatura ambiente, estes provetes não possuem patamar de cedência.

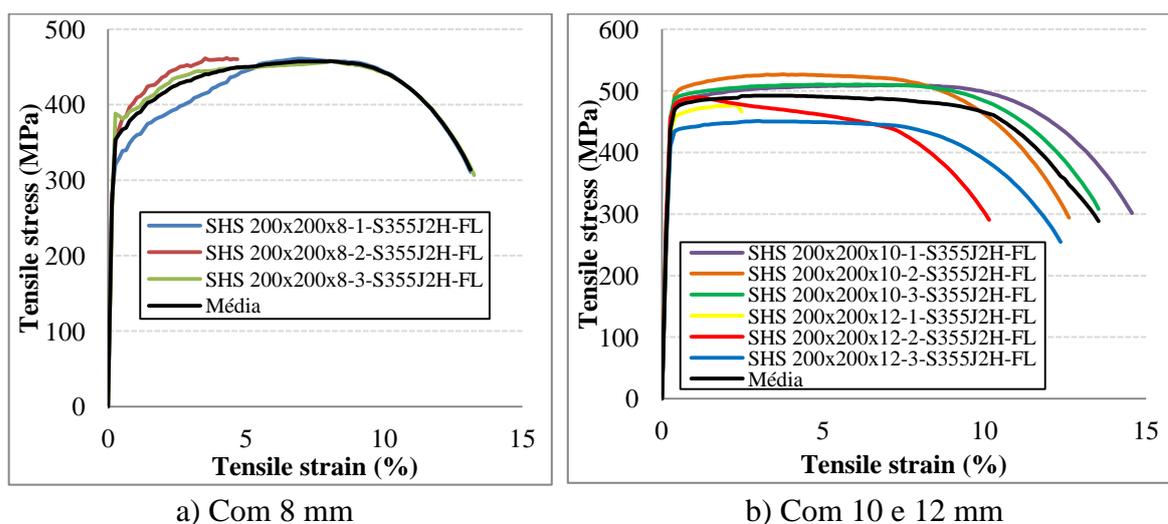


Figura 3.7 – Curvas tensão-extensão para tubos a 200 °C

Na Figura 3.8a (400 °C) verifica-se que, ao contrário de 200 °C, o valor da tensão de cedência e tensão última são muito semelhante. Para os provetes com 10 e 12 mm de espessura (Figura 3.8b) os valores de tensão começam a baixar para valores mais baixos de extensão em relação a 200 °C. Os perfis mais espessos apresentam valores mais elevados da extensão na rotura.

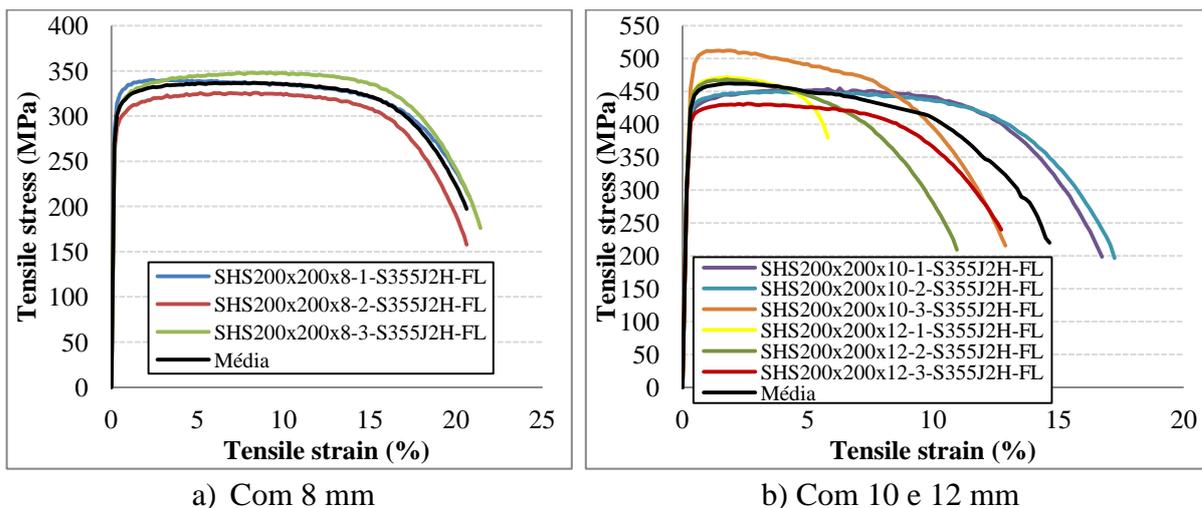


Figura 3.8 – Curvas tensão-extensão para tubos a 400 °C

Na Figura 3.9a e na Figura 3.9b foi notória a diferença do comportamento dos provetes relativamente às temperaturas já analisadas, tendo o valor da tensão baixado muito rapidamente após atingida a cedência. Neste caso houve diferenças ao nível da tensão e extensão na rotura, entre os valores dentro do mesmo tipo de provete.

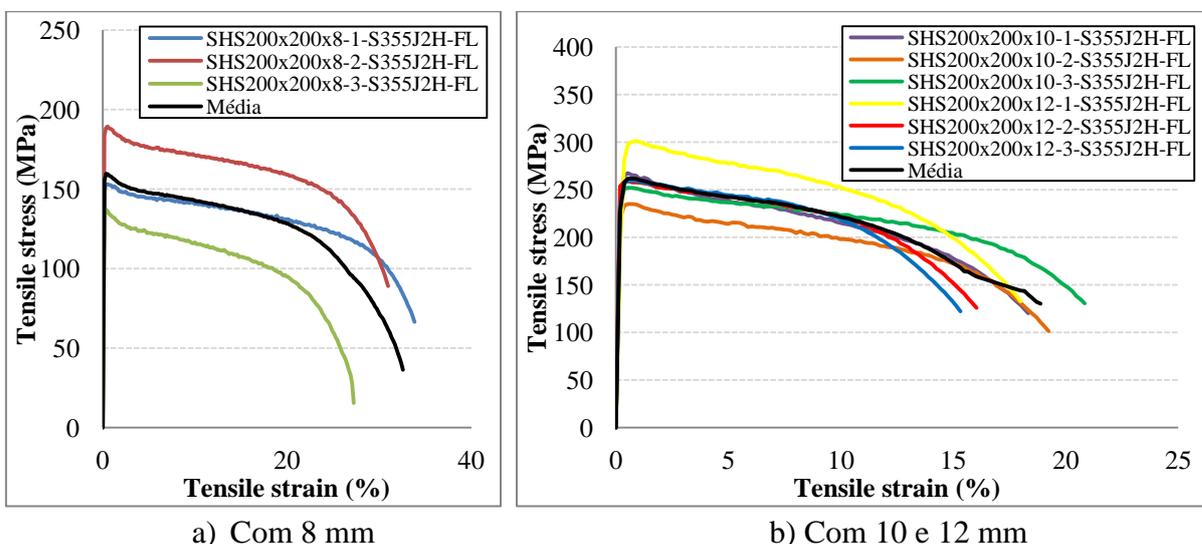


Figura 3.9 – Curvas tensão-extensão para tubos a 600 °C

À medida que a temperatura aumenta, a tensão baixa sempre para valores cada vez mais baixos de extensão, (Figura 3.10a e Figura 3.10b) sendo a tensão última logo atingida para valores de extensão muito reduzidos. Um facto relevante foi que, à medida que se aumentou a temperatura de ensaio, a extensão na rotura também aumentou, correspondendo a um comportamento mais dúctil a temperaturas mais elevadas.

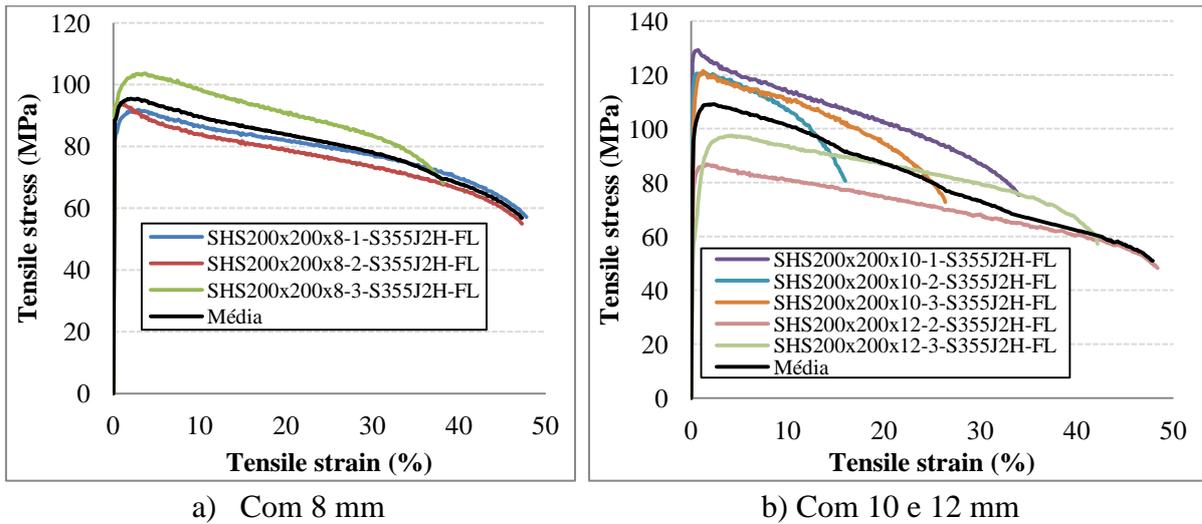


Figura 3.10 – Curvas tensão-extensão para tubos a 800 °C

3.3.2 Perfis Laminados e Chapas

A Figura 3.11a e a Figura 3.11b mostram as curvas tensão-extensão para perfis laminados e chapas a 100 °C e verifica-se que para esta temperatura é notório o patamar de cedência, assim como a diferença entre a tensão de cedência e a tensão última.

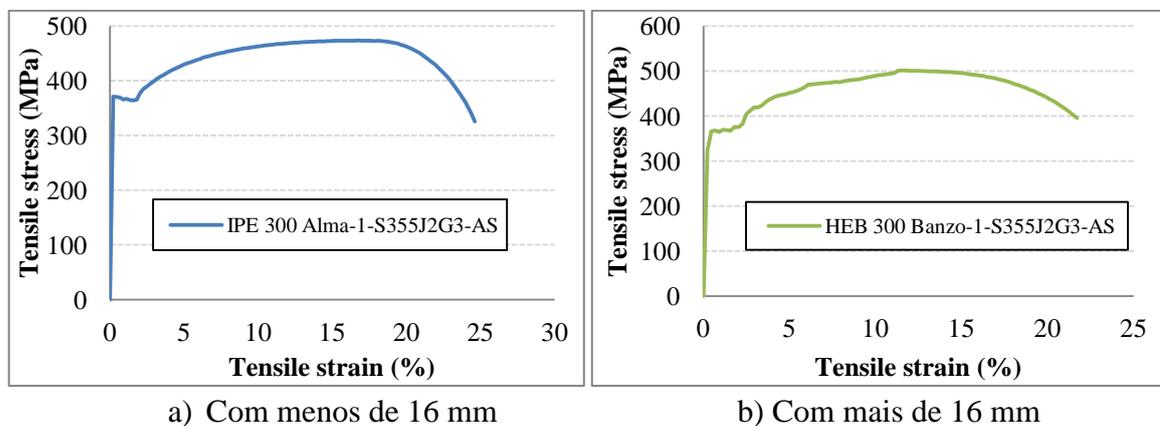


Figura 3.11 – Curvas tensão-extensão para perfis laminados e chapas a 100 °C

Da análise da Figura 3.12a e da Figura 3.12b verifica-se que ainda não há alteração do comportamento dos provetes. O patamar de cedência ainda existe e consegue-se distinguir entre a tensão de cedência e tensão última.

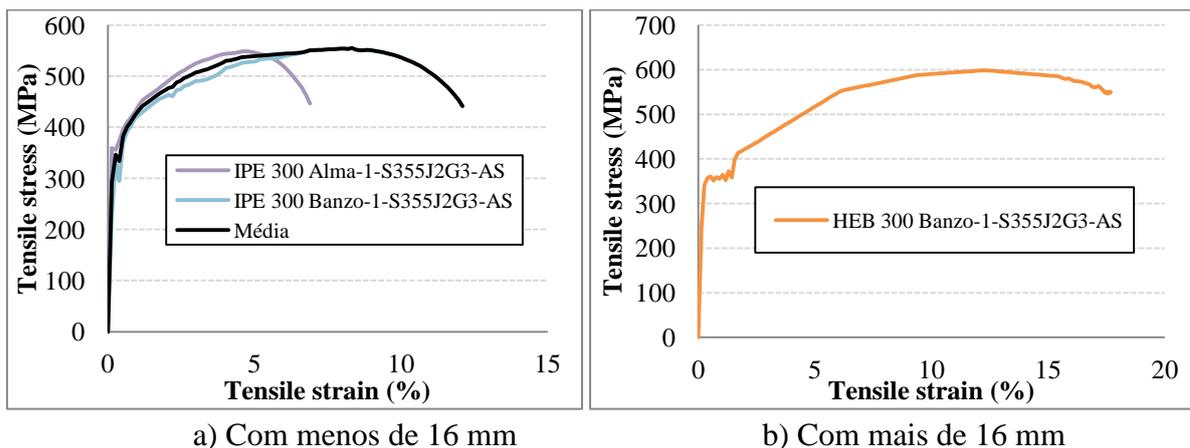


Figura 3.12 – Curvas tensão-extensão para perfis laminados e chapas a 200 °C

Para a temperatura de 300 °C, Figura 3.13, já se nota diferença no comportamento dos provetes pois o patamar de cedência desapareceu. As curvas obtidas não têm grandes diferenças entre elas.

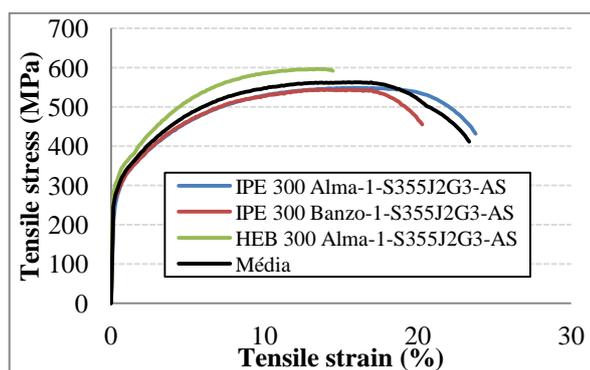


Figura 3.13 – Curvas tensão-extensão para perfis laminados e chapas a 300 °C

O comportamento dos provetes a 400 °C, Figura 3.14a e Figura 3.14b, é similar ao de 300 °C, a única diferença reside no facto de o valor da tensão última começar a baixar. De notar que o banzo do HEB 300 tem uma extensão na rotura muito inferior aos restantes. No entanto, como só foi feito um ensaio, este valor poderá não ser representativo.

Da Figura 3.15a é possível verificar que a 500 °C os valores de tensão obtidos para o IPE 550 são superiores aos do perfil IPE e HEB 300, embora a extensão na rotura seja inferior. Neste caso os valores para a tensão última e tensão de cedência começam a ficar mais próximos. Para a Figura 3.15b não há diferença entre os provetes. Os dados apresentados na Figura 3.16a e na Figura 3.16b são diferentes para a alma e o banzo do HEB 300, sendo o valor de tensão superior para a alma.

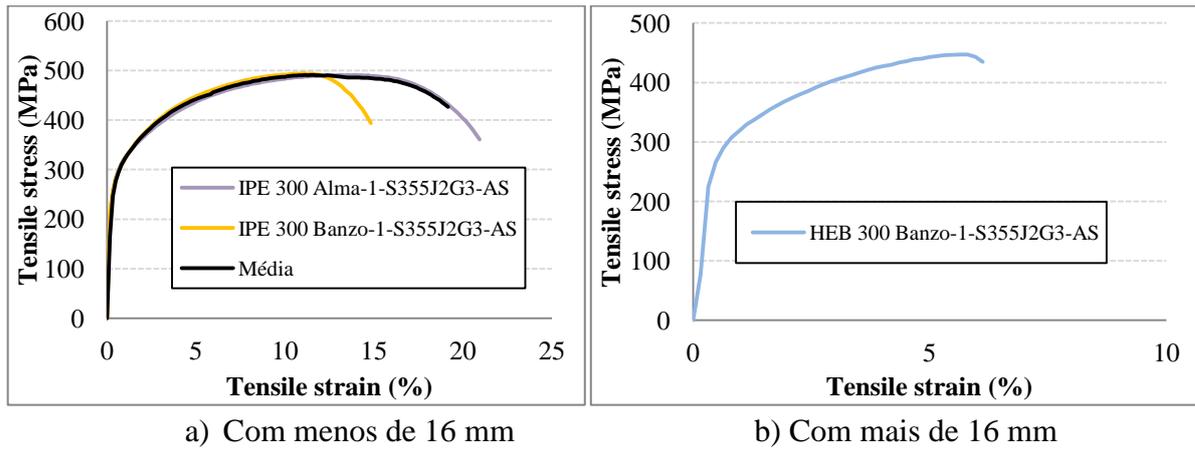


Figura 3.14 – Curvas tensão-extensão para perfis laminados e chapas a 400 °C

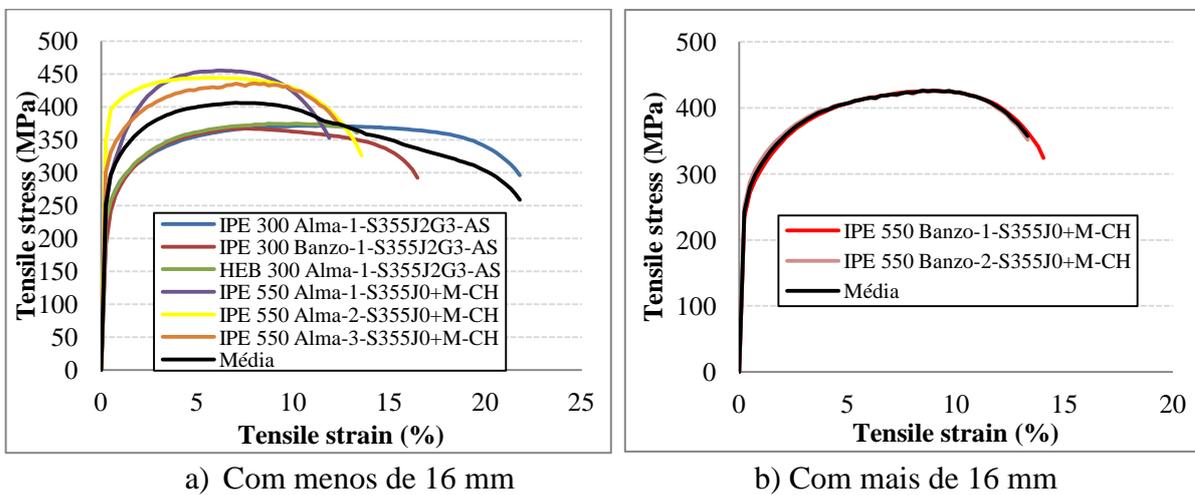


Figura 3.15 – Curvas tensão-extensão para perfis laminados e chapas a 500 °C da classe S355

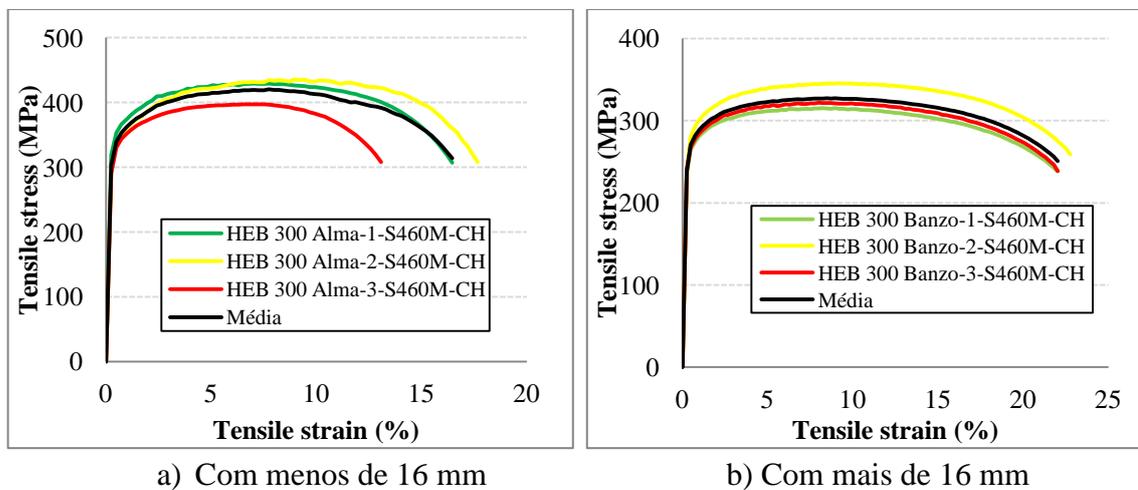


Figura 3.16 – Curvas tensão-extensão para perfis laminados e chapas a 500 °C da classe S460

Para a temperatura de 600 °C, o comportamento da alma do perfil IPE 300 (Figura 3.17a) e do banzo do perfil HEB 300 (Figura 3.17b) é semelhante. Nos dois casos, o valor da tensão última mantém-se praticamente constante até à rotura.

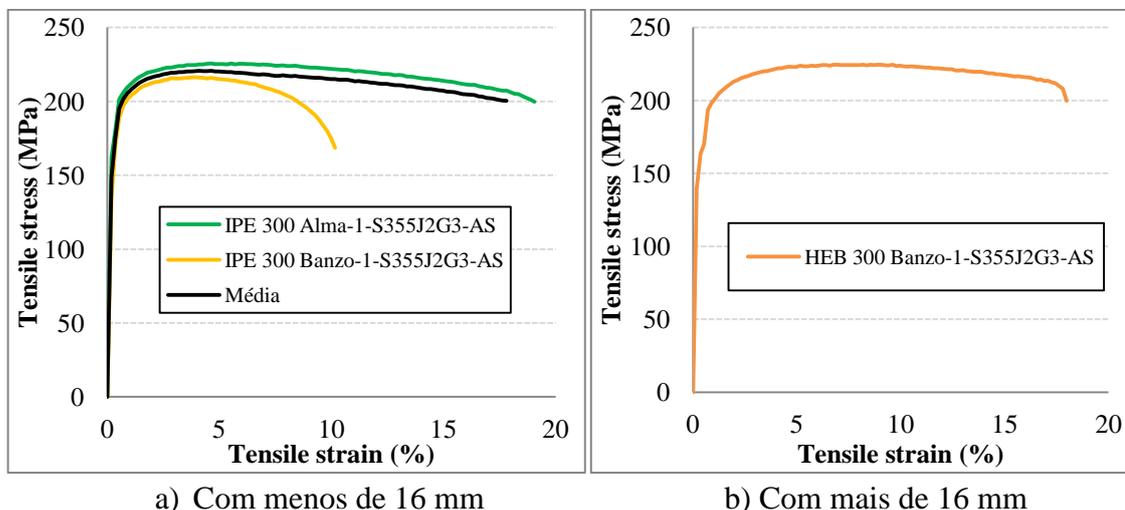


Figura 3.17 – Curvas tensão-extensão para perfis laminados e chapas a 600 °C

As curvas tensão-extensão para 700 °C (Figura 3.18a, Figura 3.18b, Figura 3.19a e Figura 3.19b) sofreram alguma alteração relativamente às anteriores. Para uma pequena extensão houve logo um decréscimo de tensão. Este tipo de curva é muito semelhante à curva apresentada pelos tubos a 600 °C, onde a partir desse valor a tensão começa logo a descer para valores de extensão baixos, sendo a tensão última logo atingida. A curva do banzo do perfil HEB 300, Figura 3.18b, está um pouco abaixo das restantes. Relativamente à Figura 3.19a os provetes da alma do HEB 300 obtiveram valores diferentes ao nível de tensão.

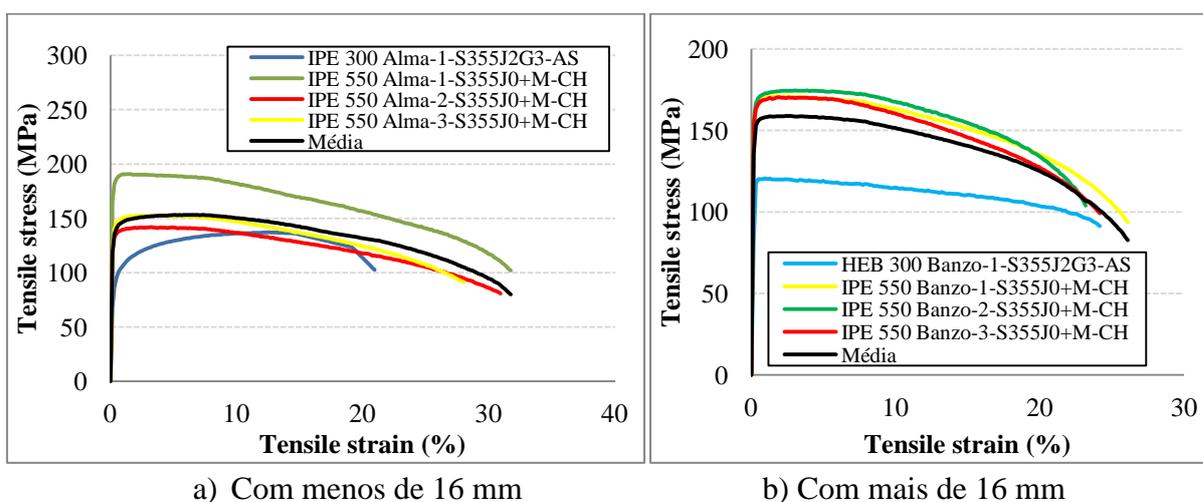


Figura 3.18 – Curvas tensão-extensão para perfis laminados e chapas a 700 °C da classe S355

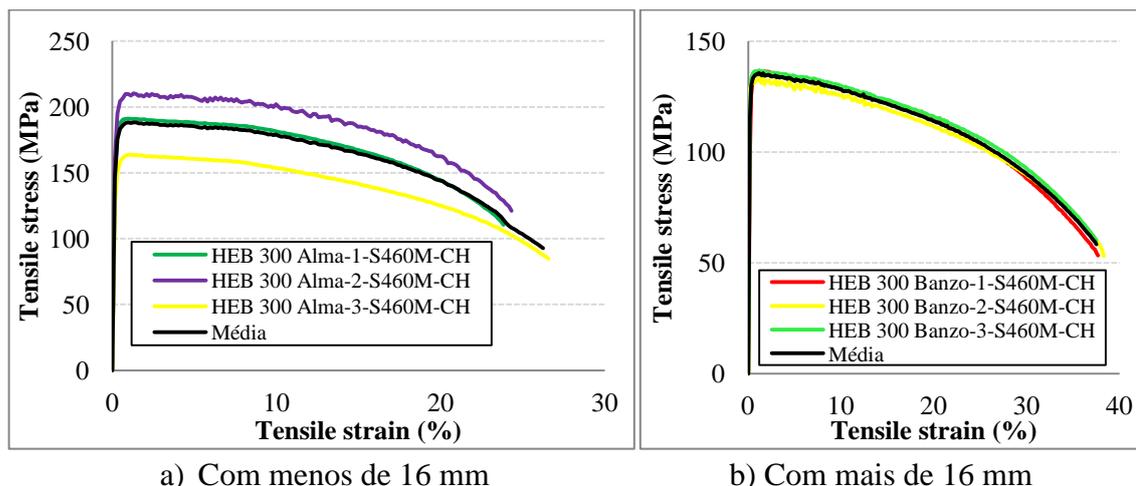


Figura 3.19 – Curvas tensão-extensão para perfis laminados e chapas a 700 °C da classe S460

De acordo com a Figura 3.20a, o comportamento exibido pelos provetes é semelhante à temperatura 700 °C, onde a tensão começa logo a descer. Relativamente à Figura 3.20b, a curva do provete estudado teve algumas alterações relativamente as curvas já estudadas. Neste caso a tensão só desceu para valores próximos de 10 % de extensão.

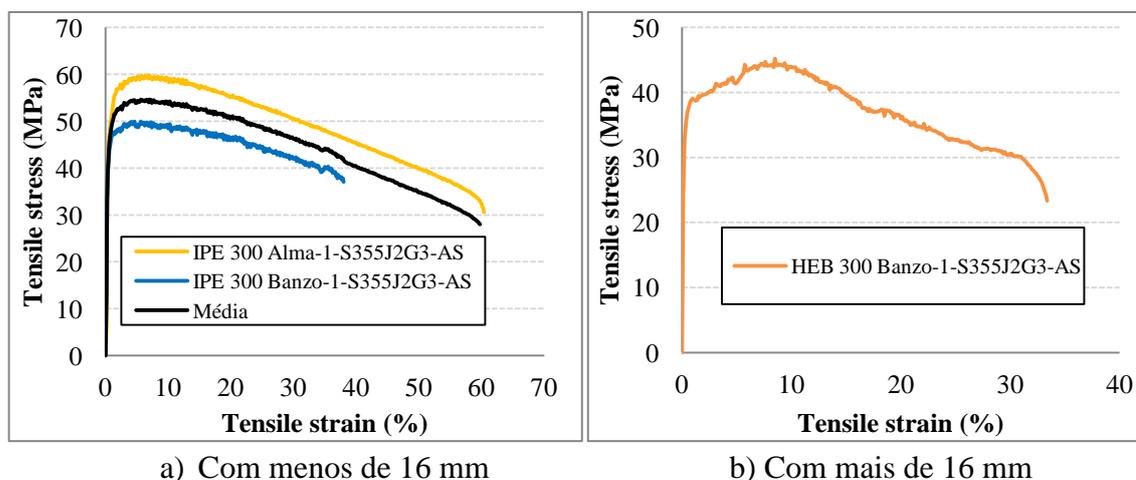


Figura 3.20 – Curvas tensão-extensão para perfis laminados e chapas a 800 °C

Tanto para 900 °C (Figura 3.21a) como para 1000 °C (Figura 3.21b), os valores obtidos para cada provete foram muito díspares. Estas diferenças estão relacionadas com o facto de estarmos perante temperaturas muito elevadas que dificultam a realização e correcta avaliação dos resultados.

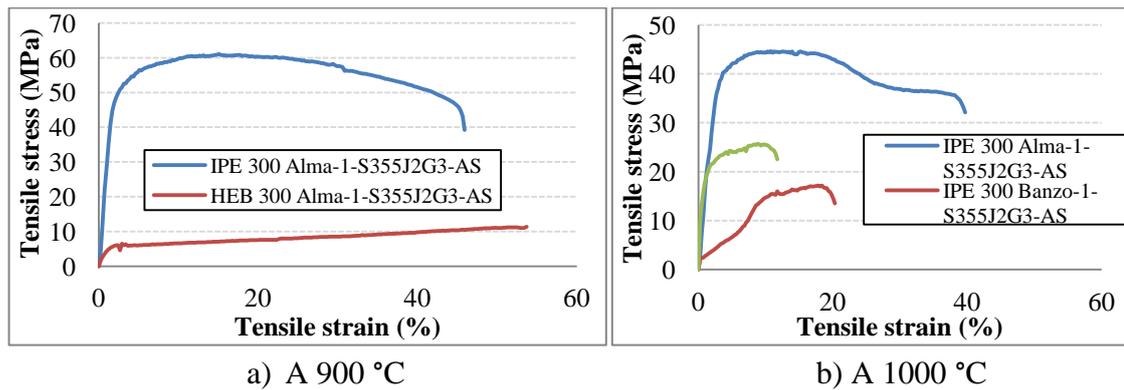


Figura 3.21 – Curvas tensão-extensão para perfis laminados e chapas

3.4 Degradação das propriedades mecânicas do aço com a temperatura

Neste subcapítulo procedeu-se à análise de todas as curvas médias elaboradas, para cada tipo de aço e para cada temperatura, no ponto 3.3: laminados e chapas da classe S355 com mais e menos de 16 mm de espessura, laminados da classe S460 com mais e menos de 16 mm de espessura, tubos com 8 mm de espessura e tubos com 10 e 12 mm de espessura. Para cada conjunto analisado procedeu-se ao cálculo dos factores de redução, como é apresentado no EN 1993-1-2, para o módulo de elasticidade (E), a tensão de proporcionalidade ($f_{p,\theta}$), a tensão de cedência ($f_{y,\theta}$) e a tensão última ($f_{u,\theta}$) (Figura 3.22). Estes factores de redução relacionam o valor das propriedades do aço a altas temperaturas com os correspondentes valores a 20 °C (Quadro 3.2, Quadro 3.3 e Quadro 3.4).

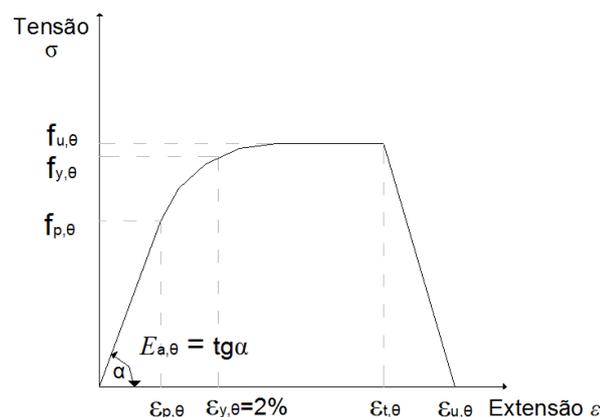


Figura 3.22 – Curva esquemática para se determinar as propriedades do aço estudadas

Neste caso, Figura 3.23a, é possível verificar que o valor da tensão máxima para cada curva vai sempre diminuindo à medida que a temperatura aumenta, à excepção da temperatura de 200 °C e 300 °C. Este aumento de tensão deve-se ao efeito *dynamic strain ageing*. Este fenómeno ocorre, para taxas de tensão e temperaturas intermédias, devido à interacção entre

os deslocamentos efectuados pelos átomos (Samuel *et al.*, 1996). O patamar de cedência deixa de ser evidente para temperaturas entre os 300 °C e 400 °C. No que se refere à extensão última, esta decresce com o aumento de temperatura, até valores de 600 °C e 700 °C, apresentando os valores mais elevados para temperaturas superiores. O decréscimo deve-se às transformações químicas que acontecem no aço, sendo que, à medida que a temperatura, aumenta as transformações abrandam e a ductilidade aumenta (Qiang *et al.*, 2012a). Outro facto relevante é que a diferença entre o valor da tensão de cedência e tensão última decresce com o aumento de temperatura. Esta observação está de acordo com o proposto com o EN 1993-1-12, que admite um patamar de endurecimento para temperaturas inferiores a 400 °C. Da Figura 3.23b as conclusões a retirar são as mesmas da Figura 3.23a, sendo que para esta espessura, a extensão na rotura a altas temperaturas é sempre inferior à extensão de rotura a 20 °C. Outro aspecto relevante é que para os dois casos, a altas temperaturas, dá-se o amolecimento do aço, com o conseqüente aumento de extensão na rotura.

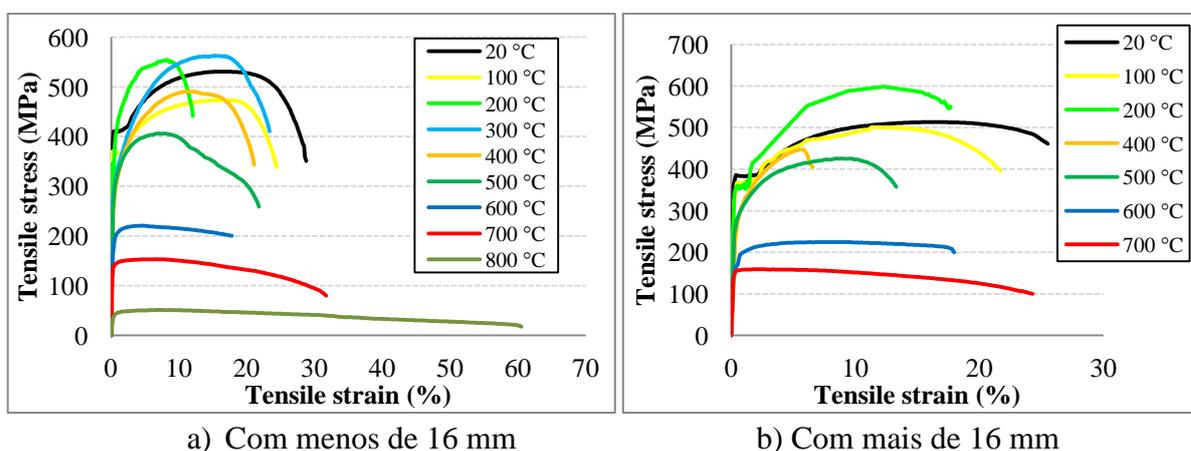


Figura 3.23 – Curvas tensão-extensão para perfis laminados e chapas da classe S355

Quadro 3.2 – Factores de redução para perfis laminados e chapas de classe S355

Temperatura (°C)	S355 (Espessura < 16 mm)				S355 (Espessura > 16 mm)			
	$k_{E,\theta}$	$k_{p,\theta}$	$k_{y,\theta}$	$k_{u,\theta}$	$k_{E,\theta}$	$k_{p,\theta}$	$k_{y,\theta}$	$k_{u,\theta}$
20	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
100	0,925	0,890	0,874	0,895	0,851	0,844	0,951	0,976
200	0,860	0,831	1,135	1,049	0,813	0,903	0,891	1,081
300	0,876	0,590	0,933	1,064	-	-	-	-
400	0,590	0,591	0,893	0,929	0,561	0,694	0,960	0,871
500	0,523	0,604	0,867	0,768	0,506	0,633	0,918	0,830
600	0,412	0,356	0,519	0,417	0,387	0,426	0,555	0,437
700	0,212	0,283	0,361	0,290	0,239	0,353	0,414	0,310
800	0,063	0,080	0,116	0,097	-	-	-	-

A análise para a Figura 3.24a e Figura 3.24b pode ser conjunta pois o comportamento para os dois grupos estudados é similar. O valor da tensão decresce à medida que a temperatura aumenta, no entanto, a tensão desce mais rapidamente para os elementos com mais de 16 mm de espessura (Figura 3.24b). Nos dois casos, a 700 °C verifica-se pouca diferença entre a tensão última e tensão de cedência. A tensão vai sempre descendo para valores cada vez mais baixos de extensão, quando a temperatura aumenta. A explicação para a diminuição e aumento a 500 °C e 700 °C, respectivamente, da extensão é a mesma para perfis laminados e chapas da classe S355.

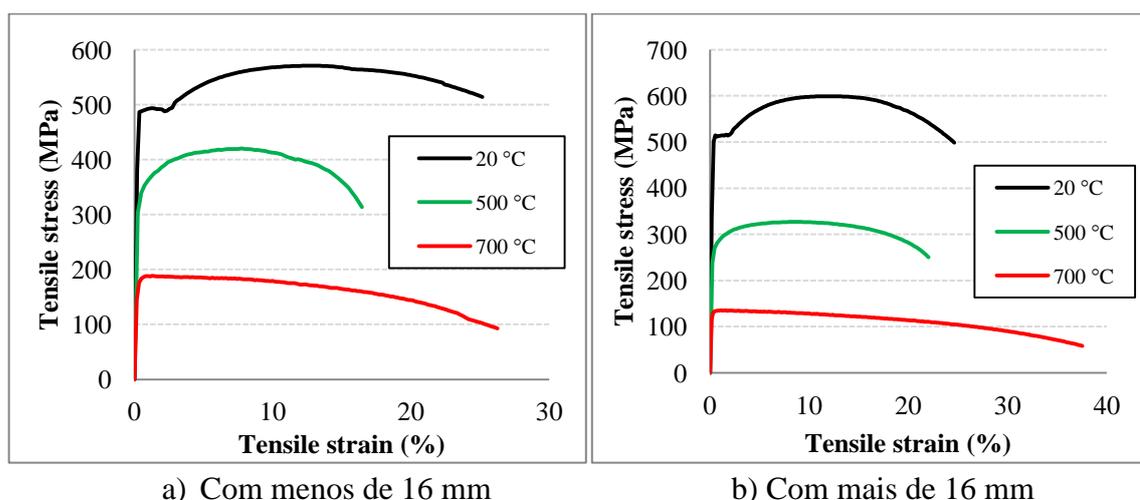


Figura 3.24 – Curvas tensão-extensão para perfis laminados da classe S460

Quadro 3.3 – Factores de redução para perfis laminados de classe S460

Temperatura (°C)	S460 (Espessura < 16 mm)				S460 (Espessura > 16 mm)			
	$k_{E,\theta}$	$k_{p,\theta}$	$k_{y,\theta}$	$k_{u,\theta}$	$k_{E,\theta}$	$k_{p,\theta}$	$k_{y,\theta}$	$k_{u,\theta}$
20	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
500	0,597	0,615	0,782	0,736	0,533	0,527	0,604	0,546
700	0,260	0,295	0,380	0,330	0,218	0,224	0,263	0,227

De acordo com a Figura 3.25a o valor da tensão diminui quando a temperatura aumenta, à excepção de 200 °C devido ao efeito *dynamic strain ageing*, explicado anteriormente para perfis laminados e chapas da classe S355. O fenómeno da variação da extensão na rotura é o mesmo dos perfis laminados e tubos para S355. Como já foi referido, não existe patamar de cedência para os tubos. Na Figura 3.25b o comportamento é similar ao dos tubos menos espessos. Também aqui se verifica o amolecimento do aço para temperaturas superiores a 600 °C e o correspondente aumento da extensão na rotura.

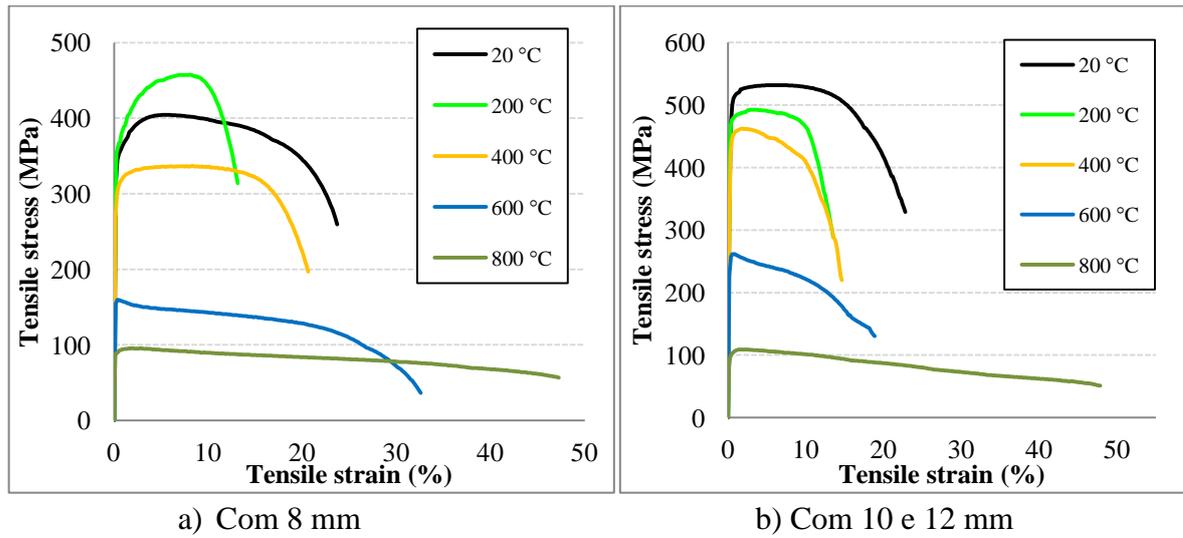


Figura 3.25 – Curvas tensão-extensão para tubos

Quadro 3.4 – Factores de redução para tubos de 8 mm e conjunto de 10 e 12 mm de espessura

Temperatura (°C)	Tubos com 8 mm				Tubos com 10 e 12 mm			
	$k_{E,\theta}$	$k_{p,\theta}$	$k_{y,\theta}$	$k_{u,\theta}$	$k_{E,\theta}$	$k_{p,\theta}$	$k_{y,\theta}$	$k_{u,\theta}$
20	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
200	0,779	0,914	1,079	1,131	0,852	0,831	0,927	0,926
400	0,539	0,696	0,855	0,832	0,670	0,572	0,877	0,869
600	0,494	0,401	0,396	0,395	0,363	0,432	0,483	0,492
800	0,203	0,229	0,247	0,236	0,133	0,150	0,207	0,205

Com base nas curvas tensão-extensão para as diferentes temperaturas determinou-se a extensão correspondente à tensão última ($\epsilon_{t,\theta}$) e extensão na rotura ($\epsilon_{u,\theta}$) (Figura 3.22). Deste modo, foi possível avaliar a diferença de ductilidade do aço com o aumento da temperatura. Da Figura 3.26a verificou-se que à medida que a temperatura aumentava a tensão começava a descer para extensões mais pequenas. O valor de $\epsilon_{t,\theta}$ vai diminuindo com a temperatura, na maioria dos casos. Para a Figura 3.26b, em quase todos os casos, o valor da extensão $\epsilon_{u,\theta}$ diminui um pouco a partir de 20 °C, mas para valores de temperatura mais elevados esta extensão subiu muito mostrando aqui um aumento da ductilidade do aço para temperaturas elevadas.

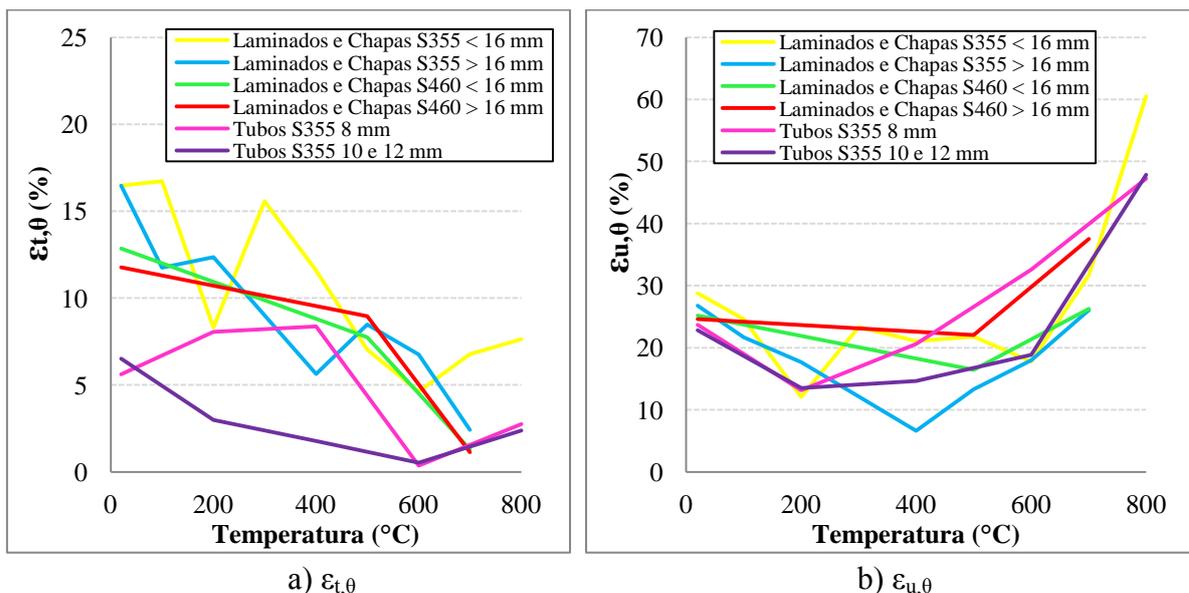


Figura 3.26 – Variação das extensões com a temperatura

Adicionalmente, com base nos valores de factores de redução, obtidos anteriormente, elaborou-se gráficos comparativos entre os diversos elementos estudados. Para a tensão de cedência (Figura 3.27a), até 400 °C os valores são inferiores aos do EN 1993-1-2, à excepção da temperatura de 200 °C, onde para os laminados e chapas com menos de 16 mm de espessura e para os tubos de 8 mm houve um aumento da tensão de cedência. Este aumento de tensão deveu-se ao fenómeno de *dynamic strain ageing*, explicado anteriormente para perfis laminados e chapas da classe S355. De notar que, para os tubos, os valores obtidos estão sempre abaixo dos apresentados pelo EN 1993-1-2 até 600 °C; para os perfis laminados e chapas, a partir dos 400 °C, os valores dos factores de redução passam a ser superiores em relação aos propostos pelo EN 1993-1-2. Para a tensão de proporcionalidade (Figura 3.27b) em todos os casos, a partir de 200 °C, os valores são superiores aos apresentados pelo EN 1993-1-2, sendo este mais conservador. Para o módulo de elasticidade (Figura 3.28a) os valores obtidos são inferiores aos apresentados pelo EN 1993-1-2 até 500 °C, mas a partir desse valor os factores de redução são superiores. De notar que os valores apresentados pelos perfis laminados da classe S460 são sempre iguais ou superiores aos valores apresentados pelo EN 1993-1-2. O factor de redução para a tensão última (Figura 3.28b) não é apresentado no EN 1993-1-2 mas compararam-se os resultados obtidos para os conjuntos estudados. Neste caso os resultados obtidos são muito semelhantes, havendo, como para a tensão de cedência, um aumento para temperaturas entre 200 °C e 300 °C. Comparando os resultados ao nível de classe do aço pode-se verificar que os resultados para a classe S460 com espessura menor que 16 mm são sempre iguais ou superiores aos da classe S355 para a mesma espessura. Para os provetes com mais de 16 mm de espessura e classe S460 acontece o contrário, os parâmetros foram sempre inferiores aos de classe S355 com mais de 16 mm de espessura. Quando se compara os resultados para os aços laminados e chapas da classe S460 com os valores obtidos

por Outinen *et al.* (2000), analisado no subcapítulo 2.2.1, verifica-se que, para as temperaturas estudadas, os valores obtidos foram muito parecidos para os dois casos. Já no caso de (Qiang *et al.*, 2012b), analisado no subcapítulo 2.2.1, os resultados, para o aço S690, são muito diferentes quando comparados com os aços laminados e chapas da classe S460. Neste caso já se tinha verificado que os resultados obtidos por este autor foram muito diferentes de tudo o que já se tinha estudado.

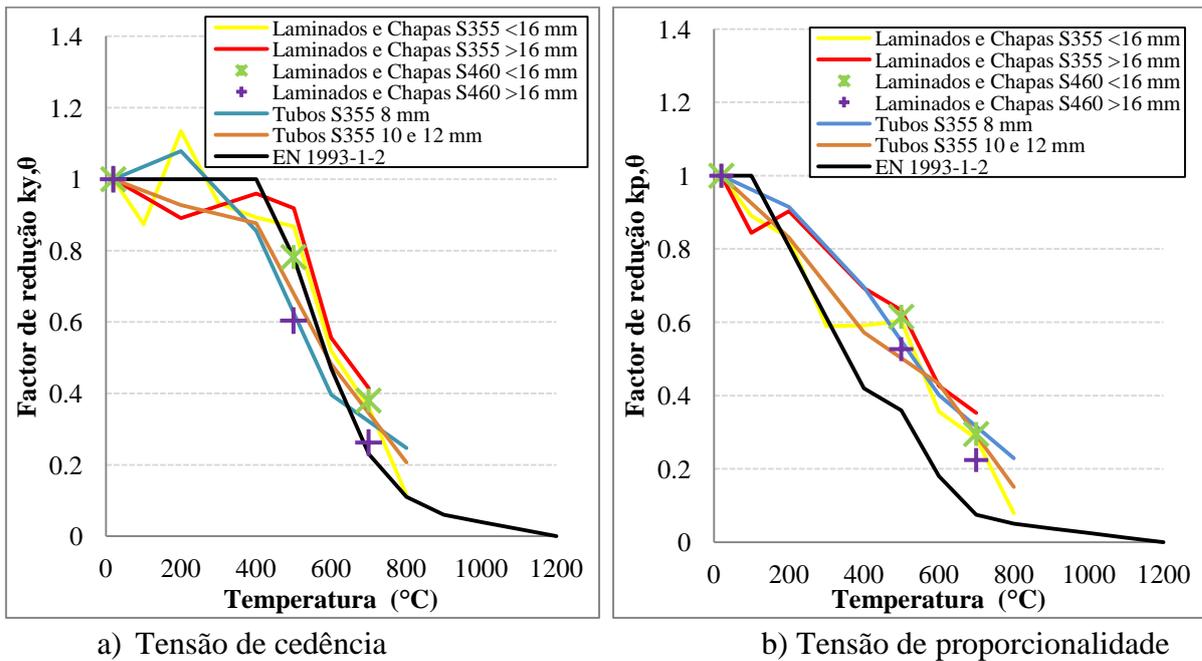


Figura 3.27 – Factores de redução

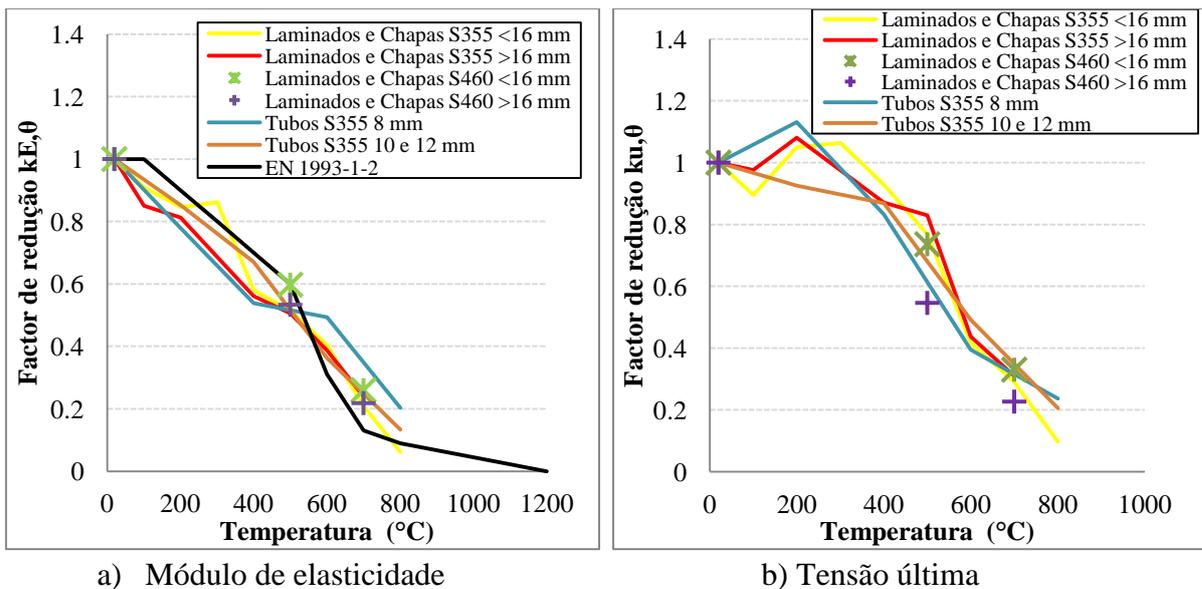


Figura 3.28 – Factores de redução

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL DE AVALIAÇÃO DA REDUÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO PARA VÁRIOS VALORES DE TEMPERATURA

4.1 Introdução

No projecto Impactfire PTDC/ECM/110807/2009 está previsto a realização de ensaios de impacto em ligações metálicas viga-pilar e em componentes de ligações (T-Stub e Reverse Channel). Esses ensaios servirão de base à calibração de modelos numéricos, que, por sua vez, irão permitir a parametrização de algumas características que se revelem importantes face a esta solicitação e por fim, apoiarão o desenvolvimento de expressões e metodologias de dimensionamento. Para a calibração dos ensaios numéricos é necessário conhecer com rigor todas as propriedades (geométricas e mecânicas) dos modelos ensaiados. Este capítulo da tese refere-se à caracterização das propriedades mecânicas do aço destes modelos, para vários valores de temperatura. Deste modo, realizaram-se ensaios de tracção de provetes à temperatura ambiente e ensaios estacionários para temperaturas de 450 °C e 600 °C. Estas temperaturas foram escolhidas porque, a 450 °C, já existe alteração no módulo de elasticidade e a tensão de cedência começa a baixar, a 600 °C já há grandes alterações nas propriedades mecânicas do aço e esta temperatura é de forma simplificada denominada de temperatura crítica.

Os testes à temperatura ambiente foram realizados de acordo com a norma NP EN 10002-1 2006, enquanto os de altas temperaturas seguiram a norma NP EN 10002-5 1992, respeitando a derivação de três graus de temperatura apresentada na parte 9.3.

4.2 Setup experimental

4.2.1 Esquema geral de ensaio

Para a realização do ensaio foi utilizada uma prensa composta por duas garras que traccionava o provete. O ensaio foi realizado com controlo do deslocamento. Nos ensaios a temperaturas elevadas, foi colocado um forno na prensa de modo a aquecer o provete e mantê-lo à temperatura constante requerida (Figura 4.1).

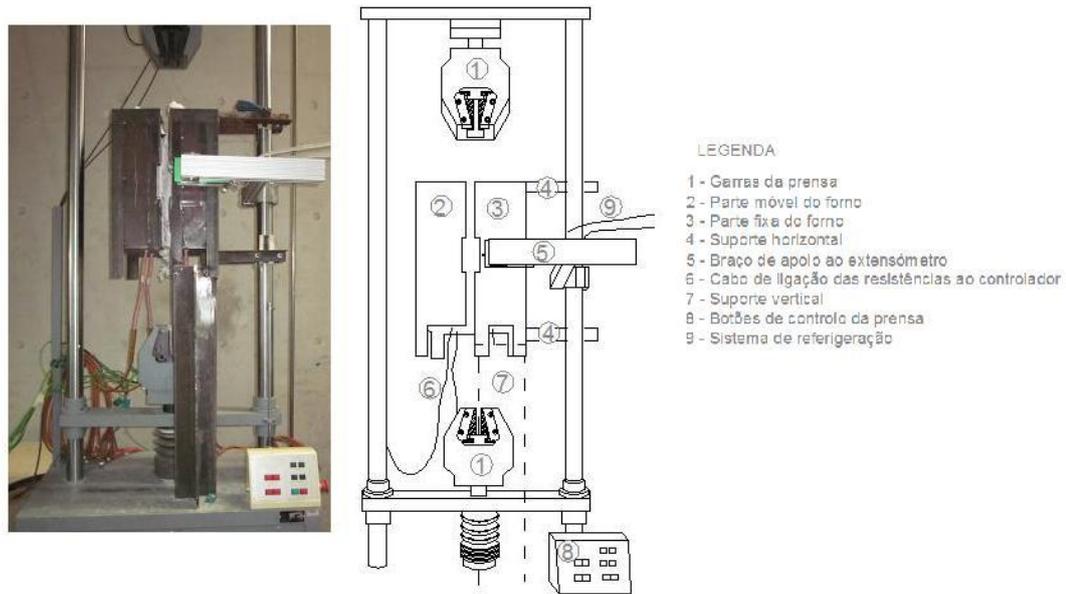


Figura 4.1 – Esquema geral do ensaio para altas temperaturas

O forno utilizado foi desenvolvido e construído no âmbito desta tese. É um forno de secção prismática com dimensões 320x320x450 mm. O revestimento do forno é constituído por três camadas: camada exterior em chapa metálica; camada intermédia em lã de rocha com 10 mm de espessura, o que permite minimizar as perdas de calor, e camada interior com resistências eléctricas que aplicam o aquecimento pretendido para a realização dos ensaios. De modo a facilitar a montagem e desmontagem dos ensaios, este forno possui dobradiças que possibilitavam a sua abertura para introduzir e retirar mais facilmente o provete; nas partes inferior e superior foram criadas aberturas para uma mais fácil colocação e fixação do provete na prensa (Figura 4.2).



Figura 4.2 – a) Forno aberto; b) parte esquerda, móvel; c) parte direita fixa

4.2.2 Procedimento de ensaio e correspondente instrumentação

Os ensaios foram realizados com controlo do deslocamento, com velocidades de deslocamento entre 0,003 mm/s e 0,02 mm/s até à rotura do provete. A Figura 4.3a e a Figura 4.3b mostram o deslocamento introduzido no provete. Na Figura 4.3a, a parte inicial corresponde à fase relativa ao aquecimento do provete e consequente dilatação, enquanto a parte mais inclinada corresponde ao carregamento; a Figura 4.3b refere-se ao ensaio a temperatura ambiente onde existe um aumento contínuo do deslocamento.

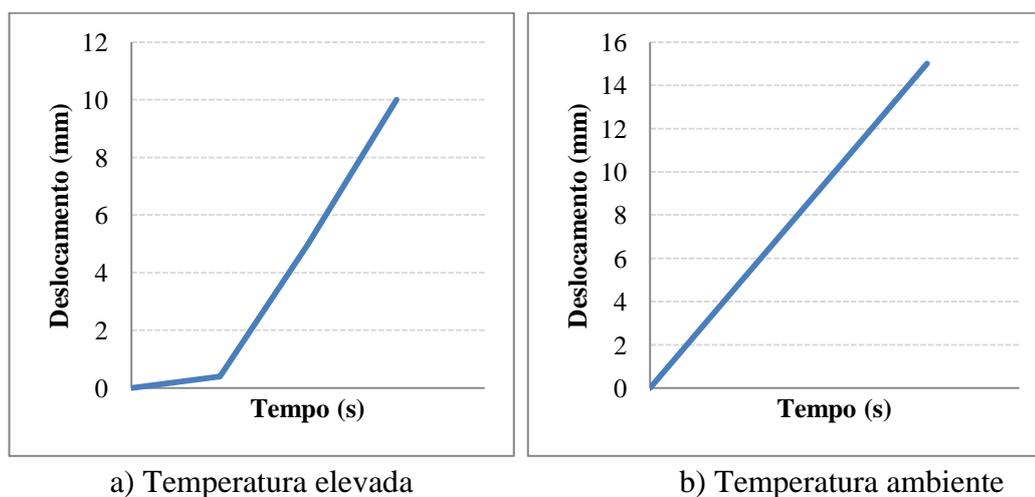


Figura 4.3 – Curva deslocamento-tempo

Nos ensaios a altas temperaturas, o aquecimento do provete foi realizado a uma taxa de aquecimento de 600 °C/h até se atingir o valor de temperatura pretendido (Figura 4.4). Para a temperatura estabilizar esperou-se cerca de 10 a 15 minutos até se verificar muito poucas alterações dentro do limite estabelecido na norma NP EN 10002-5 (média da temperatura tem de estar entre o desvio de 3 °C e -3°C). De modo a controlar-se mais facilmente a temperatura ligaram-se os termopares da parte superior ao controlador. O controlador foi utilizado para ensaiar às temperaturas requeridas. O aquecimento foi feito através das resistências térmicas do forno, cuja taxa de aquecimento foi definida por um controlador existente neste sistema de aquecimento. Este controlador permitiu o aquecimento das resistências até à temperatura pretendida, assim como a manutenção da temperatura.

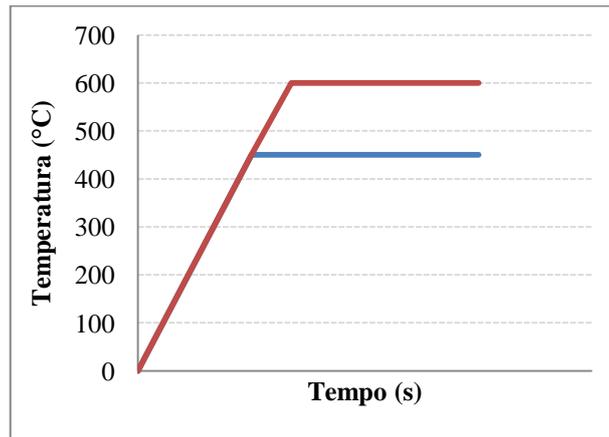


Figura 4.4 – Aumento de temperatura nos ensaios (450 °C e 600 °C)

Para os ensaios à temperatura ambiente, utilizou-se um extensómetro mecânico que, com umas garras, se fixava ao provete e em alguns casos uns extensómetros YFLA-5. Para os ensaios a altas temperaturas, o deslocamento do provete, durante o ensaio, foi obtido por um extensómetro de alta temperatura, Figura 4.5. O modelo do extensómetro utilizado foi o 3548HI-0200-050-ST.

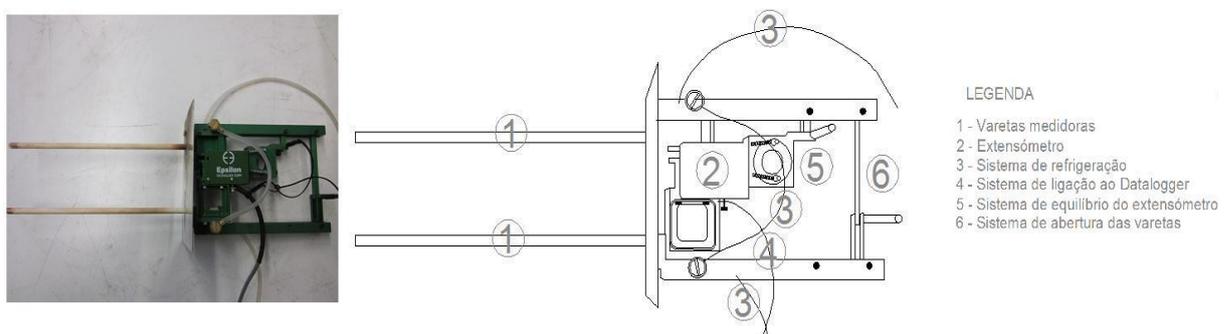


Figura 4.5 – Extensómetro de alta temperatura e suas componentes

O modo de funcionamento deste extensómetro consistia na colocação das varetas medidoras dentro do forno, em contacto com o provete. Estas varetas são constituídas por sílica e alumínio. Como em alguns ensaios a temperatura era muito elevada e para não se danificar o extensómetro, utilizou-se um sistema de refrigeração de modo a que o extensómetro fosse mantido a uma temperatura constante, muito abaixo da temperatura de ensaio (Figura 4.6a). Este extensómetro possibilitava o seu ajuste vertical e horizontal, de modo a obter o valor correcto do deslocamento do provete (Figura 4.6b e Figura 4.6c).



Figura 4.6 – a) Máquina de refrigeração; b) ajuste vertical; c) ajuste horizontal

Para aferir a temperatura no provete soldaram-se termopares ao provete (Figura 4.7a e Figura 4.7b). Os termopares foram colocados nas duas faces do provete e em três zonas. Estas zonas foram identificadas como superior, intermédia e inferior (Figura 4.7c). Através da ligação destes elementos ao datalogger foi possível medir a temperatura a que o provete se encontrava.

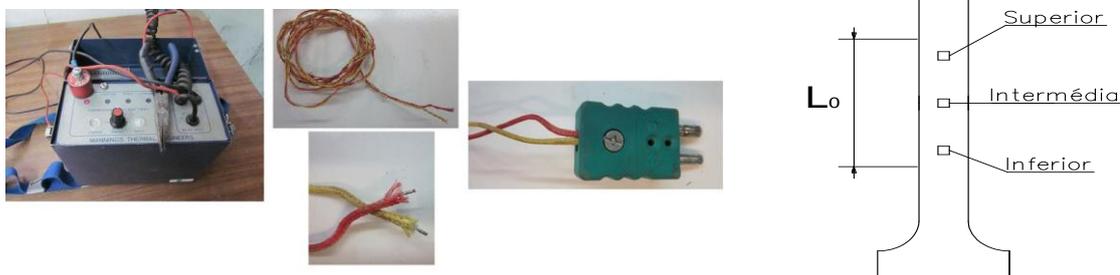


Figura 4.7 – a) Máquina de soldar termopares; b) termopares; c) posição dos termopares

O datalogger TDS-530 foi utilizado para registar a temperatura nos provetes (no caso de ensaios a temperatura elevada) e o deslocamento do provete de 20 em 20 segundos.

4.3 Programa experimental

De forma a obter-se uma gama de resultados alargada foram ensaiados provetes de diversos tipos. Os provetes testados foram retirados de chapas com 10, 15 e 25 mm de espessura, banzo de IPE 300, de tubo com dimensões 200x200 com 8 mm e 10 mm de espessura (Quadro 4.1). As classes de aço ensaiadas foram S355J0+N, S355J2+N, S355J2 e S355J2H.

Quadro 4.1 - Provetes ensaiados

Provete	Norma	Temperatura (°C)	Classe do aço	Largura b (mm)	Espessura do provete (mm)	Velocidade de Carregamento (mm/s)
Chapa 10 mm	EN 10025-2	600	S355J0+N	21,65	9,99	0,01
	EN 10025-2	600	S355J0+N	21,20	9,98	0,01
	EN 10025-2	450	S355J0+N	21,43	9,80	0,01
	EN 10025-2	450	S355J0+N	21,46	9,80	0,01
	EN 10025-2	450	S355J0+N	21,47	9,80	0,01
Chapa 15 mm	EN 10025-2	450	S355J2+N	19,95	15,63	0,01
	EN 10025-2	450	S355J2+N	19,10	15,54	0,01
	EN 10025-2	450	S355J2+N	19,80	15,53	0,01
	EN 10025-2	600	S355J2+N	19,93	15,62	0,01
	EN 10025-2	600	S355J2+N	20,09	15,66	0,01
	EN 10025-2	600	S355J2+N	19,88	15,37	0,01
Chapa 25 mm	EN 10025-2	20	S355J2+N	28,16	25,20	0,02
	EN 10025-2	20	S355J2+N	29,56	25,14	0,02
	EN 10025-2	20	S355J2+N	28,75	25,13	0,02
IPE 300 Banzo	EN 10025-2	20	S355J2	18,76	10,53	0,02
	EN 10025-2	20	S355J2	17,97	10,00	0,02
	EN 10025-2	20	S355J2	19,31	10,50	0,02
	EN 10025-2	20	S355J2	18,32	9,92	0,02
	EN 10025-2	600	S355J2	18,02	10,30	0,003
	EN 10025-2	600	S355J2	16,43	9,90	0,006
	EN 10025-2	600	S355J2	17,48	10,60	0,003
SHS 200x200x8	EN 10219-2	20	S355J2H	20,33	7,85	0,02
	EN 10219-2	20	S355J2H	20,28	7,95	0,02
	EN 10219-2	20	S355J2H	20,67	7,70	0,02
	EN 10219-2	450	S355J2H	19,83	7,90	0,01
	EN 10219-2	450	S355J2H	19,88	7,80	0,01
	EN 10219-2	450	S355J2H	19,80	7,80	0,01
SHS 200x200x10	EN 10219-2	20	S355J2H	21,10	9,72	0,02
	EN 10219-2	20	S355J2H	21,82	10,13	0,02
	EN 10219-2	20	S355J2H	20,39	9,81	0,02
	EN 10219-2	450	S355J2H	18,68	9,90	0,004
	EN 10219-2	600	S355J2H	18,46	9,91	0,003
	EN 10219-2	450	S355J2H	18,45	9,96	0,01

Os provetes provenientes dos elementos já referidos foram maquinados de forma a ficarem todos com dimensões semelhantes (Figura 4.8) e cumprirem as normas EN 10002-1 e EN 10002-5. O valor de L_0 considerado nos ensaios foi de 50 mm.

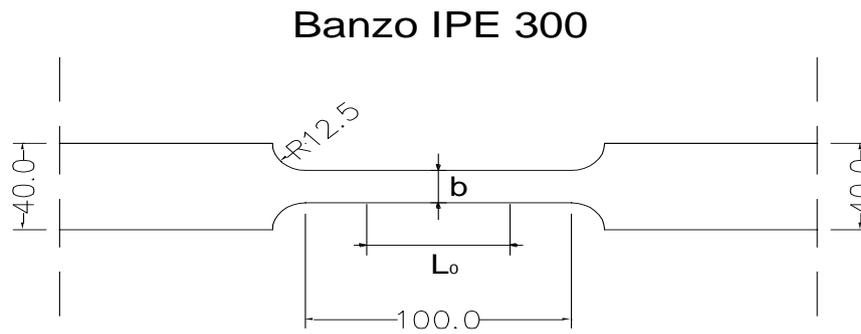


Figura 4.8 – Exemplo de um provete a ensaiar a temperatura ambiente (Banzo IPE 300)

4.4 Resultados

Depois de realizados os ensaios, procedeu-se à recolha de informação para ser tratada. A Figura 4.9, Figura 4.10 e Figura 4.11 apresentam os modos de rotura obtidos.

Nota: os números atribuídos aos provetes apenas servem para os distinguir no caso de se tratar do mesmo tipo de provete.



Figura 4.9 – Modo de rotura dos provetes de tubos de 8 mm à temperatura ambiente



Figura 4.10 – Modo de rotura dos provetes de Chapa 15 mm a 450 °C



Figura 4.11 – Modo de rotura dos provetes de Chapa 15 mm a 600 °C

A força efectuada pela prensa, no deslocamento imposto, e os valores obtidos pelo extensómetro foram tratados de forma a se obter gráficos tensão-extensão.

4.4.1 Tubos

De acordo com a Figura 4.12a e Figura 4.12b, verifica-se que não há grandes diferenças entre os provetes ensaiados. Tal como no caso do capítulo 3, para os tubos não existe patamar de cedência e o valor da tensão de cedência e da tensão última são muito semelhantes.

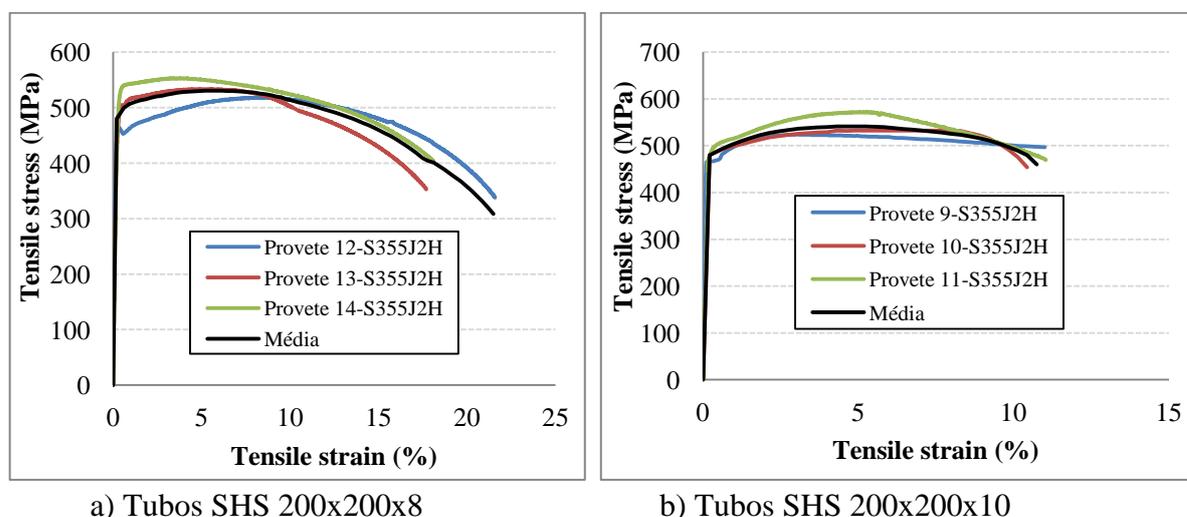


Figura 4.12 – Curvas tensão-extensão à temperatura ambiente

Da análise da Figura 4.13 verifica-se que à semelhança do que acontece à temperatura ambiente, o valor da tensão começa logo a baixar após atingir a cedência e o valor da tensão de cedência e tensão última são muito semelhantes. Através da observação da Figura 4.14a nota-se que o comportamento a esta temperatura é semelhante à temperatura ambiente, por a tensão não começar logo a baixar. Na Figura 4.14b verifica-se que, ao contrário das outras temperaturas, o valor da tensão começa logo a baixar para extensões baixas. Para os dois

casos o valor da tensão última e tensão de cedência não foi muito diferente, dentro de cada temperatura.

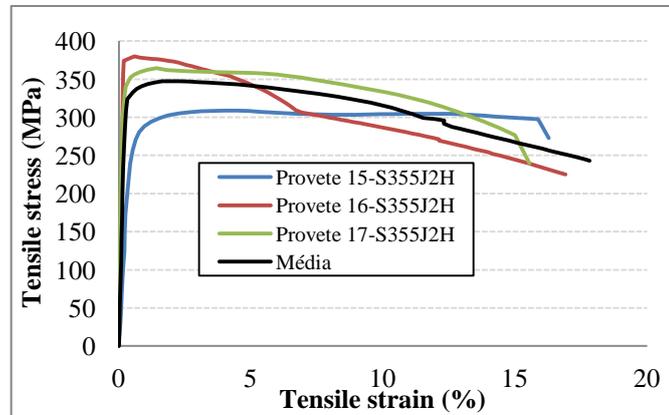


Figura 4.13 – Curvas tensão-estiramento para tubos SHS 200x200x8 a 450 °C

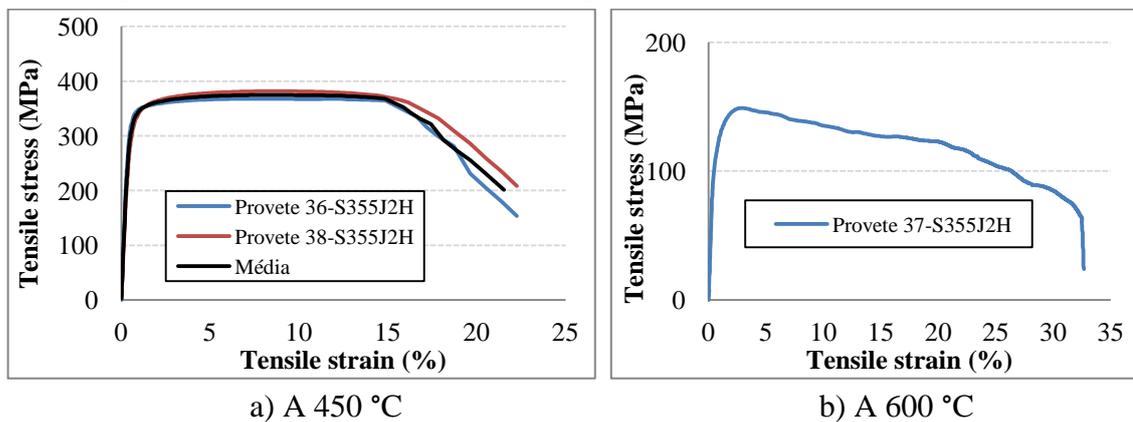


Figura 4.14 – Curvas tensão-estiramento para tubos SHS 200x200x10

4.4.2 Perfis Laminados e Chapas

As observações feitas nos ensaios dos perfis laminados e chapas (Figura 4.15a, Figura 4.15b, Figura 4.16 e Figura 4.17) são muito similares às já efectuadas no capítulo 3: o patamar de cedência desaparece para altas temperaturas; o valor da tensão última para 600 °C diminui logo para extensões baixas; a diferença entre o valor da tensão de cedência e tensão última é mínima para 600 °C. Nos ensaios à temperatura ambiente (Figura 4.15b) verifica-se, contrariamente ao esperado, que o provete 19 apresentou um comportamento semelhante a um tubo. Este comportamento pode ter-se devido ao tratamento térmico sofrido durante a fase de corte e conseqüente degradação do material. Dos ensaios realizados a 450 °C o valor da tensão subiu sempre até se atingir a rotura.

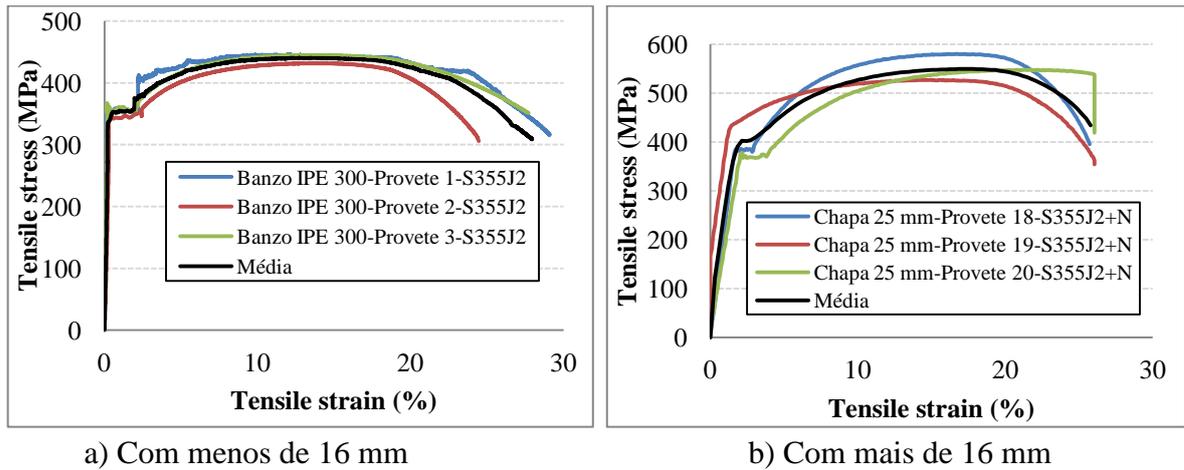


Figura 4.15 – Curvas tensão-extensão para perfis e chapas a temperatura ambiente

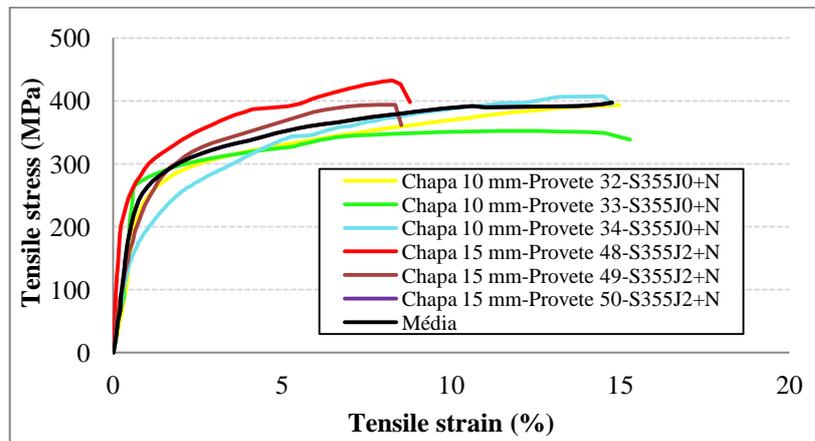


Figura 4.16 – Curvas tensão-extensão para perfis laminados e chapas a 450 °C

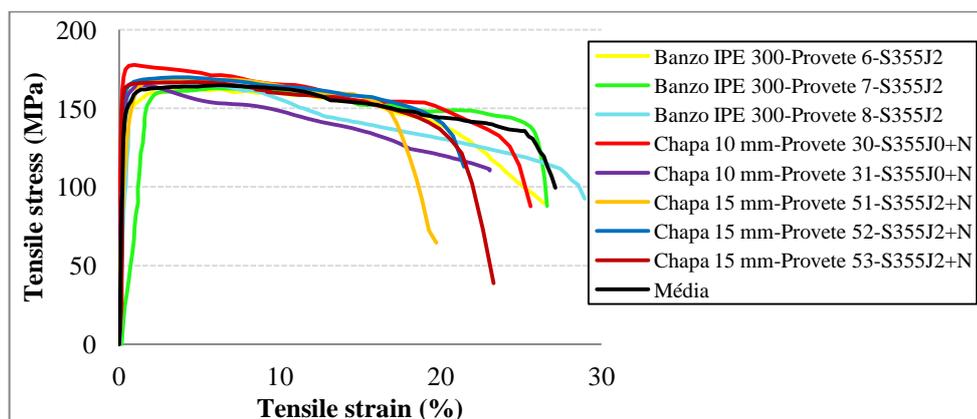


Figura 4.17 – Curvas tensão-extensão para perfis laminados e chapas a 600 °C

4.4.3 Degradação das propriedades do aço com a temperatura

Nesta parte procedeu-se a uma análise igual à efectuada no subcapítulo 3.4, só que agora com os resultados obtidos nos ensaios experimentais realizados nesta tese. Para este caso utilizaram-se os mesmos conjuntos do subcapítulo 3.4: laminados e chapas com menos de 16 mm de espessura (EN 10025-2), tubos com 8 mm de espessura e tubos com 10 mm de espessura (EN 10219-2). Em cada conjunto procedeu-se ao cálculo dos factores de redução para o módulo de elasticidade, a tensão de proporcionalidade, a tensão de cedência e a tensão última (Quadro 4.2 e Quadro 4.3).

De acordo com a análise da Figura 4.18 verifica-se, como se estava à espera, que a tensão diminui para os ensaios a altas temperaturas. Mais uma vez o motivo da variação da extensão na rotura foi igual ao apresentado para os perfis laminados e chapas S355 no capítulo 3.

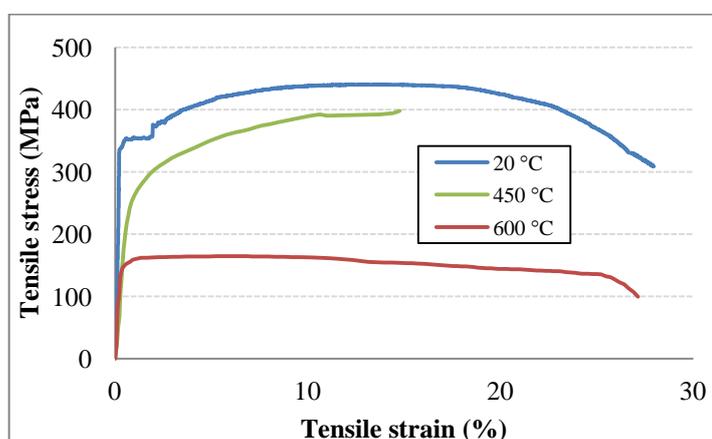


Figura 4.18 – Curvas tensão-extensão para perfis laminados e chapas com menos de 16 mm

Quadro 4.2 – Factores de redução para perfis laminados e chapas

Temperatura (°C)	Perfis Laminados e Chapas			
	$k_{E,\theta}$	$k_{p,\theta}$	$k_{y,\theta}$	$k_{u,\theta}$
20	1,000	1,000	1,000	1,000
450	0,551	0,575	0,859	0,903
600	0,396	0,344	0,435	0,367

Quando se observa os resultados obtidos (Figura 4.19a, Figura 4.19b, Figura 4.20a e Figura 4.20b) verifica-se que foram similares aos resultados tratados no capítulo 3. Na Figura 4.19a os valores obtidos são idênticos aos do EN 1993-1-2 assim como para os dados relativos a perfis laminados e chapas com menos de 16 mm de espessura.

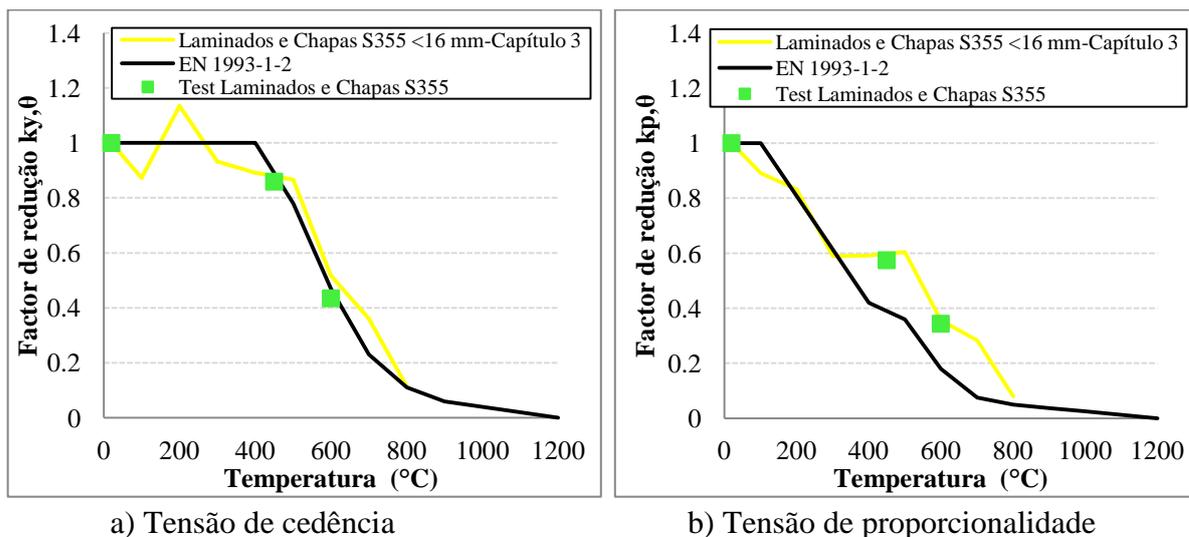


Figura 4.19 – Factores de redução para perfis laminados e chapas

Para a Figura 4.19b, Figura 4.20a e Figura 4.20b a análise pode ser feita em conjunto pois os resultados obtidos são iguais aos do capítulo 3, para o mesmo tipo de perfil. Para a tensão de proporcionalidade (Figura 4.19b) os valores obtidos são superiores, a partir de 200 °C, aos apresentados para o EN 1993-1-2, no entanto, para o módulo de elasticidade (Figura 4.20a) os valores obtidos são inferiores aos apresentados pelo EN 1993-1-2, para 450 °C.

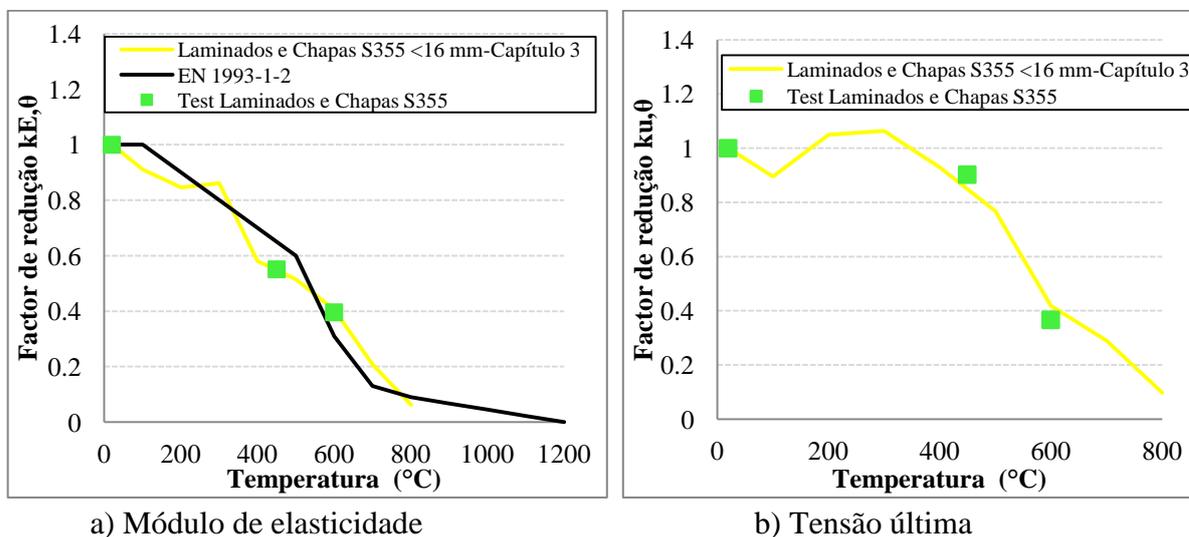


Figura 4.20 – Factores de redução para perfis laminados e chapas

Para os tubos, Figura 4.21a e Figura 4.21b, não existe patamar de cedência à temperatura ambiente e as observações feitas são similares às já efectuadas no capítulo 3 para o mesmo tipo de aço.

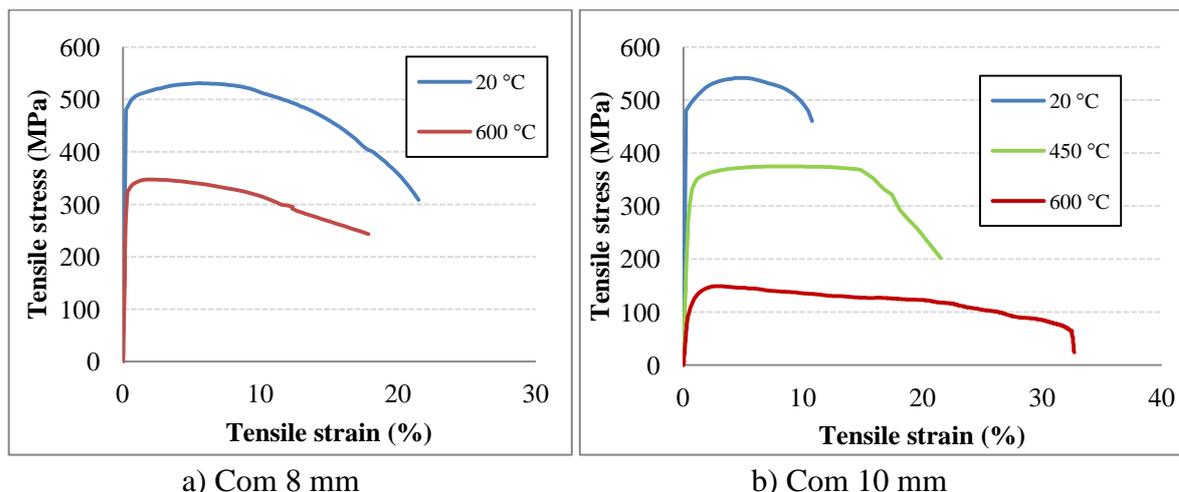


Figura 4.21 – Curvas tensão-extensão para tubos

Quadro 4.3 – Factores de redução para tubos com 8 e 10 mm de espessura

Temperatura (°C)	Tubos 8 mm de espessura				Tubos 10 mm de espessura			
	$k_{E,\theta}$	$k_{p,\theta}$	$k_{y,\theta}$	$k_{u,\theta}$	$k_{E,\theta}$	$k_{p,\theta}$	$k_{y,\theta}$	$k_{u,\theta}$
20	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
450	0,653	0,461	0,685	0,654	0,533	0,410	0,726	0,692
600	-	-	-	-	0,133	0,139	0,296	0,275

Dos factores de redução obtidos, para a tensão de cedência, pode verificar-se que os resultados estão um pouco abaixo do proposto pelo EN 1993-1-2 (Figura 4.22a). Um facto a notar é que os resultados obtidos são praticamente iguais aos dados tratados anteriormente no capítulo 3, à excepção dos tubos de 10 mm que obtiveram resultados um pouco abaixo para todos os casos. Relativamente à tensão de proporcionalidade (Figura 4.22b), os factores de redução são superiores aos apresentados pelo EN 1993-1-2. Só os testes para tubos de 10 se aproximaram mais do proposto pelo EN 1993-1-2, ficando até um bocado abaixo dos valores propostos a 600 °C. Os factores de redução para o módulo de elasticidade (Figura 4.23a) dos tubos de 8 mm estão muito próximos dos factores apresentados pelo EN 1993-1-2 e são superiores aos do capítulo 3, enquanto para os tubos de 10 mm os resultados estão muito abaixo do proposto pelo EN 1993-1-12. Para a tensão última (Figura 4.23b) os valores obtidos são similares aos propostos pelo EN 1993-1-2.

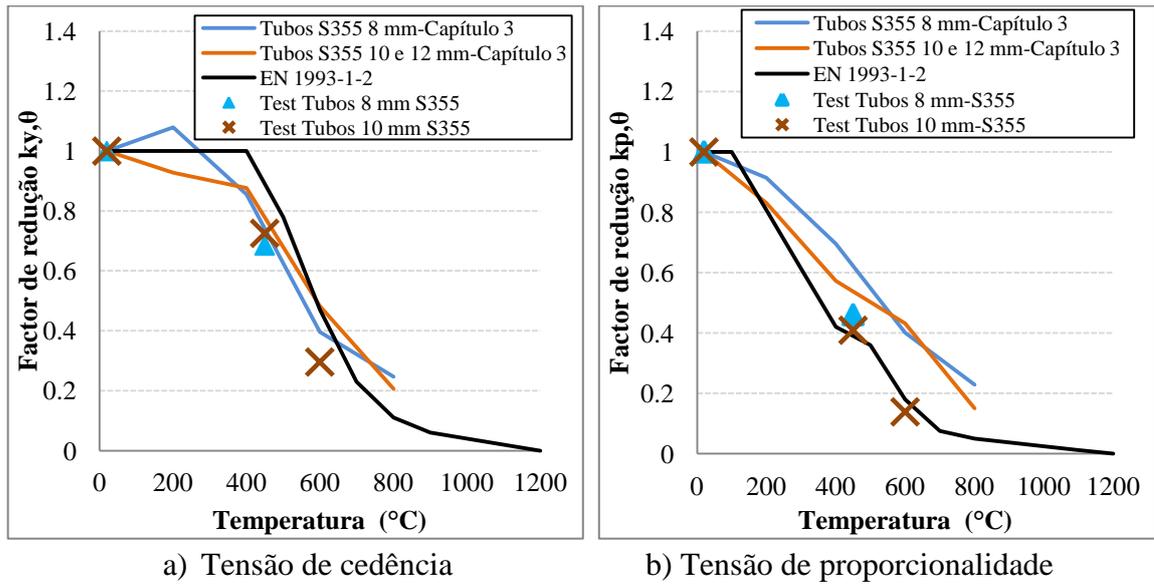


Figura 4.22 – Factores de redução

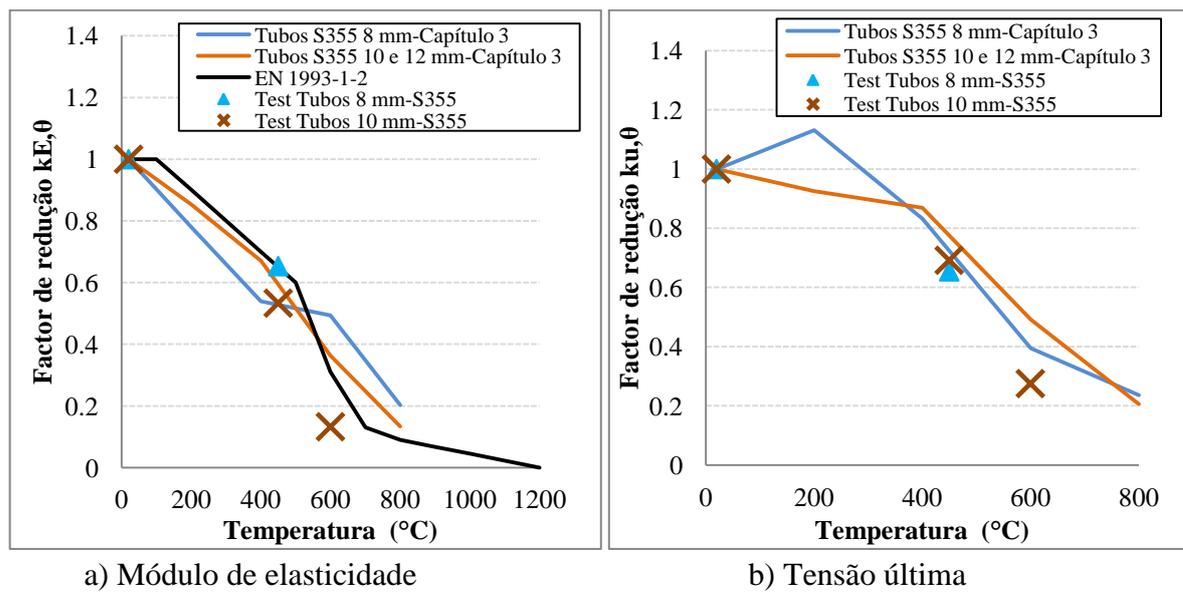


Figura 4.23 – Factores de redução

5 CONCLUSÃO E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Este trabalho pretendeu aprofundar o conhecimento sobre a degradação das propriedades mecânicas com o aumento da temperatura. Este estudo foi feito com base na análise de diversos códigos, de resultados provenientes de ensaios realizados por outros autores e resultados de trabalhos realizados no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, comparando-os de acordo com a classe do aço e do tipo de perfil. A informação sobre as mudanças das propriedades dos parafusos, presente nos códigos, também foi apresentada, embora não tenha sido feita nenhuma avaliação experimental. De acordo com as comparações efectuadas concluiu-se que:

- Da análise dos regulamentos vigentes, os valores apresentados pelo EN 1993-1-2 e pelo ANSI/AISC 360-10, 2010 são muito semelhantes.
- Os valores obtidos em ensaios realizados por outros autores, capítulo 2, e por autores do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, capítulo 3, tiveram muitas semelhanças entre si, à excepção dos resultados obtidos por Qiang *et al.*, 2012b que obteve valores muito superiores. De um modo geral estes ensaios apresentaram ligeiras diferenças relativamente aos valores propostos pelo EN 1993-1-2.
- Nos ensaios realizados no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra verificou-se que a tensão de cedência de perfis laminados, chapas e tubos de 8 mm, nos ensaios falados no capítulo 3, aumenta para temperaturas próximas de 200 °C em relação ao seu valor à temperatura ambiente. Este aumento de tensão deve-se ao efeito *dynamic strain ageing*. Este fenómeno ocorre, para taxas de tensão e temperaturas intermédias, devido à interacção entre os deslocamentos efectuados pelos átomos (Samuel *et al.*, 1996).
- Os resultados obtidos, para a tensão de cedência, tensão de proporcionalidade, módulo de elasticidade e tensão última, das chapas e perfis laminados dos ensaios apresentados no capítulo 4 foram praticamente idênticos aos dados tratados no capítulo 3 para o mesmo tipo, classe S355 laminados e chapas com menos de 16 mm de espessura.
- Para a tensão de cedência, os ensaios de chapas e perfis laminados realizados no âmbito desta tese, tiveram valores muito semelhantes aos apresentados pelo EN 1993-1-2. Por outro lado, para a tensão de proporcionalidade, os valores apresentados por este código são muito conservadores quando comparados com os experimentais.

Relativamente ao módulo de elasticidade, os valores obtidos não estão do lado da segurança.

- Os resultados obtidos nos ensaios de tubos de 8 mm e 10 mm de espessura tiveram algumas diferenças relativamente aos dados do capítulo 3 referentes ao mesmo tipo, classe S355 tubos de 8 mm de espessura e tubos de 10 e 12 mm de espessura.
- Tal como para os ensaios nos perfis laminados e chapas, os ensaios realizados para tubos obtiveram resultados inferiores ao EN 1993-1-2 para a tensão de cedência e módulo de elasticidade e superiores para a tensão de proporcionalidade. As únicas exceções foram para a tensão de proporcionalidade dos tubos de 10 mm a 600 °C e para o módulo de elasticidade dos tubos de 8 mm a 450 °C.
- A extensão na rotura, na maioria dos casos, baixou para temperaturas entre 100 °C e 400 °C em relação à temperatura ambiente, e aumentou para temperaturas superiores a 600 °C devido às transformações químicas no aço. À medida que a temperatura aumenta essas transformações abrandam e a extensão aumenta, logo, a ductilidade aumenta (Qiang *et al.*, 2012a). De acordo com o proposto pelo EN 1993-1-2 também é possível contar com o endurecimento do aço até temperaturas próximas de 400 °C.

Os resultados obtidos neste trabalho irão ser usados na definição e calibração dos modelos numéricos previstos no projecto de investigação Impactfire PTDC/ECM/110807/2009 (tarefa 4). Adicionalmente, estes resultados servirão para avaliar a segurança dos factores de redução para a tensão de cedência, tensão de proporcionalidade e módulo de elasticidade propostos no EN 1993-1-2, assim como avaliar a necessidade, ou não, de uma proposta de novas curvas de relação tensão-extensão do aço que tenham em conta não só o endurecimento do aço até 400 °C, mas também o seu amolecimento a partir dos 600 °C e a variação da extensão na rotura com o aumento da temperatura.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (ANSI/AISC 360-10, 2010) American Institution of Steel Construction (AISC). (2010). “Specification for structural steel buildings.” ANSI/AISC 360-10, Chicago.
- (AS 4100, 1998) Australian Standard (AS). (1998). “Steel Structures” AS 4100:1998, Sydney, Australia.
- (BS 5950-8, 2003) British Standards Institution (BSI). (2003). “Structural use of steelwork in buildings – Part 8: Code of practice for fire resistant design.” BS 5950-8:2003, London
- (British Steel Technical Swinden Laboratories, 1993) British Steel Technical Swinden Laboratories, “The Reinstatement of Fire Damaged Steel and Iron Framed Structures”, Printed and Published by BS Swinden Laboratories, ISBN 0900206462, 1993
- (Chen *et al.*, 2006) Chen, J., Young, B. and Uy, B. “Behaviour of high strength structural steel at elevated temperatures”. *Journal of Structural Engineering*, Volume 132, No 12, pp. 1948-1954, 2006.
- (Code of practice for the structural use of steel, 2010) Hong Kong Buildings Department. (2011). *Code of practice for the structural use of steel*, The Government of the Hong Kong Special Administrative Region, Kowloon, Hong Kong.
- (NBR 14323, 2003) Código Brasileiro (NBR). (2003). “Dimensionamento de estruturas de aço e de estruturas mistas aço-concreto de edifícios em situação de incêndio”, NBR 14323, Agosto 2003.
- (EN 1993-1-2, 2010) European Committee for Standardization. EN 1993-1-2, Eurocode 3 – design of steel structures – part 1-2; general rules – structural fire design. CEN, Brussels. Versão Portuguesa, Março 2010.
- (González e Lange, 2009) González, F. and Lange, J., “Behaviour of high strength grade 10.9 bolts under fire conditions”. *Application of structural fire design*, 19-20 February. Prague, Czech Republic, 2009.

- (Hanus *et al.*, 2011) Hanus, F., Zilli, G. and Franssen, J.-M., “Behaviour of Grade 8.8 bolts under natural fire conditions – Test and model”. *Journal of Construction Steel Research*, Volume 67, Issue 8, pp. 1292-1298, August 2011.
- (Haremza *et al.*, 2012) Haremza, C., Santiago, A. and Simões da Silva, L. “Experimental behaviour of heated composite steel-concrete joints subject to variable bending moments and axial forces”. *Engineering of Structures*, 2012.
- (IS 800, 2007) Indian Standard (IS). (2007). “General Construction Steel – Code of practice.” IS 800:2007 (Third Revision), Bureau of Indian Standards, New Delhi.
- (Kelly e Sha, 1999) Kelly, F. S. and Sha, W. “A comparison of the mechanical properties of fire-resistant and S275 structural steels”. *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 50, Issue 3, pp. 223-233, 1999.
- (Kirby, 1995) Kirby, B. R., “The behaviour of high-strength grade 8.8 Bolts in Fire”. *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 33, Issues 1-2, pp. 3-38, 1995.
- (Lopes *et al.*, 2012) Lopes, F., Santiago, A., Simões da Silva, L., Heistermann, T., Veljkovic, M. and Guilherme S. da Silva, J. “Behaviour of the reverse channel joint component at elevated temperature”, *ISTSI4*, London, September, 2012.
- (Neves *et al.*, 1995) Neves, I. C., Valente, J. C., Branco, F. A., “Study of the Chiado Fire in Lisbon”, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings*, pp. 250-256, 1995.
- (Outinen *et al.*, 2000) Outinen, J., Kaitila, O. and Mäkeläinen, P., “A study for the development of the design of steel structures in fire conditions”. *1st International Workshop of Structures in Fire*, Proceedings pp. 267-281, Copenhagen, Denmark, 2000.
- (Outinen e Mäkeläinen, 2002) Outinen, J. and Mäkeläinen, P., “Mechanical properties of structural steel at elevated temperatures”. *Advances in Steel Structures (ICASS’02) – Proceedings of the Third International Conference on Advances in Steel Structures 9*, pp. 1103-1110, December 2002, Hong Kong, China
- (Qiang *et al.*, 2011) Qiang, X., Bijlaard, F. and Kolstein, H. “Elevated temperature effect on elastic modulus of high strength steel S690”. *International RILEM Conference on Advances in Construction Materials Through Science and Engineering*, pp. 945-951, 2011, Hong Kong, China.

- (Qiang *et al.*, 2012a) Qiang, X., Bijlaard, F. and Kolstein, H. “Dependence of mechanical properties of high strength steel S690 on elevated temperatures”. *Engineering Structures*, Volume 30, pp. 73-79, 2012.
- (Qiang *et al.*, 2012b) Qiang, X., Bijlaard, F. and Kolstein, H. “Post-fire mechanical properties of high strength structural steels S460 and S690”. *Engineering Structures*, Volume 35, pp. 1-10, 2012.
- (Samuel *et al.*, 1996) Samuel, K. G., Mannan, S. L. and Rodriguez, P. “Another manifestation of dynamic strain ageing” *Journal of Materials Science Letters* 15, pp. 1697-1699, 1996.
- (Santiago *et al.*, 2009) Santiago, A., Simões da Silva L., Vila Real P., Gameiro Lopes A. and Vaz G., “Experimental evaluation of the influence of connection typology on the behaviour of steel structures under fire”, *Engineering Journal AISC* , 46(2), pp. 81-98, 2009
- (Schneider e Lange, 2009) Schneider, R. and Lange, J. “Constitutive equations of structural steel S460 at high temperatures” *Nordic Steel Construction Conference*, pp. 204-211, 2009, Malmö, Sweden.
- (Vila Real, 2003) Vila Real, Paulo, “Incêndio em Estruturas Metálicas – Cálculo Estrutural”, Edições Orion, 1ª Edição, ISBN 972-8620-04-7, Novembro 2003.